

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття степеня бакалавра

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

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему: Асинхронний привод міського трамвая

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-71

Прудінник Дмитро Геннадійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник асист. Решетнік Віктор Сергійович _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доц., к. т. н. Коваленко Михайло Анатолійович _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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



Студент



(підпис)

Київ – 2021 р.

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.7110.007.БР	Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141. 7110. 007.БР	Пояснювальна записка	63	
3	A1	141. 7110. 007.БР	Функціональна схема електроприводу трамвая	1	
4	A1	141. 7110. 007.БР	Структурна схема електроприводу трамвая	1	
5	A1	141. 7110. 007.БР	Результати моделювання	1	

					141. 7110.007.БР		
	Letter	№ of doc.	Підпис	Дата	Асинхронний привод міського трамвая		
Devel		Прудіннік Д.Г.					
Checked.		Решетник В.С.					
N. Contr.							
Approved		Пересада С.М.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						2	63
					НТУУ «КПІ», ФЕА Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71		

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Асинхронний привод міського трамвая

**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

_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Прудіннік Дмитро Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Асинхронний привод міського трамвая _____

керівник проекту: асистент Решетник В.С.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2021 _____
3. Вихідні дані до проекту: Діаметр коліс $D=660\text{мм}$, Кількість двигунів=4, Максимальна швидкість V , км/год.=70, Повна маса вагона $m=35000$, Максимальне прискорення, $2 \text{ max } a$, м/с² =1.2, Максимальне сповільнення при повному завантаженні, $2 \text{ max } b$, м/с² =1
4. Зміст пояснювальної записки: Зміст. Вступ. 1. Аналітичний огляд електроприводу трамваїв. 2. Визначення необхідної потужності двигуна. 3. Розрахунок та вибір силового обладнання. Опис схеми перетворювального пристрою. 4. Аналіз статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. Висновки. Перелік посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Функціональна схема електроприводу трамвая. Діаграми напруг та часові діаграми електромагнітного моменту АД. Графіки перехідних процесів.
6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 20.03.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд електроприводу трамваїв	03.04.2021	

2	Визначення <u>необхідної</u> потужності двигуна	20.04.2021	
3	Розрахунок та вибір силового обладнання. Опис схеми перетворювального пристрою	05.05.2021	
4	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи	15.05.2021	
5	Оформлення пояснювальної записки та розробка графічної частини ДП	05.06.2021	

Студент




(підпис)

Прудіннік Д.Г.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту



(підпис)

Решетник В.С.

(ініціали, прізвище)


РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 63, рисунків – 23 та графічну частину на 2 листах А1.

В дипломному проекті проведено розрахунок керованого електроприводу змінного струму для сучасного вагону трамвая. Використовуючи початкові умови, було розраховано загальну потужність електропривода та обрано двигун 4А280М4У3. Потім за допомогою розрахунків були отримані параметри схеми його заміщення для подальшого моделювання, після чого моделювалася система, отримана в потрібних режимах роботи.

Розрахунок та реалізація даної дипломної роботи проводилися у наступних програмах: Microsoft Office Word 2010, Splan 7.0, MatLab R2012b, MathType 6.9.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, КЕРОВАНІЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ВАГОН ТРАМВАЯ, МІСЬКИЙ
ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, МОДЕЛЮВАННЯ

					141. 7110.007.БР				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Прудіннік Д.Г.			Асинхронний електропривод трамвая		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Решетник В.С.						7	63
Н. Контр.									
Затверд.		Пересада С.М.			Реферат		НТУУ «КПІ», ФЕА Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71		



SUMMARY

The diploma project contains: pages - 63, drawings - 23 and a graphic part on 2 sheets of A1.

In the diploma project the calculation of the controlled electric drive of alternating current for the modern tram car is carried out. Using the initial conditions, the total power of the electric drive was calculated and the 4A280M4U3 engine was selected. Then, with the help of calculations, the parameters of the scheme of its replacement were obtained for further modeling, after which the system obtained in the required operating modes was modeled.

The calculation and implementation of this thesis were carried out in the following programs: Microsoft Office Word 2010, Splan 7.0, MatLab R2012b, MathType 6.9.

