

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“ ” _____ 2021 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,
електропривод та електромобільність»


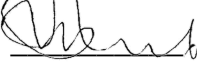
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Тяговий електропривод змінного струму _____

Виконав (-ла): студент (-ка) III курсу, групи ЕП-п81
(шифр групи)

_____ Моховик Андрій Олексійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент Теряєв Віталій Іванович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент _____ доцент Цивінський Сергій Станіславович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)


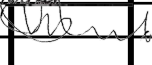
Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	141.8113.010.БР	Пояснювальна записка	71	
3	A1	141.8113.010.БР	Креслення загального виду	1	
4	A1	141.8113.010.БР	Схема електрична принципова електровозу ЕКр-1 «Тарпан»	1	
5	A1	141.8113.010.БР	Результати досліджень	1	

					141.8113.010.БР				
Змн	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Тяговий електропривод змінного струму	Лім	Лист	Листів	
Розроб.		Моховик А.О.						2	71
Перевір		Теряєв В.І.							
Н. контр.		Приймак Б.І.				НТУУ «КПІ ім. І Сікорського», ФЕА Кафедра АЕМС-ЕП Гр.ЕП-п81			
Зав.каф.		Пересада С.М.							

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: _____Тяговий електропривод змінного струму_____

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Моховику Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Тяговий електропривод змінного струму,
керівник проекту ктн. доцент Теряєв Віталій Іванович _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2021 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____ 9 червня 2021 року _____

3. Вихідні дані до проекту Маса електровоза $P = 200$ т, маса рухомого складу $Q \cdot 10^3 = 12$ т, конструкційна швидкість електровозу $V_k = 160$, Розрахунковий підйом $i_p = 14\%$.

4. Зміст пояснювальної записки 1 Аналітичний огляд в області тягових електроприводів залізничного транспорту. 2 Визначення потрібної потужності та вибір електродвигуна. 3 Розрахунок параметрів електродвигуна. 4 Вибір силового

електрообладнання. Розробка силової схеми перетворювального пристрою. 5 Математична модель електромеханічного об'єкта, синтез системи керування. 6 Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи (дослідження динаміки шляхом моделювання). Аналіз результатів. 7 Спецчастина. Робота двох тягових електроприводів на спільне навантаження. Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Загальний вид потягу, 2. Схема електрична принципова силова, 3. Результати моделювання _____

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

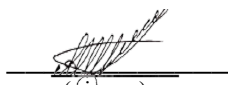
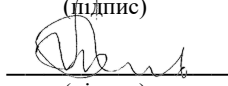
7. Дата видачі завдання _____ 15.03.2021 р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд в області тягових електроприводів залізничного транспорту	29.03.21	
2	Визначення потрібної потужності електродвигуна	12.04.21	
3	Розрахунок параметрів електродвигуна	26.04.21	
4	Вибір силового електрообладнання. Розробка силової схеми перетворювального пристрою	10.05.21	
5	Математична модель електромеханічного об'єкта, Синтез системи керування	17.05.21	
6	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи (дослідження динаміки шляхом моделювання). Аналіз результатів	24.05.21	
7	Спецчастина. Робота двох тягових електроприводів на спільне навантаження	31.05.21	
8	Список використаної літератури	31.05.21	

Студент

Керівник проекту


(підпис)

(підпис)

Андрій МОХОВИК

Віталій ТЕРЯЄВ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 71, рисунків - 29, таблиць – 6, графічну частину на 3 листах А1.

В дипломному проєкті виконано дослідження режимів роботи тягового електропривода змінного струму. Проведено аналітичний огляд тягових електросистем в області залізничного транспорту. Виконаний опис конкретного електровоза вітчизняного виробництва та його системи електроприводу, а також сформовані вимоги до тягових електроприводів та автоматики для них.



Розраховані зусилля для електровозу, обраний електропривод, який задовольняє вимоги по розрахованій потужності.

Здійснені розрахунки параметрів схеми заміщення і системи автоматичного керування.

Проведено дослідження роботи електроприводу в режимах, які симулюють реальні умови роботи приводу.

Виконано аналіз отриманих результатів досліджень.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЯГОВІ ЗУСИЛЛЯ, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ДВОДВИГУННИЙ ПРИВОД, УСЕРЕДНЕНЕ КЕРУВАННЯ, «ВЕДУЧИЙ-ВЕДЕНИЙ»

					141.8113.010.БР				
Змн	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Тяговий електропривод змінного струму Реферат	Лім	Лист	Листів	
Розроб.	Моховик А.О								
Перевір	Теряєв В.І						7	71	
						НТУУ «КПІ ім. І Сікорського», ФЕА			
Н. контр.	Приймак Б.І					Кафедра АЕМС-ЕП			
Зав.каф.	Пересада С.М					Гр.ЕП-п81			

SUMMARY

The diploma project contains: pages - 71, figures - 29, tables – 6, a graphic part on 3 sheets of A1.

In the diploma project the research of operating modes of the traction electric drive of alternating current is executed. An analytical review of traction electrical systems was done in the field of railway transport. It was done a description of a specific electric locomotive and its electric drive system, as well as the requirements for traction electric drives and automation for them.


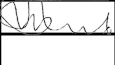
There are calculated efforts for the electric locomotive, the selected electric drive that meets the requirements for the calculated power.

Calculations of the L-shaped substitution scheme are carried out.

It was done study of the operation of the electric drive in modes that simulate the real operating conditions of the drive.

The analysis of the received results of researches is executed.

PULLING POWER, ELECTRIC, EQUIVALENT CIRCUIT, TRACTION, FREQUENCY CONTROL, DIRECT VECTOR CONTROL, SIMULATION, MIXED LOADING, MEDIOCRE KERUANNYA "MASTER-SLAVE"

					141.8113.010.BW			
	<i>Latter</i>	<i>№ of doc.</i>	<i>Sign.</i>	<i>Date</i>				
	<i>Devel.</i>	<i>A. Mokhovyk</i>			<i>AC traction electric motor</i> <i>Summary</i>			
	<i>Checked</i>	<i>V. Teryaev</i>						
	<i>N. Contr.</i>	<i>B. Priymak</i>						
	<i>Approved.</i>	<i>S. Peresada</i>			<i>NTUU «KPI», FEA</i> <i>Department AEMS-ED gr. EP-p81</i>			

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	12
1.1 Галузі використання та типові технічні рішення тягових електроприводів	12
1.2 Опис конкретного електровозу та його системи електроприводу.....	19
1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації	28
2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	31
2.1 Розрахунок тягових зусиль електроприводу.....	31
2.2 Обґрунтування вибору потужності електродвигуна	34
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	37
4. ВИБІР СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ. РОЗРОБКА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	42
4.1 Розрахунок випрямляча.....	42
4.2 Розрахунок автономного інвертора напруги.....	43
4.3 Вибір тягового трансформатора.....	45
4.4 Розрахунок та вибір гальмівних резисторів.....	46
5. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТА, СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	48
5.1 Обґрунтування принципу керування електроприводом.....	48
5.2 Модель електроприводу у двофазній системі координат.....	52
5.3 Алгоритм векторного керування.....	53
6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ	56

7. СПЕЦЧАСТИНА. РОБОТА ДВОХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА СПІЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ.....	65
7.1 Усереднене векторне керування двома двигунами, що живляться від одного інвертора.....	65
8. 7.2 Векторне керування двома двигунами з розділенням ролей «ведучий-ведений», що живляться від одного інвертора.....	67
9. ВИСНОВОК.....	70
10.СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

В теперішній час електродвигуни поступово витісняють традиційні двигуни внутрішнього згорання. Це відбувається в багатьох галузях таких як: машинобудування, кораблебудування та залізничному транспорті. На даний час можна бачити, що старі тепловози відходять на другий план у порівнянні з електровозами, які в наш час набувають все ширше розповсюдження.

В залізничному транспорті в основному використовується електропривод постійного струму, але все частіше починають застосовувати асинхронний тяговий електропривід змінного струму. Все почалось із перших електровозів на двигунах постійного струму і розвинулось у складні системи з використанням змінного струму, що дозволило досягти більших швидкостей, більшу точність та швидкість доставок.

В даному дипломному проекті розраховується тяговий електропривод змінного струму та його режими роботи, які використовуються на досліджуваній моделі електровозу ЕКр-1 «Тарпан». Також проводяться розрахунки тягових зусиль електровоза, які він має долати.

В якості спецчастини розглядається робота дводвигунної системи електроприводу електровозу з живленням двигунів від одного інвертора.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Галузі використання та типові технічні рішення тягових електроприводів

На початку ХХ століття тяговий електропривод здобув широке розповсюдження серед різних видів транспорту у різних галузях промисловості. А саме в залізничному, міському, автомобільному транспорті та шахтній промисловості.

Виключне місце в даному комплексі займає двигун постійного струму з послідовним збудженням. Такий стан пояснюється цілою низкою причин.

По-перше, даний вид транспорту набув широкого поширення на міському і магістральному рейковому сполученні, велика частина всіх експлуатованих тягових електроприводів мали єдиний принцип, отже, була накопичено теоретична і практична база для роботи з ним.

По-друге, виявилось, що система тягового електропостачання на постійному струмі з використанням перетворювальних тягових підстанцій найбільш придатна до експлуатації за сукупними властивостями.

По-третє, в якості живлячих мереж в підземній відкатці використовуються або акумуляторні станції, або тролейний вид живлення тягового приводу, що в свою чергу обмежувало використання інших видів електродвигунів.

Спільно в парі з двигуном постійного струму найчастіше використовується система реостатного управління з силовим контролером. Дана схема управління по факту морально застаріла і використовується на гірничорудних підприємствах через свою простоту і досить легку ремонтпридатності. У той же час використання даної системи пов'язано з великими втратами енергії; наявність реостата в ланцюзі

якоря знижує жорсткість механічної характеристики, що ускладнює управління електровозом.

У електровозах нового покоління введений ряд захисних блокувань, що підвищують безпеку експлуатації обладнання. Наприклад, в електровозі К14 присутні захисту, що виключають пуск двигуна при відкритих дверях кабіни, відсутності машиніста на сидінні, нульового захисту - відбувається автоматичне накладення пневматичного гальма при виникненні позаштатної ситуації: відключення мережі живлення, створення автоматичного нормування завдання на контур швидкості. Введення даних блокувань стало можливим завдяки наявності спеціальної станції з силовими контакторами.



Рисунок 1.1 – Шахтний електровоз К14

Застосування асинхронного приводу в якості тягової машини було покладено в основу із самого зародження магістральної залізниці. Перший електровоз оснащувався ТАД з контактними кільцями, який живився від тягової мережі трифазного струму. Регулювання швидкості здійснювалося шляхом введенням рідинного реостата в ланцюг ротора, однак, конструктивні і технологічні складнощі у виробництві даного типу приводу не дозволили ввести розробку в широке застосування.

Обмежений розвиток тягових асинхронних двигунів в середині ХХ століття можна пов'язати з відсутністю елементної і матеріальної бази, що дозволяло використовувати технологічні переваги ТАД в порівнянні з двигуном постійного струму послідовного збудження.

У зв'язку з цим, до 70-х років розвиток ТАД відбувався в суто експериментальних і стендових дослідженнях. Розроблялася можливість застосування як двофазних, так і трифазних тягових двигунів, з живленням від тягової мережі однофазного змінного струму з використанням проміжного силового електромеханічного перетворювача. Розглянуті приводи були конструктивно складні у виробництві.

Спроби впровадження силової електроніки і напівкерованих / керованих випрямлячів почалися з середини 70-х років, на базі одноопераційних тиристорів. Вітчизняні розробки велися у напрямку створення магістрального електровоза з асинхронним тяговим двигуном і статичним напівпровідникових перетворювачем. Були створені дослідні електровози ВЛ80А і ВЛ86Ф.



Рисунок 1.2 – Електровоз з двигуном змінного струму ВЛ80

На теперішній час з появою нових напівпровідникових пристроїв, збільшенням швидкодії мікроконтролерів та впровадженням нових алгоритмів управління стало можливим широке застосування нових класів перетворювальних пристроїв із ланкою підвищеної частоти. Це дозволяє суттєво знизити масогабаритні показники, а іноді і повністю змінити підхід до побудови традиційних систем у залізничній техніці. Цьому сприяє і застосування сучасних програм моделювання, які дозволяють уникнути помилок ще на етапі проектування, що у свою чергу знижує вартість розробки виробу.

Одним із сучасних електровозів які використовуються безпосередньо в Україні є серія ДСЗ. Це сучасний електровоз змінного струму Україно-Німецького виробництва. Німецька компанія Siemens виготовляє силову електроніку тягового приводу, а механічну частину виготовляють в Україні.



Рисунок 1.3 – Електровоз ДСЗ

Також тяговий електропривод змінного струму набув розповсюдження в міському транспорті. Прикладом може служити низькопрофільні трамваї польського виробництва Pesa, та Українського виробництва трамваї К1М6.

Зазначимо, що з розвитком асинхронних двигунів та явною їх перевагою над двигунами постійного струму трамвайні вагони поступово переходять на асинхронні системи управління.

Оскільки на трамваї зазвичай встановлюються більше ніж чотири двигуни, то такий привід має відповідати закону узгодженого багатодвигунного управління [1].

Цей закон дозволяє реалізувати незалежне управління кожним з цих двигунів в залежності від швидкості будь-якого з них.

Цей принцип використовується для приведення в рухомий стан і гальмування багатосекційних трамваїв. А також оптимізації характеристик розгону, гальмування, зменшення зносу і зниження порушень конфігурації колісних пар ведучих візків.

Для підвищення економічних показників привода використовують одночасне управління двома двигунами від одного інвертора. Приклад структурної схема такого управління трамваєм представлена на рис. 1.4.

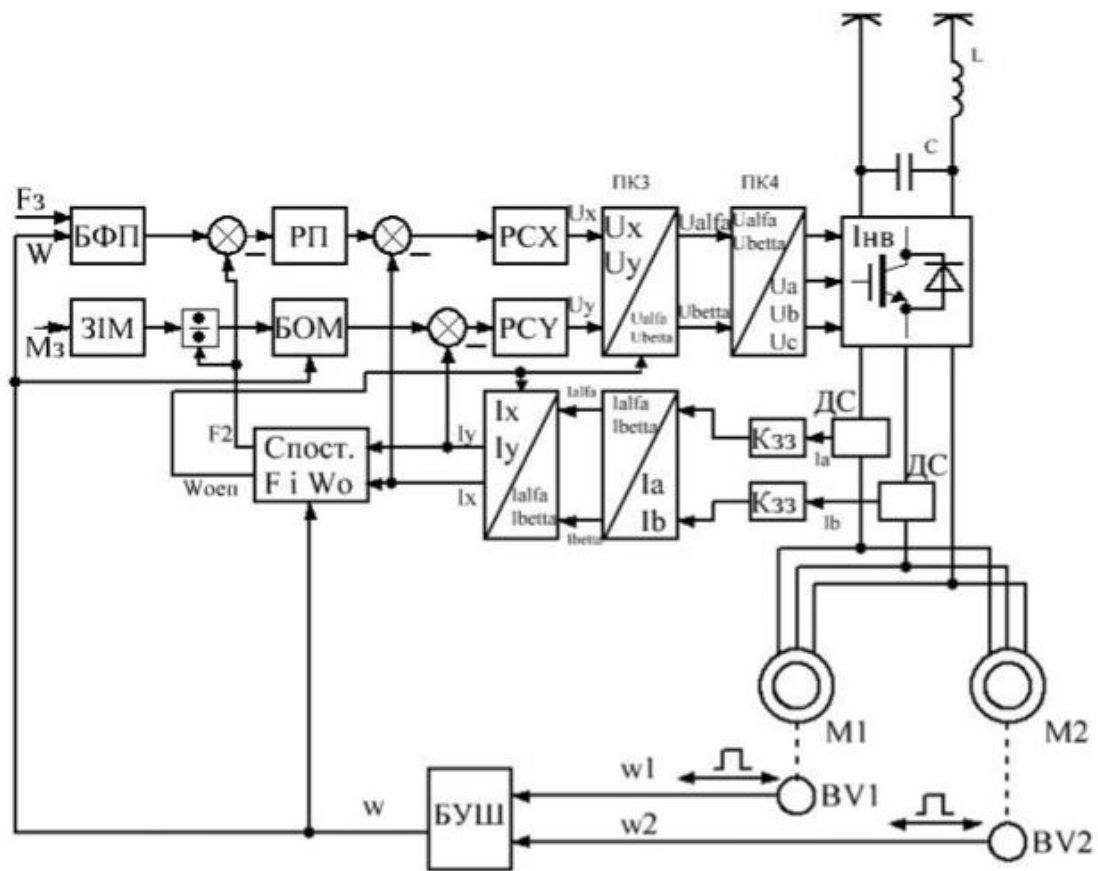


Рисунок 1.4 - Структурна схема системи управління АП дводвигунного приводу трамвайного вагону

У дані схемі: БФП – блок формування потоку; РП – регулятор потоку; БОМ – блок обмеження моменту; РСХ, РСУ – регулятори струму по осі Х та У; ПК₁ – перетворювач координат з осей А, В, С в осі α , β ; ПК₂ – перетворювач координат з осей α , β в осі Х та У; ПК₃ – перетворювач координат з осей Х та У в осі α , β ; ПК₄ – перетворювач координат з осей α , β в осі А, В, С; І_{НВ} – інвертор на IGBT транзисторах; С_{пост.} F і w₀ - спостерігач для розрахунку потоку двигуна і швидкості холостого ходу; К_{зз} – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом; ДС – датчики струму; М₁, М₂ - два асинхронних двигуна; BV₁, BV₂ – два датчика швидкостей; БУШ – блок узгодження швидкостей.

Концепція управління системою з багатьма двигунами також використовується у вагонах метрополітену. На сьогоднішній день найчастіше вагони метрополітену оснащують сучасними видами ТАП. Наприклад, на вагонах типу 81-7036/37, що експлуатуються Харківським метрополітеном, мають по чотири АД.

На рис. 1.5 зображена структурна схема заміщення електричної частини ТАП вагону метрополітену.

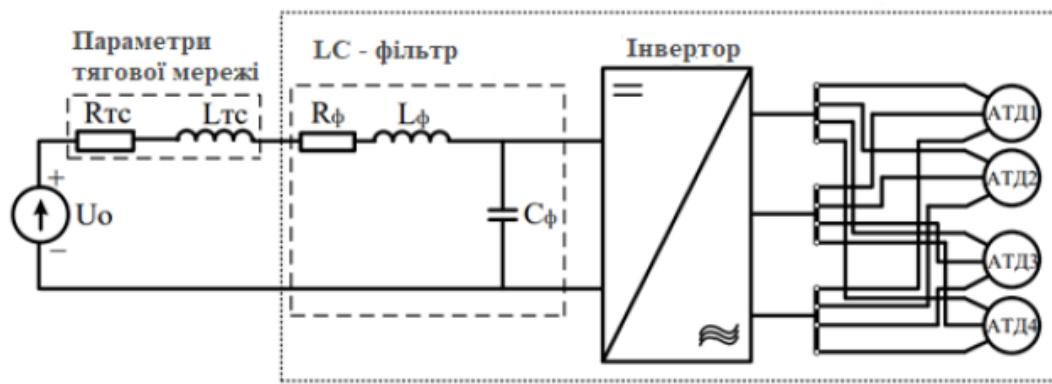


Рисунок 1.5 – Схема заміщення електричної частини ТАД вагону метрополітену

Електрична система представлена у вигляді джерела живлення постійної напруги, тягової мережі і схеми головних силових ланцюгів комплекту електрообладнання ТП вагона 81-7037, яка включає в себе вхідний LC-фільтр, автономний інвертор напруги, який побудований на IGBT-транзисторах і чотири паралельно включених АД.

Вхідний LC-фільтр зменшує коливання струму, створювані силовим інвертором, що в результаті зменшує перешкоди, які передаються у контактну мережу.

Автономний інвертор перетворює напругу постійного струму, яка знімається з контактної рейки, у 3-х фазну напругу з регульованою амплітудою і частотою для живлення чотирьох асинхронних двигунів. Живлення рухомого складу

здійснюється через тягову мережу від джерела постійної напруги, яке відповідає напрузі холостого ходу вагону метрополітену.

Найбільш характерною структурою тягових електромеханічних систем з живленням декількох двигунів змінного струму від одного інвертора є рухомий склад залізниць. На рис. 1.6 показано структуру живлення тягових двигунів двосистемного (3 кВ постійного струму, 25 кВ змінного струму 50 Гц) високошвидкісного електропотягу. Усі вагони містять по два візка, які приводяться у рух від двох двигунів, що живляться від одного інвертора. Аналогічну структуру має вітчизняний швидкісний магістральний двосистемний електропотяг ЕКр-1 «Тарпан».

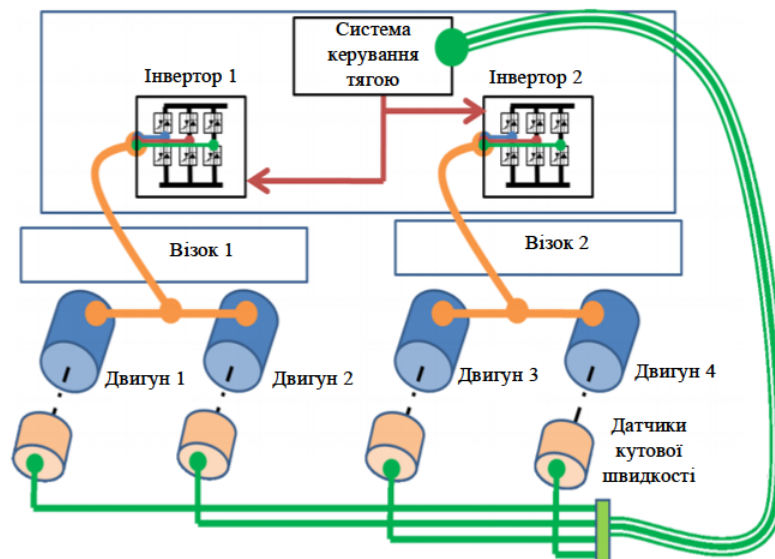


Рисунок 1.6 – Структура живлення тягових двигунів двосистемного високошвидкісного потягу

1.2 Опис конкретного електровозу та його системи електроприводу[2]

У якості електровозу для опису доцільно використовувати вітчизняні зразки електровозів. Адже вони ні в чому не поступаються закордонним аналогам, або навіть мають певний ряд переваг. Одним із таких електропоїздів

являється ЕКр-1 «Тарпан» - швидкісний міжрегіональний електропоїзд, створений на Крюківському вагонобудівному заводі в 2011–2012 роках.



Рисунок 1.7 – ЕКр-1 «Тарпан»

Даний електропоїзд використовує ТЕП моделі ТМФ 59-39-4 з наступними номінальними даними, які приведені в таблиці 1.1.

ТМФ —тяговий електродвигун з примусовою вентиляцією, 59 — зовнішній діаметр статора (590 мм), 39 — довжина пакета ротора (390 мм), 4 — кількість полюсів обмотки.

Таблиця 1.1 - Номінальні данні двигуна TMF 59-39-4[3]

Номінальна напруга, В	400
Потужність, кВт	500
Струм якоря в годинному режимі, А	885
Частота, Гц	57
Частота обертання, об/хв	1700
Максимальна частота обертання, об/хв	5130
Кількість полюсів	4
Попередження про перегрів статора і відключення, °С	190
Маса ТЕД, кг	1160

Даний привод використовує наступну схему електричну принципову (див. рис. 1.8).

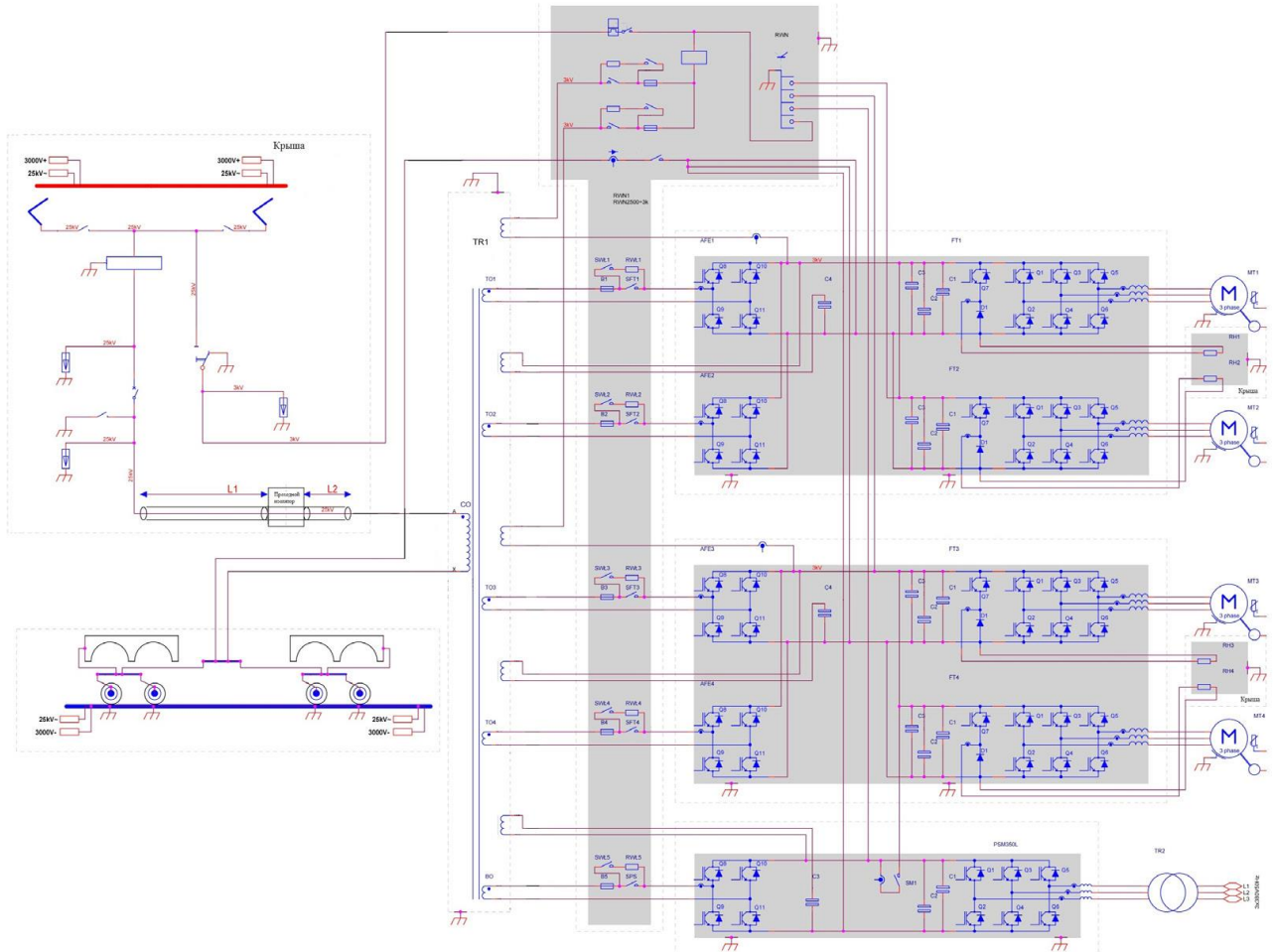


Рисунок 1.8 – Схема електрична принципова тягового електрообладнання

TR1 – тяговий трансформатор; CO – мережева обмотка тягового трансформатора; TO1, TO2, TO3, TO4 – тягові обмотки тягового трансформатора; BO – допоміжна обмотка тягового трансформатора; RWN - розподільник високої напруги; AFE – керовані випрямлячі; FT – тягові інвертори; PSM350 – статичний перетворювач напруги; TR2 – трансформатор власних потреб; MT – тягові електродвигуни; RH – гальмівні резистори.

Тягове електрообладнання. Тягове обладнання потягу ЕКр1 зосереджено лише в двох головних вагонах з кабінами управління. Дане рішення дозволяє знизити витрати, а також масу потягу в цілому. Також, у разі відмови тягового електрообладнання одного з вагонів, існує можливість продовжити рух з 50%-ю встановленою тяговою потужністю.

Для забезпечення експлуатаційної швидкості до 160 км/год, на електропотягу встановлені тягові електродвигуни сумарною потужністю 4 МВт в номінальному режимі роботи і до 5,28 МВт при розгонах в короткочасному режимі (на випробуваннях була отримана потужність 5,36 МВт в короткочасному режимі) .

Реалізована можливість рекуперативного гальмування при наявності на лінії споживачів і реостатного гальмування при відсутності таких споживачів.

Гальмівний резистор. На даху головного вагона встановлені два блоки резисторів, в кожному з яких по два резисторних модуля. Таким чином, на кожен інвертор двигуна використовується по одному резистору. Максимальна потужність розсіювання кожного резистора становить 500 кВт.

Електричне рекуперативне гальмування використовується в якості штатного, а реостатне включається лише в тому випадку, якщо контактна мережа не може приймати рекуперовану енергію, а також при відсутності електричного з'єднання з контактною мережею або в моменти перебування потягу в зоні нейтральної вставки.

Гальмівні резистори також використовуються в системі захисту від перенапруги.

Резистор складається з збірок ніхромових стрічок, які з'єднані в серію точковим зварюванням. Стрічки встановлені на ізолюючих напрямних з керамічними ізоляторами.

Тяговий інвертор. У машинному відділенні головного вагона розташовані інвертори для живлення тягових електродвигунів. Вони розташовані в металевих шафах і об'єднані в дві групи – для живлення 1-го і 2-го двигунів передньої візка, і 3-го і 4-го двигунів заднього візка.

Функціонально інвертор складається з керованого випрямляча AFE і безпосереднього інвертора FT = / ~ 3 фази струму зі змінною напругою і частотою. Інвертор включає в себе пристрій для забезпечення реостатного гальмування, електронний блок управління і діагностики, а також вимірювальні датчики.

Інвертор має розділені входи: при живленні від контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ і при живленні від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ.