ASYNCHRONOUS MOTOR, CONTROLLED ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, TRAM WAGON, URBAN ELECTRIC TRANSPORT, SIMULATION

					141. 7110.007.БР			
	Letter	№ of doc.	Підпис	Дата	Asynchronous electric tram drive <i>SUMMARY</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Devel		D. Prudinnik					8	63
Checked.		V. Reshetnyk						
N. Contr.						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA, EP-71		
Approved		S. Peresada						

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЇВ	13
1.1 Історія розвитку та загальні відомості.....	13
1.2 Типові технічні рішення електропривода трамваїв	13
1.3 Розвиток машинобудування на території сучасної України	14
1.4 Умови необхідні для комфортного перевезення пасажирів	15
1.5 Способи регулювання швидкості асинхронного двигуна	16
1.6 Перспективні двигуни для роботи міського трамваю.....	19
1.7 Необхідні умови для енегрозбереження.....	21
1.8 Формулювання вимог до електропривода трамваю, систем автоматичного керування та автоматизації	22
2 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА	25
2.1 Розрахунок потужності	25
2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода	27
2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна	29
3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	34
3.1 Розрахунок автономного інвертора напруги	34
3.2 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра	34
3.3 Ємнісний фільтр	35
3.4 Розрахунок параметрів баластного опору.....	36
3.5 Розрахунок датчиків струму та напруги	37
3.6 Опис силової схеми електропривода	37
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ.....	41
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ...	48
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

Сьогодні, в період бурхливого розвитку технологій, пов'язаних з електроенергією, міський електричний транспорт залишається одним з основних способів переміщення людей всередині міста. Значне зростання кількості мешканців мегаполісів та поступове впровадження систем змінного струму в різних районах керованого електричного руху ставлять нас перед завданням вдосконалення транспорту за рахунок підвищення енергоефективності, ефективності та збільшення пасажиромісткості поїзда. У нашому випадку трамвай буде вважатися екологічно безпечним громадським транспортним засобом з високою вантажопідйомністю. Згідно з цим останнім критерієм, його перевершує лише метро, що, в свою чергу, вимагає набагато більше витрат на будівництво ліній. Найпоширенішим і надійним пристроєм для управління різними механізмами є асинхронний двигун, але в неконтрольованому електроприводі він не здатний виконати всі свої можливості. Для цього використовуються перетворювачі частоти на основі керуючого мікроконтролера та керованого інвертора. Це може значно підвищити ефективність електроприводу і дозволяє регулювати швидкість за певним законом, що вимагається технологічним процесом, а також забезпечує плавний пуск із зменшенням пускових струмів. Тому електропривод, керований змінним струмом, стає все більш популярним. Разом з асинхронним двигуном саме перетворювач частоти дає змогу відхилити вже застарілий привід постійного струму за допомогою аналогових схем управління. У випадку міського залізничного транспорту це може значно зменшити вагу та габарити електрообладнання. Отже, ми маємо можливість перенести обладнання управління на дах автомобіля, звільнивши простір під підлогою, що дозволяє впровадити низькопідлоговий трамвай. Останнє значно підвищує рівень комфорту під час пересування містом. Це особливо важливо для людей з обмеженими можливостями. З вищевикладеного випливає, що створення або модернізація існуючого рухомого складу з використанням контрольованих

перетворювачів частоти є сьогодні дуже важливим завданням. Дослідження на цю тему будуть проводитись у цьому дипломному проекті.

Міський електричний транспорт став важливою частиною єдиної мережі перевезення людей України. На даний момент він перевозить до 60% усіх пасажирів нашої країни.