Особливістю пристрою інвертора є наявність схеми «м'якого» пуску, коли на деякий час, необхідний для внутрішньої діагностики і зарядки ємностей, вхідна напруга спочатку подається через контактор і обмежувальний резистор. Якщо при діагностуванні всі параметри, що перевіряються, знаходяться в нормі, замикається лінійний контактор і на інвертор подається вся вхідна напруга.

На вході інвертора встановлений керований випрямляч АФЕ, який випрямляє змінний струм, що отримується з вторинної тягової обмотки тягового трансформатора.

При рекуперативному гальмуванні керований випрямляч працює як перетворювач $= / \sim$ під управлінням блоку управління і діагностики. Напруга подається на вторинну обмотку тягового трансформатора, трансформується в первинну обмотку і через комутаційну високовольтну дахову апаратуру та струмоприймач повертається в контактну мережу.

При розробці захисту тягового інвертора реалізована концепція, яка полягає не тільки в контролі температури компонентів, але і у відстеженні робочих режимів, що не допускають виникнення перенапруги і струмових перенавантажень.

Допоміжне електрообладнання. Допоміжне електрообладнання забезпечує роботу тягового електрообладнання відповідно до їх заданих характеристик; живлення ланцюгів управління, живлення систем життєзабезпечення і сервісу; облік спожитої електроенергії.

Для забезпечення електроенергією нетягового електрообладнання в електропоїзді ЕКр1 використовуються статичні перетворювачі і трансформатори власних потреб.

Функціональна схема забезпечення електроенергією нетягових користувачів представлена на рис. 1.9.

На кожному головному вагоні є перетворювач PSM-350. Перетворювач призначений для генерації напруги 3×380 В, 50 Гц, необхідної для живлення споживачів з підвагонної та міжвагонних магістралей, а також для споживачів в головних вагонах.

Перетворювач забезпечує високу стабільність вихідних параметрів. Використані в пристрої напівпровідникові елементи за своїми параметрами забезпечують працездатність перетворювача при перевантаженнях. Пристрій повністю не обслуговується – система управління контролює параметри вихідної напруги і захищає перетворювач в разі тривалого перевантаження або короткого замикання в вихідних ланцюгах.

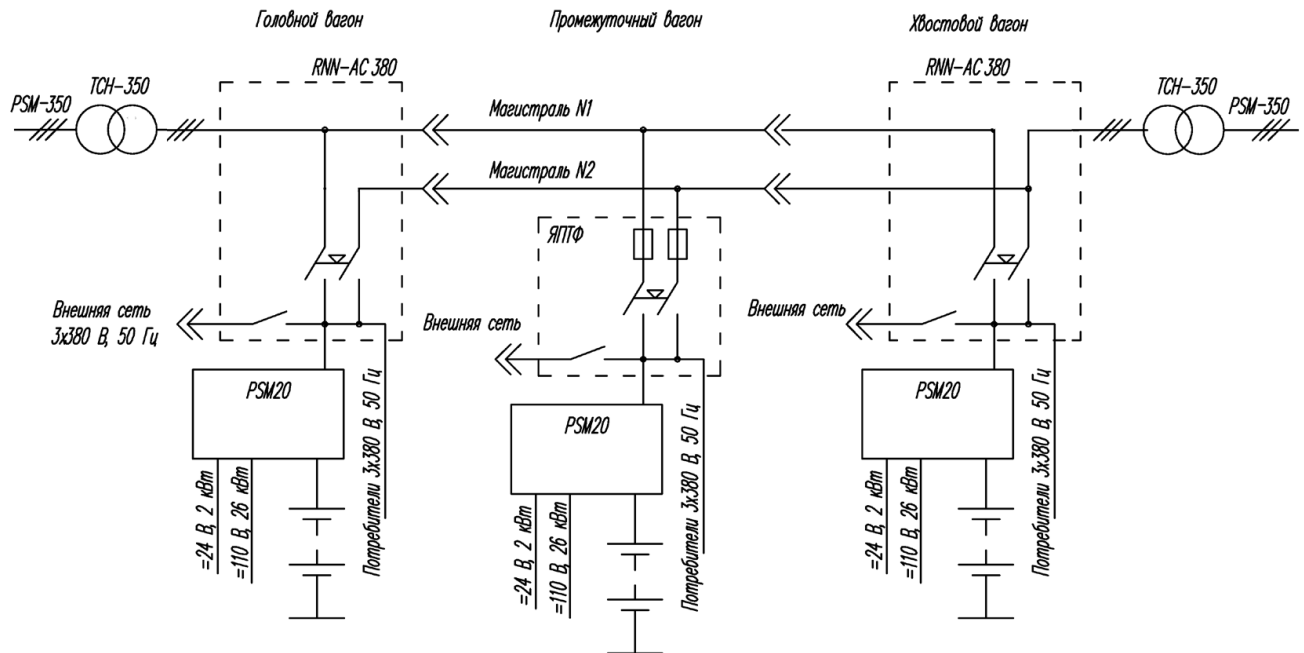


Рисунок 1.9 – Функціональна схема забезпечення електроенергією нетягових користувачів

Електрична міжвагонна магістраль подвійна і виконана таким чином, що від перетворювача, розташованого на першому головному вагоні, отримує живлення одна гілка магістралі 1, а від перетворювача, встановленого на другому головному вагоні, друга гілка 2 (див. рис. 1.9).

На кожному вагоні є захисно-комутаційна апаратура, яка виключає можливість одночасної роботи контакторів зовнішньої мережі, магістралі 1 і магістралі 2.

Нормальним є режим, коли до однієї магістралі підключено п'ять вагонів, а до іншої – чотири вагони.

У разі виходу з ладу одного з перетворювачів PSM-350, є можливість підключити всі вагони до однієї робочої магістралі (на випробуваннях даний режим був реалізований, при цьому електрообладнання всіх дев'яти вагонів було в працездатному стані).

Для перетворення напруги мережі 3 фази 380 В змінного струму с частотою 50 Гц в напруги 110 В і 24 В постійного струму призначений перетворювач напруги PSM-20, встановлений на кожному вагоні поїзда. Перетворювач також використовується для заряду акумуляторних батарей.

Трифазну напругу 380 В, 50 Гц від однієї з подвагонних магістралей або від промислової мережі на стоянці, через комутаційний пристрій подається на вхід перетворювача PSM-20. Функціонально перетворювач PSM-20 складається з двох перетворювачів AC / DC та DC / DC.

Вихідна напруга перетворювача 110 В надходить через розподільний пристрій до споживачів вагона, а також забезпечує зарядку акумуляторних батарей.

Від батареї вагона через вхідні фільтри живиться перетворювач – DC / DC. Він має гальванічну розв'язку між входом і виходом і живить ланцюг 24 В.

Тяговий трансформатор. Під кузовом головного вагона встановлений тяговий трансформатор типу ОНДЦЕР-3000/25-У1 виробництва ПАТ «Укрелектроапарат», Україна. Не дивлячись на високу встановлену потужність трансформатора (3000 кВА), його втрати відносно невеликі. У зв'язку з цим ККД трансформатора високий і становить 96%.

Трансформатор має чотири вторинні тягові обмотки (ТО1 - ТО4) і одну вторинну допоміжну обмотку ВО. Трансформатор забезпечує зниження високо-

напруга контактної мережі до розрахункового напруги (2083 В), яка використовується тяговими інверторами для отримання необхідного трифазної напруги із змінною частотою для живлення тягових електродвигунів, а також перетворювачем для отримання напруги 3×380 В, 50 Гц для власних потреб електропоїзди.

Високовольтне електрообладнання. Високовольтне електрообладнання розраховане на номінальну напругу 3 кВ постійного струму і 25 кВ частотою 50 Гц змінного струму. Головний вагон оснащений двома струмоприймачами, з'єднаними між собою даховим кабелем. Даховий кабель має відгалуження до вакуумного і швидкодіючого вимикачів, що захищають відповідні електричні ланцюги в аварійних ситуаціях.

На кожному головному вагоні електропоїзда встановлені універсальні однаважельні струмоприймачі типу DSA 250.32 фірми «STEMMANN-TECHNIK GmbH», Німеччина. Струмоприймачі призначені для експлуатації зі швидкістю до 200 км/год на електрифікованих ділянках напругою в мережі 3 кВ постійного струму і 25 кВ частотою 50 Гц. Струмоприймачі можуть працювати при русі в обох напрямках, тобто коліном вперед або назад, у всьому діапазоні швидкості. Це властивість забезпечує високу експлуатаційну готовність електропотягу.

Тягова передача. Блок тягової передачі складається з трифазного асинхронного тягового двигуна TMF 59-39-4 виробництва австрійської фірми «TSA», муфти клинового типу з двома ступенями зчеплення для передачі крутного моменту на приводну вісь і редуктора «SZH-595» виробництва німецької фірми «VOITH».

Кожен моторний вагон оснащений чотирма такими тяговими блоками. Кожна колісна пара вагона має свій тяговий двигун. Встановлена потужність одного тягового електродвигуна дорівнює 500 кВт.

Для охолодження тягових двигунів переднього візка використовуються відцентрові вентилятори, які встановлені в машинному відділенні. Для

забезпечення охолодження двигунів заднього візка використовуються подібні вентилятори, які встановлені на даху головного вагона в задній частині.

Залежно від теплового режиму роботи тягових електродвигунів автоматично змінюється інтенсивність подачі охолоджуючого повітря на тягові електродвигуни, що не допускає перегрів їх обмоток. Живлення двигунів вентиляторів кожного візка здійснюється через перетворювачі «OMRON», потужністю 7,5 кВт виробництва «Hitachi Industrial Equipment Systems», Японія. Управління перетворювачами відбувається в залежності від температурних показників датчиків тягових електродвигунів.

1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації

Тяговий електричний привод та системи автоматизації, як і рухомий склад в цілому, експлуатується на лінії практично цілий рік до 20 годин на добу при будь-якій погоді. Оскільки більша частина елементів приводу та систем автоматичного керування контактує з навколишнім середовищем і не може бути захищена від її негативних впливів, вони працюють у вкрай важких умовах, які створюються різноманітними факторами як природного, так і техногенного характеру. До основних з них необхідно віднести наступні:

1. Нерівність дороги, стики рейок, а також коливання і вібрації механічної частини рухомого складу, внаслідок чого тяговий електричний привод та апаратура працює при частих ударних впливах і трясці;

2. Неминуче проникнення в електричні елементи та привод під час руху електрорухомого складу забрудненого і вологого повітря, а іноді бруду, води, снігу;

3. Робота рухомого складу з різним навантаженням, яка визначається його наповненням, до того ж на мінливому профілі колії в умовах зміни вологості і температури повітря, що охолоджує електричну частину приводу і призводить до

розширення діапазону зміни температури обмоток і інших струмоведучих частин його електроустаткування;

4. Висока номінальна напруга джерел електричної енергії, що використовуються, наприклад, на міському електротранспорті, в порівнянні з застосуванням в промислових установках. Діапазон його зміни досягає іноді 50% від максимального значення;

5. Найбільш важкий повторно-короткочасний режим роботи тягового електрообладнання (зокрема електродвигунів) – з частими пусками і гальмуваннями, а іноді і реверсом;

6. Дуже обмежений простір для розміщення та монтажу елементів тягового електроприводу на рухомому складі;

7. Відмова в роботі механічного або електричного обладнання приводу на лінії, особливо на рейковому транспорті, призводить до порушення графіка руху всього транспорту на цій ділянці.

Перераховані умови викликають необхідність формувати досить жорсткі вимоги до приводів та електричної апаратури рухомого складу і часто впливають на реалізацію їх конструктивного виконання.

Основні вимоги, що пред'являються до тягового електроприводу, можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Для елементів електричної і механічної частин тягового електричного приводу необхідна підвищена механічна і електрична міцність деталей і вузлів і висока надійність їх кріплень. Для зменшення ударних впливів, що передаються від шляховий структури на елементи приводу, необхідно по можливості забезпечувати їх повне підресорювання;

2. Струмopовідні деталі електроустаткування приводу та електрообладнання повинні мати вологостійку ізоляцію, а всі металеві деталі - бути надійно захищені антикорозійними покриттями;

3. Комутаційна надійність тягових електродвигунів та його автоматики повинна бути такою, щоб забезпечувалася їх робота в умовах перехідних процесів, пов'язаних з частими і різкими змінами напруги в контактній мережі;

4. Устаткування тягового приводу має надійно працювати при температурі навколишнього середовища від -50 до $+40$ ° С і висоті над рівнем моря до 1200 м;

5. Оскільки простір для розміщення та монтажу елементів тягового приводу на рухомому складі дуже обмежено, він повинен мати по можливості малі габарити і вагу;

6. До всіх елементів приводу та електричного обладнання повинен бути забезпечений хороший доступ для огляду і ремонту. Їх конструктивне виконання повинно дозволяти швидко замінювати несправні вузли і деталі на справні.

Висновок до розділу 1

Проведено аналітичний огляд в області тягових електроприводів та розглянуто тенденцію їх розвитку. Розглянуті основні представники різних класів електровозів та їх системи приводу. Це довзволило обрати прототип для досліджень, а саме тяговий електропривод змінного струму та електровоз з такою системою приводу, а також сформулювати вимоги до системи автоматичного керування.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Розрахунок тягових зусиль електроприводу

Другий закон Ньютона описує основний принцип поступального руху транспортного засобу, пов'язуючи значення прискорення та сил, що діють на систему[1]:

$$ma = F_t - F_w - F_g - F_r, \quad (2.1)$$

де m – маса транспортного засобу; a – величина прискорення; F_t – загальне тягове зусилля; F_w – аеродинамічний опір; F_g – проекція сили тяжіння на вісь руху транспортного засобу; F_r – сила тертя кочення.

Коли транспортний засіб рухається, повітря створює нормальний тиск та навантаження зсуву. Таким чином, зовнішній опір складається з двох компонентів: скривлення форми та тертя поверхні. Скривлення форми виникає внаслідок того, що при русі транспортного засобу в повітрі перед транспортним засобом є зона високого тиску, а за нею - зона низького тиску.

Ці області високого та низького тиску створюють опір для руху транспортного засобу. Тертя поверхні спричинене опором зсуву у зовнішньому шарі кузова ТЗ.

Як правило, кривизна форми значно більша за поверхневе тертя і становить 85-95% від загального аеродинамічного опору ТЗ. Отже, аеродинамічний опір залежить від ефективної площі фронтальної поверхні, швидкості руху та зустрічного вітру. При дослідженнях динаміку аеродинамічного опору транспортного засобу розраховують наступним чином:

$$F_w = \frac{1}{2} k_w \rho S (v + v_w)^2, \quad (2.2)$$

де k_w – коефіцієнт аеродинамічного опору; ρ – густина повітря; S – площа лобової поверхні; v – швидкість руху транспортного засобу; v_m – швидкість зустрічного вітру.

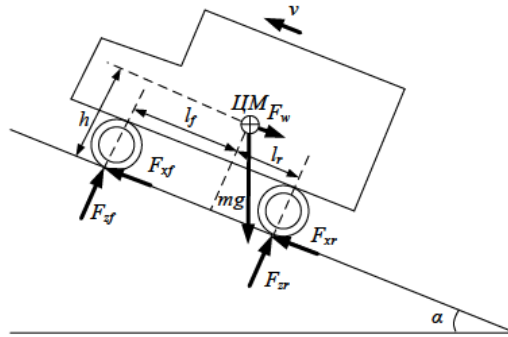


Рисунок 2.1 – Сили, що діють на транспортний засіб під час руху

Коли транспортний засіб рухається вгору або вниз, сила тяжіння, яка завжди діє вертикально вниз, має проекцію, яку необхідно враховувати при розрахунку загальної тягової сили транспортного засобу.

Ця проекція створює ефект гальмування під час руху вгору на пагорб та рушійну дію при русі вниз. Оскільки, як правило, розрахунки проводяться для того, щоб знайти максимальне значення необхідної тягової сили, розрахунки проводяться для умов руху в гору. Тоді проекцію сили тяжіння на вісь тяги можна розрахувати наступним чином:

$$F_g = mg \sin \alpha, \quad (2.3)$$

де m – маса транспортного засобу; g – прискорення вільного падіння; α – кут нахилу дороги.

Ця сила залежить від сили реакції опори F_z та коефіцієнта тертя кочення μ :

$$F_r = \mu F_z \cos \alpha. \quad (2.4)$$

Розрахункові формули для визначення основного питомого опору руху рухомого складу в (Н/т) враховують середні експлуатаційні умови при температурі зовнішнього повітря в діапазоні від -10 до +20 ° С і швидкостях вітру, що не перевищують 5 м/с. Основний питомий опір руху локомотивів в залежності від швидкості визначається за формулами [2]:

В режимі тяги:

$$\begin{aligned} w'_0 &= 9.81(a'_0 + b'_0 \cdot V + c'_0 \cdot V^2) = \\ &= 9.81(48 + 1.3 \cdot 20 + 0.0625 \cdot 20^2) = 971, \text{Н/Т}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

в режимі холостого ходу:

$$\begin{aligned} w'_0 &= 9.81(a'_x + b'_x \cdot V + c'_x \cdot V^2) = \\ &= 9.81(50.4 + 0.414 \cdot 20 + 0.0135 \cdot 20^2) = 629, \text{Н/Т}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $a_0 = 48$, $b_0 = 1.3$, $c_0 = 0.0625$, $a_x = 50.4$, $b_x = 0.414$, $c_x = 0.0135$ - розрахункові коефіцієнти, які взяті для промислових електровозів та тягових агрегатів з двигунами змінного струму, які рухаються по колії шириною 1520 мм, швидкість руху $V=72 \text{ км/год} = 20 \text{ м/с}$.

Основний питомий опір руху вагонів загального призначення колії 1520 мм при масі брутто, що припадає на одну вісь (всього 4), $q_0 > 6 \text{ т}$ (на роликових підшипниках) в залежності від швидкості визначається за формулою:

$$\begin{aligned} w''_0 &= 9.81 \left(0.7 + \frac{a''_0 + b''_0 \cdot V + c''_0 \cdot V^2}{q_0} \right) = \\ &= 9.81 \left(0.7 + \frac{45 + 1.5 \cdot 20 + 0.0375 \cdot 20^2}{6} \right) = 154, \text{Н/Т}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $a_0 = 45$, $b_0 = 1.5$, $c_0 = 0.0375$, швидкість руху $V=72 \text{ км/год} = 20 \text{ м/с}$.

2.2 Обґрунтування вибору потужності електродвигуна

В якості прототипу для досліджень будемо використовувати електровоз ЕКр-1, який оснащений двигунами змінного струму в кількості 8 штук.

Для розрахунків будемо використовувати наступні вихідні дані, занесені таблицю 2.1 [4].

Таблиця 2.1 - Розрахункові данні

Маса електровоза Р, т	200
Маса рухомого складу $Q \cdot 10^3$, т	12
Конструкційна швидкість електровозу V_k , км/год	160
Розрахунковий підйом i_p , %	14

Спочатку визначимо розрахункову швидкість V_p , км/год на розрахунковому підйомі, використовуючи співвідношення $V_p = 0,45 \cdot V_k$, де V_k - конструкційна швидкість електровоза.

Отримаємо:

$$V_p = 0.45 \cdot 160 = 72, \text{ км / год} = 20, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.8)$$

Потім необхідно визначити розрахункову силу тяги $F_{\text{сп}}$, яку має розвивати електровоз, долаючи, крім крутизни підйому, основний опір W_0 , Н:

$$W_0 = \frac{P \cdot W_0' + Q \cdot W_0''}{P + Q} = \frac{200 \cdot 971 + 12 \cdot 154}{200 + 12} = 925, \frac{\text{Н}}{\text{кН}}. \quad (2.9)$$

$$F_{\text{сп}} = (P + Q) \cdot (W_0 + i_p) \cdot 10^{-3} = (200 + 12) \cdot (925 + 14) \cdot 10^{-3} = 199, \text{ кН}. \quad (2.10)$$

По знайденому значенню сили тяги визначимо потужність $P_{\text{ЕР}}$ кВт:

$$P_{\text{сп}} = F_{\text{сп}} \cdot V_p = 199 \cdot 20 = 3980, \text{ кВт}. \quad (2.11)$$

Номінальну потужність одного тягового двигуна розраховуємо за виразом:

$$P_{\text{ч}} = \frac{P_{\text{сп}}}{K_{\text{пе}} \cdot m} = \frac{3980}{1.4 \cdot 8} = 355, \text{ кВт}. \quad (2.12)$$

де m – число двигунів електровоза (в даному випадку 8 шт); $K_{\text{ПЕ}} = (1.35 \dots 1.4)$ – коефіцієнт експлуатаційної перевантаження ТЕД

Асинхронний двигун потрібно вибрати на більшу ніж розрахована потужність, щоб двигун міг витримувати перевантаження. В даному випадку вибираємо двигун з синхронною швидкістю 1500 об/хв модель 4АНК355М4У3 з наступними паспортними даними та, що занесені в таблицю 2.2, кількість таких двигунів – 8 штук.

Таблиця 2.2 – Номінальні данні двигуна 4АНК355М4У3[5]

Номінальна потужність	400 кВт
Номінальна лінійна напруга статора	380 В
Число пар полюсів	$p = 2$
Момент інерції	$J = 7 \text{ кг/м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.94$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.9$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Номінальне ковзання	$S_n = 0.02$
Критичне ковзання	$S_k = 0.077$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(\text{Гц})$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$x_1' = 0.12$
Активний опір статора	$R_1' = 0.019$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$x_2'' = 0.14$
Приведений активний опір ротора	$R_2'' = 0.020$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$x_\mu = 4.8$

Висновок до розділу 2

Проведений розрахунок тягових зусиль, який включав динамічні і статичні пртидіючі руху потягу зусилля, включаючи аеродинамічний опір, проекцію сили тяжіння на вісь руху транспортного засобу, силу тертя кочення, дозволив обрати для подальших досліджень приводу тягові електродвигуни серії 4АНК355М4УЗ.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Кутова частота напруга статора:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 = 314.159, \text{ рад / с.} \quad (3.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_0}{p} = \frac{314.159}{2} = 157, \text{ рад / с.} \quad (3.2)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} \cdot (1 - S_n) = 157 \cdot (1 - 0.02) = 154, \text{ рад / с.} \quad (3.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{400000}{154} = 2600, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (3.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2 \cdot 2600 = 5200, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (3.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{IH}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220, \text{ В,} \quad (3.6)$$

$$I_n = \frac{P_n}{3U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{400000}{3 \cdot 220 \cdot 0.94 \cdot 0.9} = 716, \text{ А.} \quad (3.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310.268, \text{ В,} \quad (3.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 716 = 1012, \text{ А.} \quad (3.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{n0}} = \frac{310.268}{314.159} = 0.98, \text{ Вб.} \quad (3.10)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 3.1, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 3.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

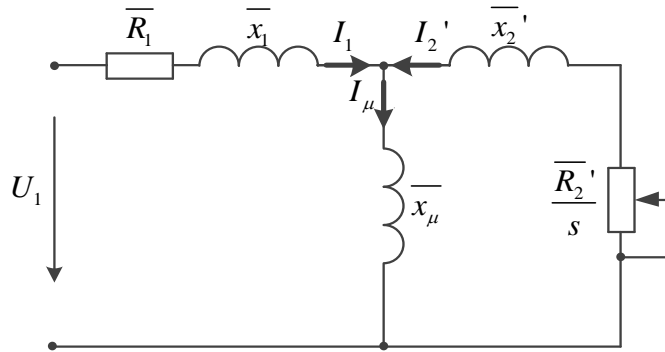


Рисунок 3.1 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

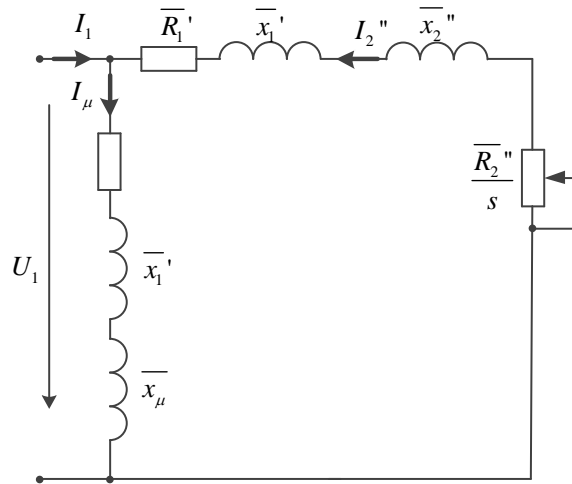


Рисунок 3.2 - Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{4.8 + \sqrt{(4.8)^2 + (4 \cdot 0.12 \cdot 4.8)}}{2 \cdot 4.8} = 1.02. \quad (3.11)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_1}{c_1} = \frac{0.12}{1.02} = 0.117, \quad (3.12)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{\bar{x}_2}{c^2} = \frac{0.14}{1.02^2} = 0.134, \quad (3.13)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1}{c_1} = \frac{0.019}{1.02} = 0.0186, \quad (3.14)$$

$$\bar{R}_2 = \frac{\bar{R}_2}{c^2} = \frac{0.020}{1.02^2} = 0.0192. \quad (3.15)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.117 \cdot \frac{220}{716} = 0.0359, \text{ Ом}, \quad (3.16)$$

$$x_2 = \bar{x}_2 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.13 \cdot \frac{220}{716} = 0.041, \text{ Ом}, \quad (3.17)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.0186 \cdot \frac{220}{716} = 0.0057, \text{ Ом}, \quad (3.18)$$

$$R_2 = \bar{R}_2 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.0192 \cdot \frac{220}{716} = 0.0058, \text{ Ом}, \quad (3.19)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 4.8 \cdot \frac{220}{716} = 1.47, \text{ Ом}. \quad (3.20)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.0359}{314.157} = 0.000114, \text{ Гн}, \quad (3.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_0} = \frac{0.041}{314.159} = 0.00013, \text{ Гн}. \quad (3.22)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{1.47}{314.157} = 0.0047, \text{ Гн}. \quad (3.23)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0047 + 0.000114 = 0.004814, \text{Гн}, \quad (3.24)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0047 + 0.00013 = 0.00483, \text{Гн}. \quad (3.25)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів a , a_1 , β , γ , σ , μ_1 :

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0058}{0.00483} = 1.2, \text{Ом}/\text{Гн}, \quad (3.26)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0057}{0.004814} = 1.18, \text{Ом}/\text{Гн}, \quad (3.27)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.004814 \cdot \left(1 - \frac{0.0047^2}{0.004814 \cdot 0.00483} \right) = 0.00024, \text{Гн}, \quad (3.28)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0047}{0.00483 \cdot 0.00024} = 4054, 1/\text{Гн}, \quad (3.29)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0057}{0.00024} + (1.2 \cdot 0.0047 \cdot 4054) = 46.61, \text{Ом}/\text{Гн}, \quad (3.30)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0047}{0.00483} = 1.46. \quad (3.31)$$

Таблиця 3.1 - Параметри двигуна 4АНК355М4УЗ [7]

P_n , кВт	400	R_1 , Ом	0.0057
ω_{xx} , рад/с	314.159	R_2 , Ом	0.0058
ω_n , рад/с	154	L_1 , Гн	0.004814
M_n , Н · м	2600	L_2 , Гн	0.00483
M_k , Н · м	5200	L_m , Гн	0.0047
λ	2	α , Ом/Гн	1.2
I_n , А	716	α_1 , Ом/Гн	1.18
ψ_{xx} , Вб	0.98	σ , Гн	0.00024
η	0.94	β , 1/Гн	4054
$\cos\varphi$	0.9	γ , Ом/Гн	46.61
J_d , кг · м ²	7	μ_1	1.46

Висновок до розділу 3

Для обраного електроприводу був проведений розрахунок параметрів електродвигуна та його схем заміщення, які потрібні для моделювання системи електроприводу в статичних і динамічних режимах роботи, що дозволить проаналізувати його роботу в реальних умовах.

4 ВИБІР СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ. РОЗРОБКА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

4.1 Розрахунок випрямляча[7]

Для правильного вибору діодів випрямляча необхідно розрахувати величину діючого струму, який протікає через діод, з урахуванням коефіцієнтів запасу. Розрахуємо номінального значення випрямленого струму:

$$I_{dc} = \frac{k_{ov} \cdot P_n}{U_{dc} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1.4 \cdot 400000}{540 \cdot 0.94 \cdot 0.98} = 1225.8, A; \quad (4.1)$$

$$U_{dc} = \sqrt{2} \cdot 380 = 540, V. \quad (4.2)$$

де – ($U_{grid} = 380$ В) номінальне значення випрямленої напруги; P_n – номінальна потужність перетворювача; η_{inv} – коефіцієнт корисної дії перетворювача, (0,95 ÷ 0,98) – коефіцієнт корисної дії перетворювача.

При виборі, як силових діодів так і IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима зворотна напруга (напруга колектор-емітер) має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто $U_{cc} > 1.5 \cdot U_{dcmax}$.

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням $U_{grid} = 380$ В, і 375 В для перетворювачів з однофазним живленням $U_{grid} = 220$ В.

Отже:

$$U_{cc} = 1.5 \cdot 750 = 1125, V. \quad (4.3)$$

Силові діоди та IGBT транзистори, які випускаються сучасною промисловістю, мають стандартний ряд максимальних напруг колектор-емітер:

250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В Вибір силових діодів може бути здійснений на сайтах виробників за критерієм:

$$I_{VD} > I_{\max}, U_{VD\max} > U_{cc}; \quad (4.4)$$

$$I_{VD} > 1225.8, A, U_{VD\max} > 1125, V. \quad (4.5)$$

де – I_{VD} та $U_{VD\max}$ – тривалий струм діода та зворотна напруга.

Згідно вище розрахованих параметрів обрано 3 модульних мостових випрямлячі, які будуть розташовані послідовно **SEMIX501D17FS SEMIKRON** [8]: напруга – 800 – 1600 В; струм – 494 А.

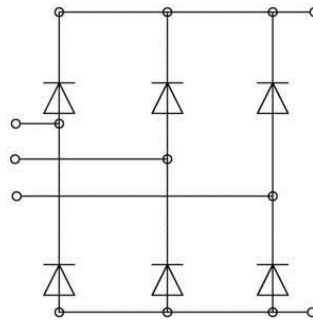


Рисунок 4.1 – Схема електрична принципова діодного випрямляча

4.2 Розрахунок та вибір автономного інвертора напруги

Дослідивши доступні нам зразки вибираємо інвертор фірми **ABB ACS580-07-715A-4 R11**[9] з наступними характеристиками, що занесені в таблицю 3.1, цей перетворювач виконаний у вигляді шафи, що підходить для електровоза.

Таблиця 4.1 - Номінальні данні ABB ACS580-07-715A-4 R11

3-фази $U_n=380, 400, 415, V, \cos\varphi=0.98$						
Номінальні значення		Макс. вихідний струм	Невелике навантаженням		Важкий режим	
$P_n, кВт$	$I_n, А$	$I_{\max}, А$	$P_{Ld}, кВт$	I_{Ld}	$P_{Hd}, кВт$	$I_{Hd}, А$
400	715	1020	400	715	315	566

Середній струм на вході автономного інвертора напруги в номінальному режимі[]:

$$I_{\text{дном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{1\phi} \cos \varphi_n = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 1012 \cdot 0.98 = 1340, \text{A.} \quad (4.6)$$

За базовий алгоритм управління ключами автономного інвертора приймаємо комутацію з тривалістю відкритого стану 180 ел.град. Такий алгоритм рекомендується при формуванні напруги на клеммах асинхронних двигунів, оскільки виключає спектр гармонік, кратних трьом.

Середнє значення напруги на вході інвертора:

$$U_{\text{дном}} = \frac{3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_n}{I_{\text{дном}}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 1012 \cdot 0.98}{1340} = 489, \text{В.} \quad (4.7)$$

Прийнявши перевантажувальну здатність для приводу електровоза $k_{ov1} = 1.4$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача:

$$I_{\text{max}} = k_{ov1} \cdot I_{\text{на}} = 1.4 \cdot 1012 = 1417, \text{A.} \quad (4.8)$$

Після цього можна вибрати IGBT за такими критеріями:

$$I_c > I_{\text{max}}, U_{\text{ccmax}} > U_{\text{cc}}; \quad (4.9)$$

$$I_c > 1417, \text{A}, U_{\text{ccmax}} > 1125, \text{В.} \quad (4.10)$$

де I_c та U_{ccmax} – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

За даних умов обрано IGBT модуль **SKiP1513GB172-3DW V3** [10]: напруга –1200 В; струм – 1500 А;

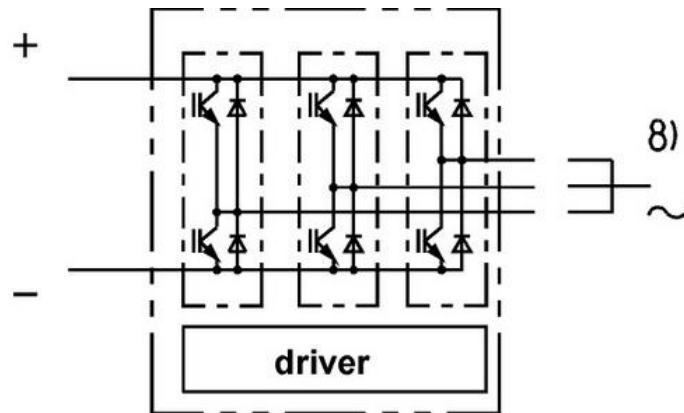


Рисунок 4.2 – Схема електрична принципова IGBT модуля SKiiP1513GB172-3DW V3

4.3 Вибір тягового трансформатора

Даний тип трансформаторів призначений для перетворення напруги контактної мережі напруги контактної мережі в напругу, яка потрібна для тягових електродвигунів. Для даного двигуна обираємо трансформатор типу **ОНДЦЕР-3000/25-У1** [11] з наступними параметрами (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 - Номінальні данні трансформатора ОНДЦЕР-3000/25-У1

Параметри трансформатора		
Частота мережі живлення, Гц		50
Схема і група з'єднань обмоток		1/1-1-1-1-1-0-0-0-0-0
Номінальна потужність мережевої обмотки, кВ·А		3000
Номінальна напруга мережевої обмотки, кВ		25
Номінальний струм мережевої обмотки, А		120
Номінальна потужність тягових обмоток, кВ·А		4x600
Номінальна напруга тягових обмоток на вводах, В	а ₁ -X ₁ ; а ₂ -X ₂ ; а ₃ -X ₃ ; а ₄ -X ₄	2083
Номінальний струм тягових обмоток, А		288

Продовження таблиці 4.2.

Номінальна потужність допоміжної обмотки, кВ·А		600
Номінальна напруга допоміжної обмотки на вводах, В	a ₅ -x ₅	2083
Номінальний струм допоміжної обмотки, А		288
Сумарні втрати трансформатора, кВт		75
ККД, %		95
Маса трансформатора в спорядженому стані, кг		6380

4.4 Розрахунок та вибір гальмівних резисторів[12]

Для розрахунку потрібно знати наступні параметри:

Потужність двигуна та ПЧ: 400, кВт;

Номінальна швидкість двигуна: 1500, об/хв;

Номінальний момент: 2650, Н·м;

Номінальна напруга: 380, В;

Гальмівний момент: 125% від номінального;

Час циклу: 60, с;

Момент інерції: 155, кг·м²;

Необхідний час гальмування і значення гальмівного циклу для забезпечення заданого моменту гальмування:

$$t_B = \frac{2\pi \cdot J \cdot n}{60 \cdot M_n} = \frac{2\pi \cdot 155 \cdot 1500}{60 \cdot 2650} = 9.2, \text{с}, \quad (4.11)$$

$$ED = \frac{t_B}{T} = \frac{9.2}{60} = 15, \%, \quad (4.12)$$

$$P_{B_{\max}} = \frac{M_{B_{\max}} \cdot (n_1 - n_2)}{9.55} = \frac{1.25 \cdot 2650 \cdot 1450}{9.55} = 502, \text{кВт}, \quad (4.13)$$

$$P_{\text{el}} = P_{B_{\max}} - k \cdot P_n = 502 - 0.05 \cdot 400 = 482, \text{кВт}, \quad (4.14)$$

де k – коефіцієнт для двигуна потужність більше ніж 45, кВт.

$$P_{\text{elAve}} = \frac{P_{\text{el}}}{f_k} = \frac{482}{5} = 96.4, \text{кВт}, \quad (4.15)$$

F_k – коефіцієнт для даного ЕД.

$$R_B \leq \frac{U_B^2}{P_{\text{el}}} = \frac{(760)^2}{482} = 12, \text{Ом}. \quad (4.16)$$

Для данного двигуна обираємо зовнішній гальмівний переривач моделі **ТП-315-400 (130 А)** [13] кількість гальмівних резисторів 8 шт (13.2 Ом) потужність (9000 Вт). Всього буде встановлено чотири модулі – два на один ведучий вагон.

Висновок по розділу 4

В даному розділу був проведений розрахунок основних елементів силової частини приводу електровозу, а також вибір силового обладнання відповідно до розрахованих значень, що дозволило розробити реальну схему електроприводів для даного електровоза.

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТА, СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1 Обґрунтування принципу керування електроприводом

Вибір системи керування в випадку тягового електропривода потрібно здійснювати за тими типами керування, які підтримує інвертор. Даний інвертор підтримує скалярне та векторне керування. Система скалярного керування частотою не здатна підтримувати стабільність системи, що є суттєвим недоліком її роботи. Отже, в подальших дослідженнях ми будемо використовувати векторні системи керування асинхронними двигунами,

Концепція векторного керування асинхронним двигуном полягає у відтворенні підходу, що використовується в управлінні двигунами постійного струму.

Для цього використовують систему координат, яка обертається синхронно з полем машини. Це дозволяє розділити вектор струму статора на проекції, які можна використовувати для окремого контролю величини крутного моменту і потокозчеплення двигуна. У обертовій системі координат електричні змінні стану двигуна матимуть характер постійних компонентів і тому система управління може бути побудована з використанням традиційних ПІ-регуляторів для забезпечення астатичних властивостей системи.

Подальший розвиток таких систем дозволив розробити безсенсорні варіанти їх реалізації, позбутися механічних датчиків на валу двигуна, що також дуже добре для роботи тягових електромеханічних систем.

Принцип векторного управління заснований на використанні поняття просторових векторів. Просторовий вектор поєднує трифазні змінні стану двигуна (струми, напруги, потокозчеплення).

При роботі в стаціонарному стані, як правило, просторові вектори мають постійну амплітуду і обертаються з постійною кутовою швидкістю. Оскільки будь-

який вектор на площині може бути описаний двома, а не трьома проекціями, використання таких векторів дозволяє перейти від трифазної (природної) системи координат abc до двофазної фіксованої системи координат $\alpha\beta 0$.

Вирішення проблеми векторного керування АД виконується з використанням двох підходів: непрямого та прямого керування. Обидва підходи використовують концепцію керування з орієнтацією по полю електричної машини. При непрякій орієнтації формується задане значення вектора потокозчеплення ротора, яке визначає динамічну поведінку системи координат з асимптотичною орієнтацією по цьому вектору. Другий підхід передбачає використання оціненої за допомогою асимптотичного спостерігача інформації про вектор потокозчеплення ротора.

Загальний алгоритм непрямого векторного керування АД являється найбільш простим, тому що не потребує використання спостерігача.

Важливу роль у здійсненні векторного управління відіграє орієнтація обертової системи координат в досліджуваній машині. В асинхронному двигуні є три вектори потоку, за допомогою яких можна орієнтувати систему координат: вектори потоку статора, ротора та вектор потоку у повітряному зазорі. Система управління вектором може бути реалізована з орієнтацією на будь-якому з цих векторів, але найчастіше в цій ролі використовується вектор потоку ротора.

Структура системи векторного керування представлена на рисунку 5.1.

Модуль вектора потокозчеплення ротора зазвичай оцінюється непрямым чином, оскільки установка додаткових датчиків всередині тягових двигунів у більшості випадків не передбачена конструкцією. Сигнали про помилки подаються на вхід регулятора швидкості (РШ) та регулятор потокозчеплення (РШ) відповідно. Система побудована за принципом підпорядкованого управління, і тому вихідні сигнали цих регуляторів є задаючими сигналами для відповідних внутрішніх схем управління активної складової струму i_{sq}^* та намагнічуючої складової струму i_{sq}^* . Обмеження сигналів i_{sq}^* і i_{sq}^* є ефективним підходом до реалізації обмеження струму у векторних системах управління. Сигнали зворотного зв'язку, які для внутрішніх зв'язків є сигналами дійсного значення активного та намагнічуючого струму, отримуються шляхом перетворення вимірних значень три фазних струмів i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} і i_{sc} в двофазній системі координат, яка обертається синхронно з полем машини.

Для коректної роботи такого перетворення необхідно використовувати інформацію про кут повороту вектора зчеплення ротора θ_r , який оцінюється разом з модулем вектора зчеплення ротора ψ_r за допомогою відповідних непрямих ідентифікаційних процедур. Вихідні сигнали регуляторів складової активного струму (PCq) і складової намагнічуючого струму (PCd) є проекціями вектора напруги U_{sd}^* , U_{sq}^* на вісь системи координат, яка обертається синхронно з полем машини. Згодом компоненти цього вектора перетворюються у трифазну стаціонарну систему відліку U_{sa}^* , U_{sb}^* та U_{sc}^* .

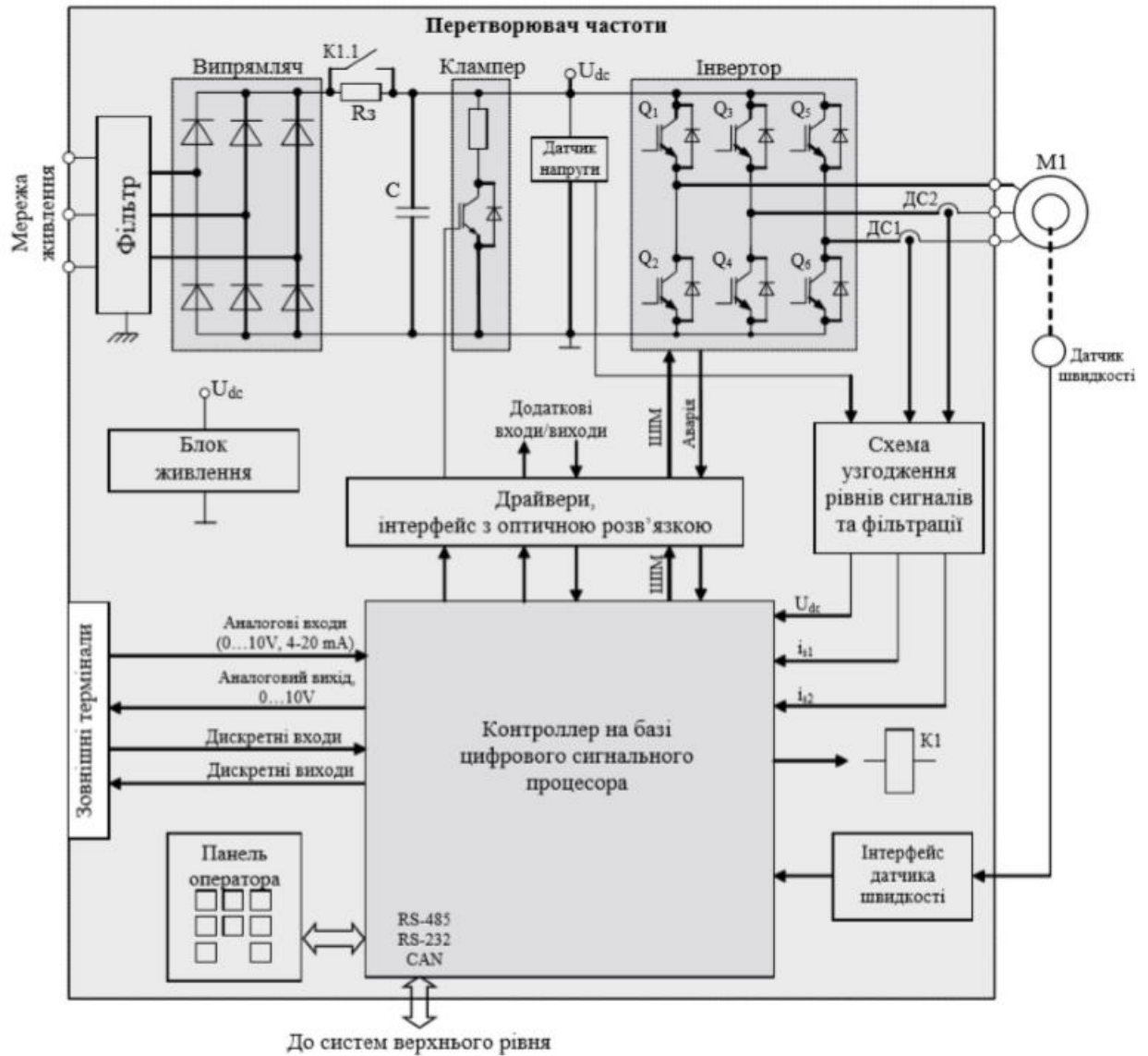


Рисунок 5.2 – Функціональна схема векторного керування електроприводу змінного струму

5.2 Модель електроприводу у двофазній системі координат:

$$\dot{\theta} = \omega, \quad (5.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \quad (5.2)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}), \quad (5.3)$$

$$\dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1d}, \quad (5.4)$$

$$\dot{i}_{1q} = -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q}, \quad (5.5)$$

$$\dot{\psi}_{2d} = -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \quad (5.6)$$

$$\dot{\psi}_{2q} = -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}, \quad (5.7)$$

$$\dot{\varepsilon} = \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0, \quad (5.8)$$

5.3 Алгоритм векторного керування

Повний алгоритм прямого векторного керування АД містить:

Спостерігач магнітного потоку:

$$\left| \dot{\hat{\psi}} \right| = -\alpha \left| \hat{\psi} \right| + \alpha L_m i_{1d}, \quad (5.9)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\left| \hat{\psi} \right|}, \quad (5.10)$$

Регулятор магнітного потоку:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi + \dot{\psi}^* - k_{\psi} \bar{\psi} - x_{\psi}), \quad (5.11)$$

$$\dot{x}_{\psi} = k_{\psi i} \bar{\psi}, \quad (5.12)$$

Регулятор струму по осі d:

$$U_{ld} = \sigma \left(\gamma \dot{i}_{ld}^* - \omega_0 \dot{i}_{lq} - \alpha \beta \left| \hat{\psi} \right| + \dot{i}_{ld}^* - k_{id} \dot{i}_d - x_d \right) \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_d, \quad (5.14)$$

$$\dot{i}_{ld}^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_{\psi} \left[-(\alpha + k_{\psi}) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d - x_{\psi} \right] - \dot{x}_{\psi} \right\} \quad (5.15)$$

Регулятор швидкості:

$$\dot{i}_{lq}^* = \frac{1}{\mu \psi} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^*), \quad (5.16)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \quad (5.17)$$

Модифікований регулятор струму по осі q:

$$u_{lq} = \sigma \left[\gamma \dot{i}_{lq}^* + \omega_0 \dot{i}_{ld} + \beta \omega p_n \left| \hat{\psi} \right| + \dot{i}_{lq}^* - k_{iq} \dot{i}_q - x_q \right], \quad (5.18)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q, \quad (5.19)$$

$$\dot{i}_{lq}^* = \frac{1}{\mu \psi} \left[-k_{\omega} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \psi \dot{i}_q^*) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right], \quad (5.20)$$

де $\Psi^*, \dot{\Psi}^*, \ddot{\Psi}^*$ - задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ - похибка відпрацювання струму по осі (d), $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму, $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ - задана кутова швидкість, перша і друга похідні

відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ - похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ - похибка відпрацювання струму по осі (q), $\tilde{\Psi} = \Psi - \Psi^*$ - похибка відпрацювання оціненого потокозчеплення, $(k_{\Psi}, k_{\Psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора потокозчеплення.

Висновок до 5 розділу

На основі обґрунтування принципу керування асинхронним тяговим електродвигуном було обрано систему непрямого векторного керування для даного електроприводу та проведений математичний опис даної системи, що дозволило в подальшому розробити математичну модель для синтезу і моделювання даного приводу.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання буде проводитись в програмному середовищі MatLab SIMULINK 2013. Оскільки в даній роботі в якості досліджуваного зразку ми використовуємо електровоз, то симуляцію роботи тягового електроприводу потрібно здійснювати в режимі пуску під навантаженням, скидання навантаження та перехід в рекуперацію. Всі ці режими імітують реальні умови роботи приводу, а саме пуск потягу на рівному місці, рух під ухил з переходом у гальмування. Структура математичних моделей представлена на рис. 6.1 – 6.3.

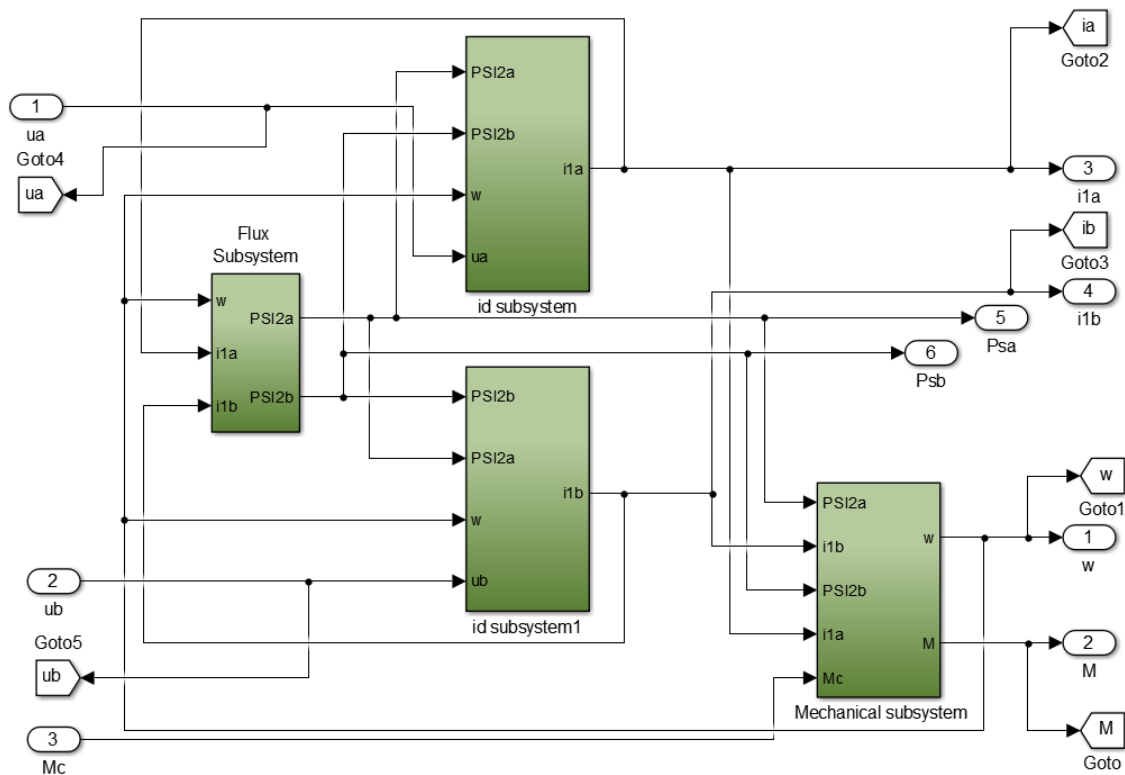


Рисунок 6.1 – Стандартна двофазна модель асинхронного двигуна в середовищі
MATLAB

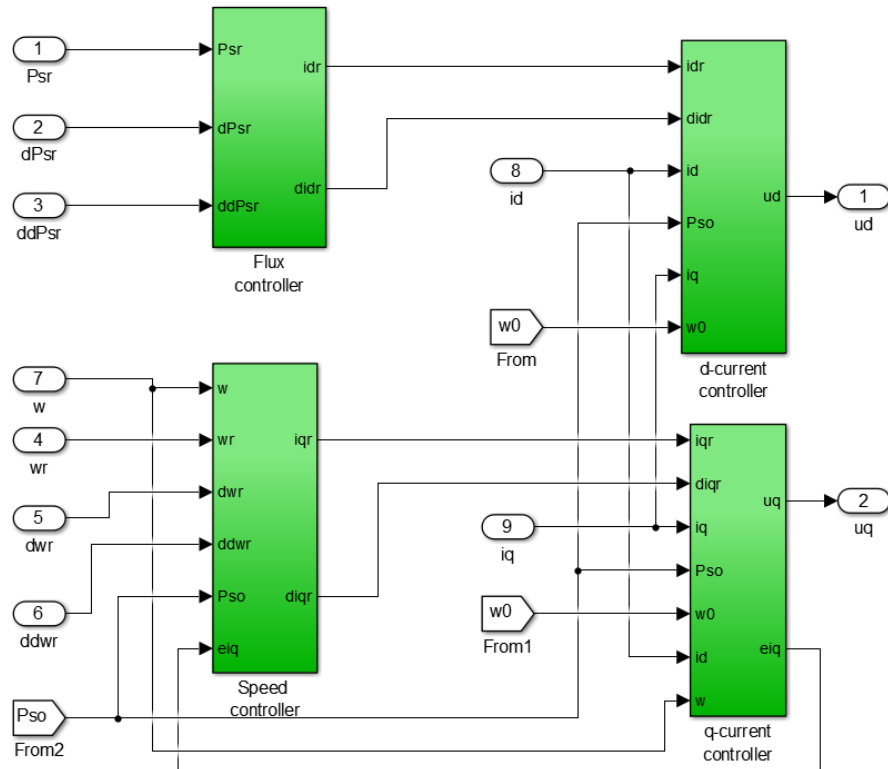


Рисунок 6.2 – Регулятор потокозчеплення, швидкості та струму по осі d, q, в середовищі MATLAB

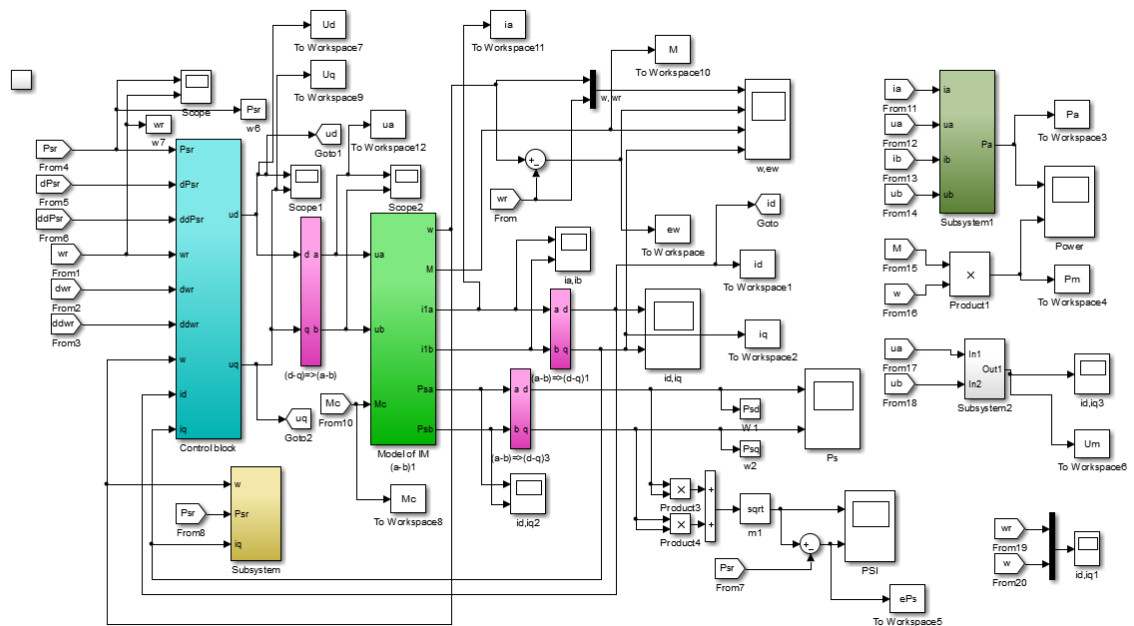


Рисунок 6.3 – Загальний вигляд моделі векторного керування в середовищі MATLAB

Результати моделювання представлені на рисунках 6.4 – 6.9.

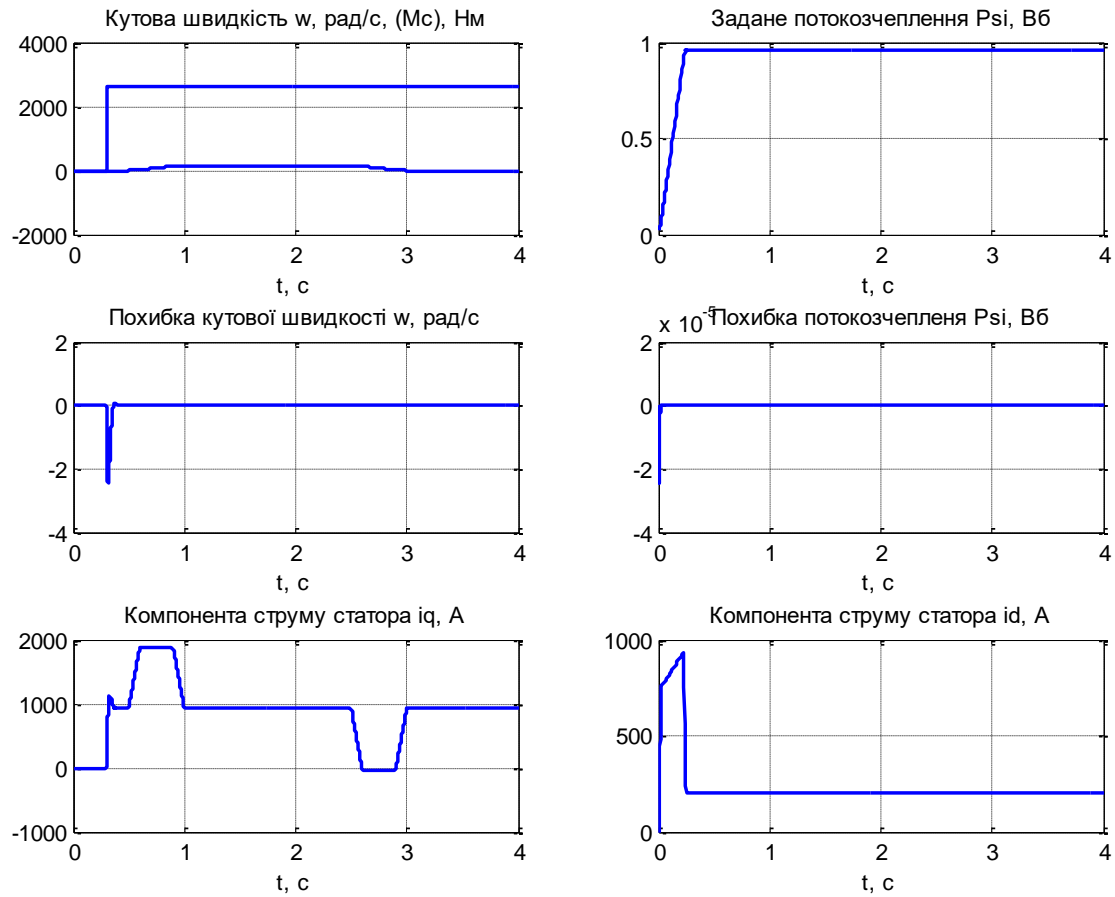


Рисунок 6.4 – Робота тягового електропривода при пуску під навантаженням

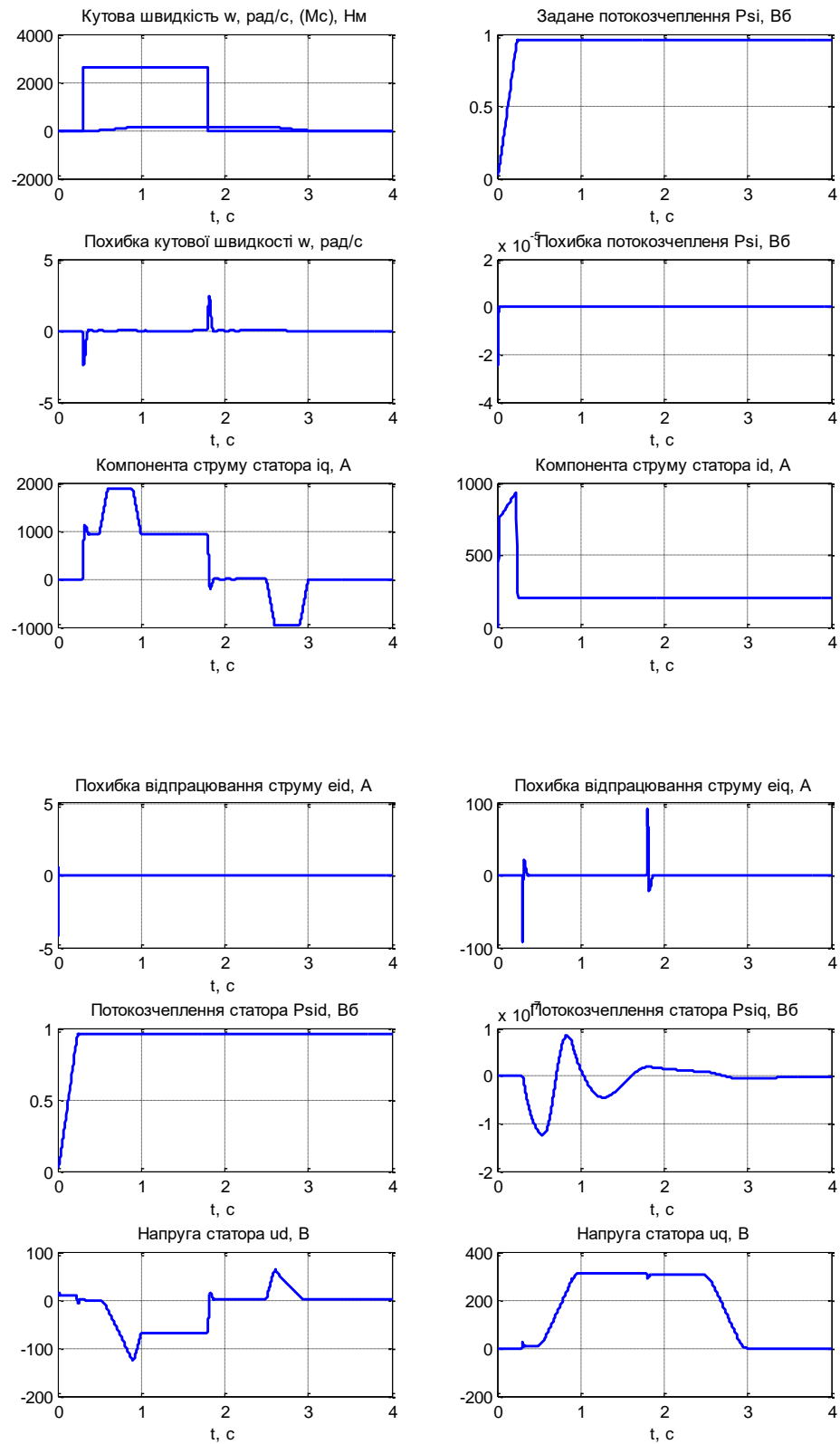


Рисунок 6.6 – Робота тягового електропривода при скиданні навантаження

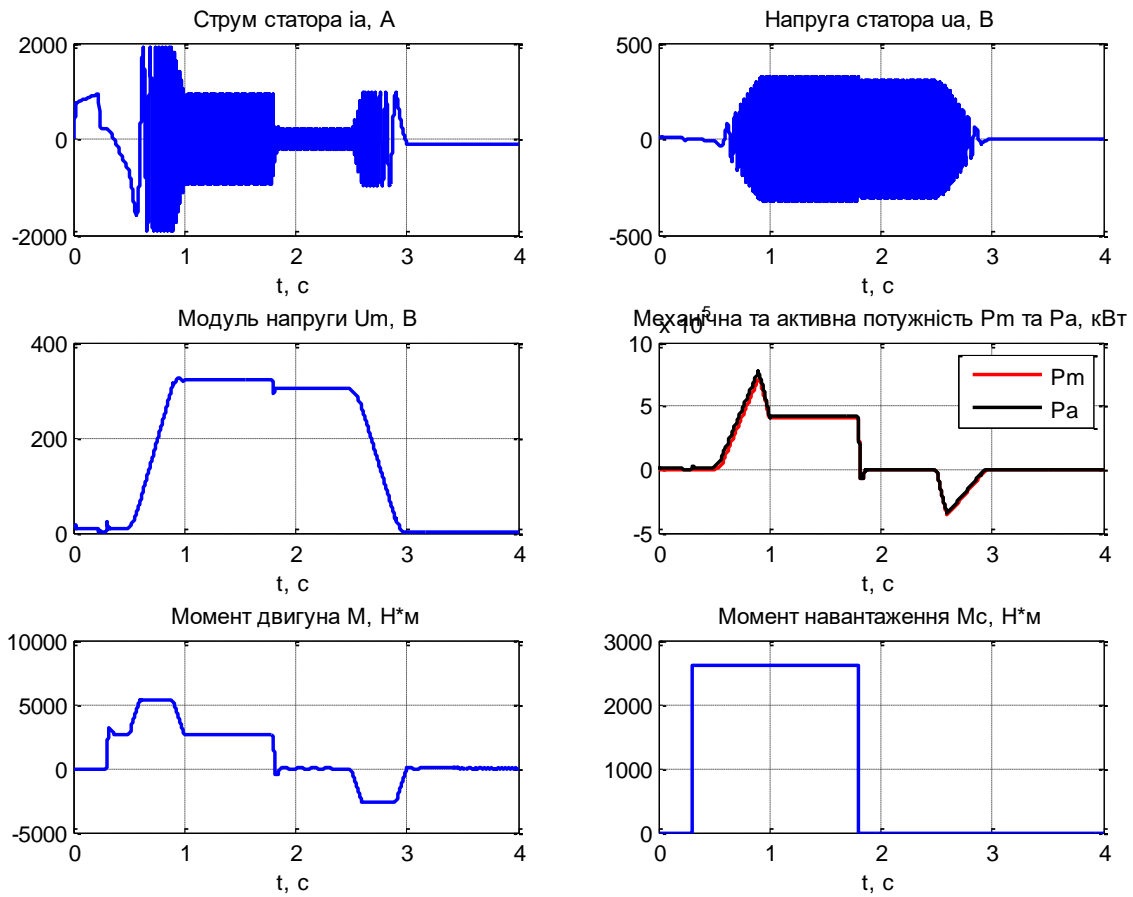


Рисунок 6.7 – Робота тягового електропривода при скиданні навантаження

Після симуляції режиму пуску під навантаженням можна спостерігати наступні графіки (рис. 6.4 – 6.5). Проаналізувавши їх, ми бачимо, що за 0.2 (с) відбувається збудження двигуна, після того, як потокощеплення досягає номінального, в час, рівний 0.5 с, відбувається розгін двигуна до номінальної швидкості 154 рад/с.

При симуляції режиму скидання навантаження, навантаження знімається в час рівний 1.8 с після чого двигун переходить в режим рекуперації віддаючи енергію в мережу в час 2.5 с та зупиняється в час, рівний 3 с, але важливою умовою рекуперації тягового електроприводу це наявність споживачів на лінії.

Момент M_c , який рівний 26000 Н·м подається від самого початку досліду і знімається в час 1.8 с.

Також на графіках видно асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій похибок відпрацювання кутової швидкості та модуля потокощеплення, оскільки вони асимптотично наближаються до нуля.

Модуль напруги статора, при накиданні номінального моменту навантаження, збільшується, щоб компенсувати дію моменту і забезпечити відпрацювання кутової швидкості на номінальному рівні.

Компонента струму статора по осі (d) регулює потокощеплення та має стрибкоподібний характер тільки при збудження ТЕР, далі підтримується сталою, оскільки керування відбувається в першій зоні.

Компонента струму статора по осі (q) регулює момент двигуна, тобто повторює форму моменту.

При відпрацюванні номінальної швидкості та $M_c = M_n$, виникає динамічний момент, який потрібний для розгону та сповільнення двигуна.

При нульовій швидкості, не виникає динамічної складової, оскільки система відпрацьовує лише момент навантаження.

Нижче показані результати моделювання перехідних процесів електроприводу при наявності задатчика інтенсивності, який обмежує прискорення потягу в режимах пуску – гальмування на протязі 10 с.

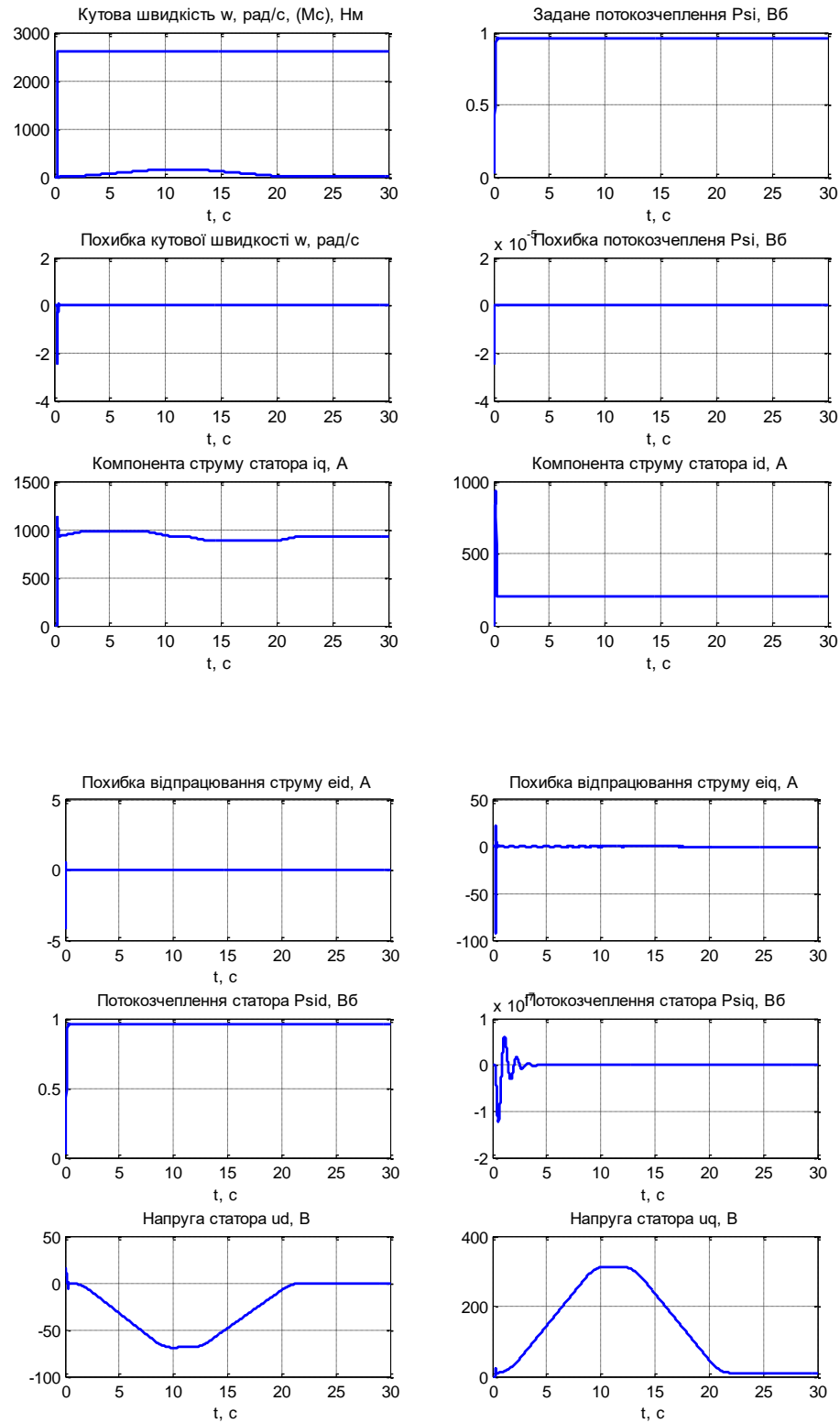


Рисунок 6.8 – Робота тягового електропривода (задатчик інтенсивності на протязі 10 с)

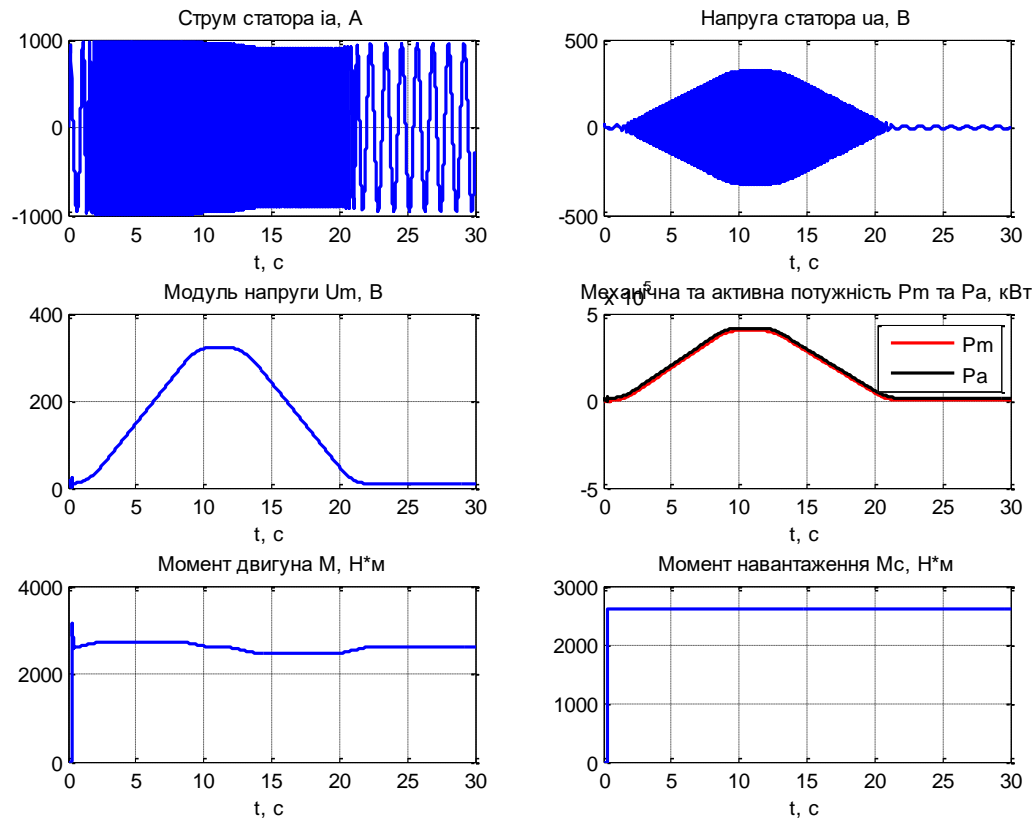


Рисунок 6.9 – Робота тягового електропривода з задатчиком інтенсивності на протязі 10 с

Висновок до розділу 6

В даному розділі було проведено симуляцію режимів роботи тягового електроприводу пристандартних задаючих і збурювальних діях. Промодельовані режими роботи пуску під навантаженням, рекуперації, та скидання навантаження. Отримані результати були проаналізовані і свідчать про прцездатність розробленого електроприводу і системи керування. Аналіз результатів також підтверджує, що параметри електродвигуна були обрані вірно.

7 СПЕЦЧАСТИНА. РОБОТА ДВОХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА СПІЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

7.1 Усереднене векторне керування двома двигунами, що живляться від одного інвертора

Слід зазначити, що аналогічні дослідження були проведені Вороновим Р.В [1], у своїй дисертації на тему «Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», що допомогло аналізу та розумінню всіх процесів, які мають місце в даній системі. Результати даних досліджень та опис математичної моделі приведені в його дисертації на с. 67-76.

Найпоширенішими підходами до синтезу систем управління тяговими електромеханічними системами, що містять два (або більше) двигуни змінного струму, що живляться від одного інвертора, включають усереднене управління та управління за принципом "ведучий - ведений".

Тому, перш ніж приступати до розробки системи управління, доцільно дослідити динамічні властивості даних двох систем. Слід зазначити, що динамічні процеси у контурі швидкості відбуваються досить повільно через момент інерції двигуна та механізму, підключеного до його валу.

Отже, вивчення процесів зміни швидкості з плином часу може суттєво зменшити значення отриманих результатів. У той же час зміна швидкості визначається співвідношенням між крутним моментом двигуна і крутним моментом навантаження. Крутний момент двигуна формується за допомогою значень поточних проекцій на вісь оберткової системи координат. Оскільки схеми управління струмом мають високу динамічну характеристику, крутний момент, що генерується двигуном, має подібні властивості. Тому вивчення динаміки крутного моменту двигунів доцільно з точки зору порівняння існуючих та розробки нових структур систем управління.

Принцип усередненого управління полягає у використанні комбінованої математичної моделі двох асинхронних двигунів, що живляться від спільного джерела.

При використанні векторного управління електромеханічною системою, в якій один асинхронний двигун живиться від інвертора, розрахунок необхідного вектора напруги живлення двигуна виконується в системі координат, орієнтованій вектором потоку ротора для управління значеннями потоку та крутного моменту. Коли два двигуни живляться від одного інвертора, споживані інвертором струми також будуть неідентичними через різні параметри двигунів або їх навантаження, що призведе до різних базових значень, що використовуються для орієнтації поля, тобто компонентів вектор потокозчеплень ротора.

Тому проблемою, яку потрібно вирішити, перш за все, при синтезі таких систем управління, є проблема вибору відповідного вектора, який буде орієнтацією обертової системи координат.

У тому випадку, коли струми, що протікають через обмотки паралельно з'єднаних двигунів, різні, математично їх можна описати як певне середнє значення $i_{x,ave}$, $x = \{a,b,c\}$, яке відображає складову струму, яка однаково протікає в однойменних обмотках цих двигунів та струмовий компонент $i_{x,dif}$, який відображає протікання струму між однойменними обмотками двох двигунів. При цьому в структурі системи управління можна використовувати сигнал середнього струму обмоток статора, оскільки цей струм пропорційний струму, що протікає від інвертора до двигунів. Подібний підхід може бути використаний для розрахунку середнього вектора потокзчеплення ротора двох двигунів, який може бути використаний для реалізації орієнтації поля обертової системи координат. Як і у випадку векторів струму статора, у цьому випадку необхідно також розрахувати різницю векторів потокозчеплення.

Таким чином, при векторному керуванні двома асинхронними двигунами, що живляться від одного інвертора, проекції усередненого вектора струму статора

знаходяться на осі системи координат dq, яка обертається синхронно із середнім вектором потокозчеплення ротора, що потенційно може створити необхідний крутний момент для кожного двигуна. Структурна схема даної системи представлена на рисунку 7.1.

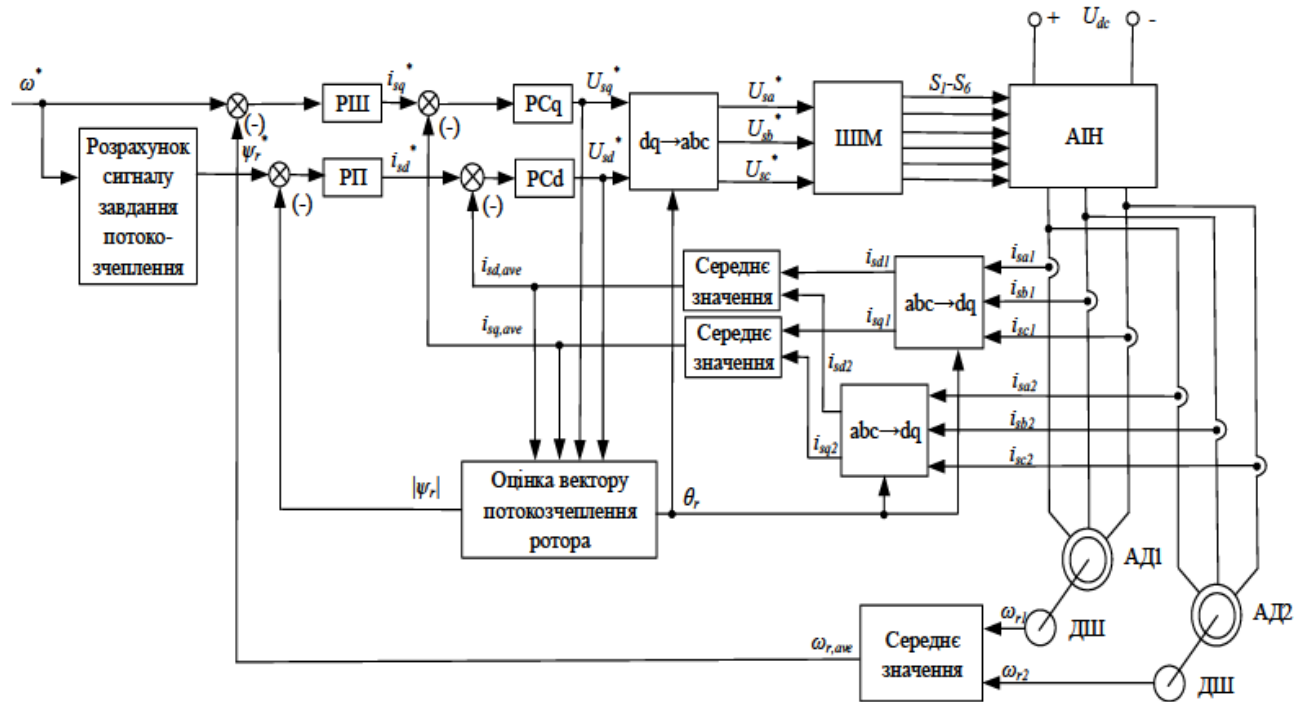


Рисунок 7.1 – Структурна схема усередненого векторного керування двома двигунами, що живляться від одного інвертора

Також варто детальніше розглянути систему з розділенням ролей на «ведучий- ведений».

7.2 Векторне керування двома двигунами з розділенням ролей «ведучий-ведений», що живляться від одного інвертора

Структура векторної системи управління з розподілом ролей тягової електромеханічної системи «ведучий-ведений», що містить два асинхронних двигуна, що живляться від одного інвертора, представлена на рис. 7.2. За допомогою цього управління один з двигунів бере на себе роль "ведучого", і його змінні стану використовуються в традиційній системі векторного управління як сигнали зворотного зв'язку. Вибір двигуна, який отримує роль "ведучого", ґрунтується на співвідношенні потокозчеплення. Модуль вектора потокозчеплення ротора залежить від величини моменту навантаження двигуна.

Ця залежність пояснюється тим, що при однакових параметрах напруги живлення при збільшенні крутного моменту навантаження на обмотках двигуна протікає струм більшої величини, а отже, збільшується величина падіння напруги на обмотках статора та ротора, що зменшує потік. У цьому випадку сигнали зворотного зв'язку швидкості та струму використовуються лише від головного двигуна, тоді як подібні виміряні значення від веденого двигуна ігноруються.

У разі ідентичності параметрів схем заміщення двигунів і моментів навантаження система управління буде правильно керуватися за полем кожного з двигунів. Якщо ця умова не виконується, орієнтація обертової системи координат здійснюється відповідно до значень змінних стану головного двигуна, при цьому втрачається правильна орієнтація поля підлеглого двигуна, що негативно позначається на якості контролю.

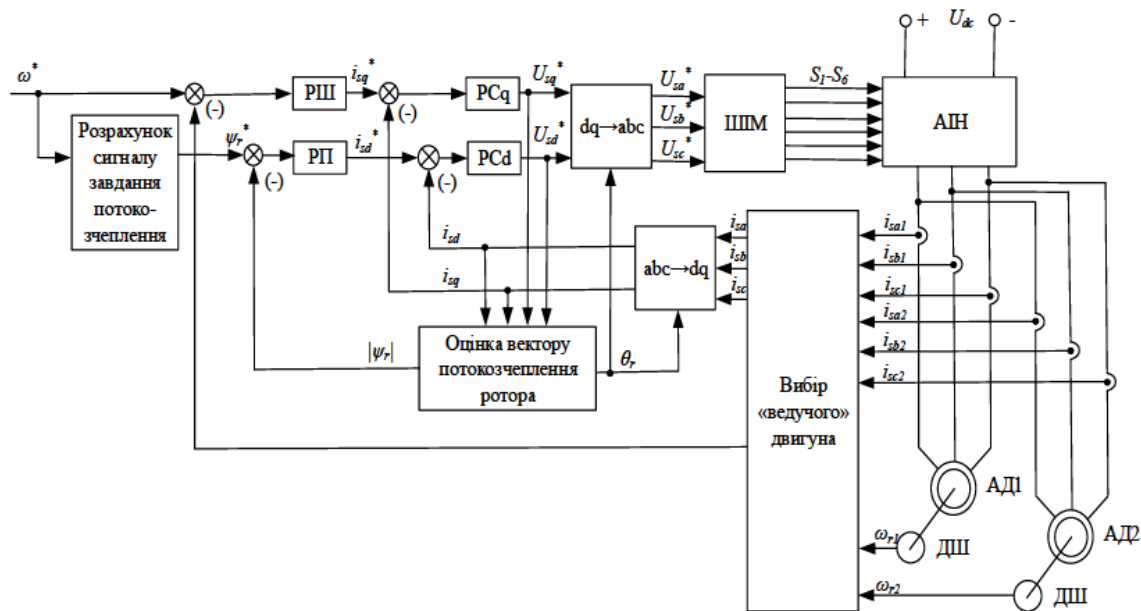


Рисунок 7.2 – Структурна схема «ведчий-вдений» векторного керування двома двигунами, що живляться від одного інвертора

З результатів дослідження [1] можна зробити висновок, що використання даної системи призводить до виникнення небажаних відхилень крутного моменту від заданого значення. Тому при розробках систем, які використовують дводвигунну систему приводів з живленням від одного інвертора, краще використовувати систему усередненого керування. Це дозволить підвищити якість та точність керування.

Висновок до розділу 7

В даному розділі були описані системи дводвигунних електроприводів, які живляться від одного інвертора, що дає повне уявлення про їхнє функціонування. В результаті цього опису було визначено оптимальну систему керування для дводвигунного приводу з живленням від одного інвертора. Були з'ясовані основні недоліки і переваги кожної з систем приводу

ВИСНОВКИ

1. В даному дипломному проєкті вирішена поставлена задача з розробки системи електроприводу для електровозу з ТЕП змінного струму.
2. За результатами аналізу науково-технічної літератури були сформовані вимоги до тягових електроприводів та систем автоматики електровозу.
3. На основі розрахунку тягових зусиль для електровозу вітчизняного виробництва «Тарпан» було обрано електропривод змінного струму номінальною потужністю 400 кВт та розраховані його додаткові параметри.
4. Були розраховані силові елементи перетворювальних пристроїв, які дозволили розробити схему електричну принципову.
5. На основі обґрунтування принципу керування електроприводом був обраний оптимальна варіант системи векторного керування. Дана система була описана математично та розглянута у програмному середовищі MatLab SIMULINK.
6. Проведені дослідження роботи електроприводу в статичних і динамічних режимах роботи, які симулюють реальні умови експлуатації електровозу. В результаті даних досліджень було виявлено, що привод обрано вірно, система векторного керування забезпечує високу точність керування і плавність руху, що є дуже важливою умовою роботи ТЕП.
7. В спеціальній частині проекту розглянуті особливості роботи дводвигунного тягового електроприводу при живленні двигунів від загального інвертора. Показані шляхи оптимізації роботи такого електроприводу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воронов Р.В – Дисертація: «Тягові електро механічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», Харків 2020 1-97с.
2. Опис ЕКр-1 «Тарпан»: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/03/6-2.pdf>
3. Характеристики двигуна TMF 59-39-4: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%9A%D1%801_%C2%AB%D0%A2%D0%B0%D1%80%D0%BF%D0%B0%D0%BD%C2%BB
4. РАТ В.А. Сидяков , д.т.н. Л.А. Андреева, к.т.н. А.Г. Колчанов, інженери И.П. Потапов, Н.И. Карганова, А.В. Багинов, В.Е.Сидяков, И.Т. Демченко, В.П. Глухман. – Методичний посібник : «Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте», Москва 2016, 22-25с.
5. А.А. Резниченко – Методичні вказівки: «Расчет основных технико-эксплуатационных характеристик электровозов постоянного и переменного тока», Ростов-на-Дону 2005, 4-5с.
6. Кравчик А.Э. «Асинхронные двигатели серии 4А», 1982 61с.
7. Розрахунок випрямляча URL: <https://lektsii.org/14-78491.html>
8. Діодний випрямляч SEMIX501D17FS SEMIKRON URL: <https://www.semikron.com/products/product-classes/bridge-rectifier-modules/detail/semix501d17fs-27891400.html>
9. Інвертор ABB ACS580-07-715A-4 R11 URL: <https://privod-in.ru/upload/iblock/f8d/f8d075b59ecf6ece5f31fe4e3183403a.pdf>
- 10.IGBT модуль SKiiP1513GB172-3DW V3 URL: <https://www.semikron.com/products/product-classes/ipm/detail/skiip-1513-gb172-3dw-v3-20452120.html>

11. Тяговий трансформатор ОНДЦЕР-3000/25-У1 URL: http://uea.com.ua/uploads/files/1558525390_transformatori-ondcer-3000.pdf
12. Метод розрахунку гальмівного резистора URL: <https://instart-info.ru/wp-content/uploads/2015/03/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4-%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0.pdf>
13. Зовнішній гальмівний переривач ТП-315-400 (130 А) URL: http://www.gusta.ru/index.php?doc=aks_tormozn