Серед найважливіших технічних вимог пред'явлених до сучасних МЕТ, таких як більша вантажопідйомність, менша витрата матеріалів вагонів, необхідне прискорення та гальмування, а також комфортні умови для пасажирів, важливо зменшити енергоспоживання та витрати на технічне обслуговування, та покращення умов праці. Виконання цих вимог з існуючим рухомим складом є проблематичним, оскільки він морально та фізично застарів та значною мірою зношений.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

АІН – автономний інвертор напруги

КВ – керований випрямляч

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПЧ – перетворювач частоти і напруги

СК – система керування

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ТЕД – тяговий електродвигун

ПКМ – пряме керування моментом

ЕМС – електро-механічна система

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЇВ

1.1 Історія розвитку та загальні відомості

Трамвай як засіб громадського транспорту щодня перевозить мільйони пасажирів по всій земній кулі. Для наших співвітчизників є особливий момент гордості, адже Україна винна світові першим електричним трамваєм. Саме з фізики Полтавщини Федір Пироцький вперше задумався про підключення електрики до рейок, на яких стояв вагон, щоб звідти він міг сісти в двигун [1]. Трамвайний рух в Україні має колії загальною довжиною близько 1900 км, переважно шириною 1524 мм, за винятком міст Вінниці, Житомира, Львова та Євпаторії, де ширина колії становить 1000 мм. Цей транспортний засіб щороку перевозить близько 600 мільйонів пасажирів і має близько 2300 електромобілів різних виробників, більшість з яких виготовляються в Чехії. У автомобілях з рульовим управлінням та в електродинамічних або регенеративних процесах гальмування.

Міська електропередача (МЕТ) є невід'ємною частиною Єдиної мережі передачі України. Він перевозить до 60% усіх пасажирів у 54 містах нашої країни.

1.2 Типові технічні рішення електропривода трамваїв

Більшість трамваїв використовують електричну тягу для доставки електроенергії через мережу повітряних ліній за допомогою пантографів (пантографи або зв'язки, рідше муфти), але є також трамваї, які курсують на третій провідниковій рейці або з батареями.

На початковій фазі розвитку трамвая державні електромережі ще не були достатньо розвиненими, так що майже всі нові трамвайні ферми мали власну електростанцію. Зараз трамваї отримують електроенергію з державних електромереж. Оскільки трамвай курсує на відносно низькому постійному струмі, його дорого передавати на великі відстані [1]. Тому залізничні

підстанції розташовані поблизу ліній, які приймають змінний струм високої напруги від мереж і перетворюють його в постійний струм, який потім живить повітряну лінію.

Трамвайна та тролейбусна системи колишнього СРСР характеризуються двома енергетичними концепціями: централізованою та децентралізованою [2]. Центральна система була найважливішою і часто єдиною системою до 1960-х років. Він складався з великих підстанцій з декількома перетворювальними установками, щоб обслуговувати всі прилеглі або протяжні шляхи на відстані до 1-2 км. Як правило, ці тягові станції розташовувались у місцях з високою щільністю трамвайних та / або тролейбусних ліній: у центрах міст, у районах, де сходяться кілька ліній, біля трамвайних зупинок тощо. Децентралізована система почала розширюватися в 1960-х роках і міжміські трамвайні та тролейбусні лінії, наприклад, від центру міста вздовж S-автобану, на лініях S-Bahn, на лініях метро в районах міста, на магістральних дорогах тощо. У цій системі кожні 1-2 км проходять уздовж малопотужні тягові підстанції з одним або двома перетворювальними блоками на лінії. Ця невелика тягова підстанція живить одну або дві ділянки маршруту поблизу, в кінці цієї ділянки вона може житись сусідніми підстанціями. Ця схема пропонує менші втрати енергії через менший перепад напруги на лінії живлення та більшу стабільність у разі аварії на певній підстанції при одночасному постачанні двох місць розташування підстанції.

1.3 Розвиток машинобудування на території сучасної України

Придбання нових вагонів відбувається головним чином завдяки можливості української промисловості їх виробляти. Перша спроба в цьому напрямку була зроблена в 1994 році Луганською тепловозною фабрикою, коли перший вітчизняний трамвай ЛТ-10 був зроблений зі 100% національним виробництвом [2]. На жаль, завод припинив розробку та виробництво вагонів у 1999 році через відсутність замовлень. Другою і найбільш вдалою спробою стала розробка вагонів "Татра-Юг" 36 серій, що базується в Одесі та з виробничими

потужностями в Дніпрі. Компанія на сьогоднішній день виробляє сучасні вагони трамваю, такі як K1, K1M, K1M6, K1M8, які за технічними, ергономічними та конструктивними параметрами нічим не поступаються кращим аналогам у світі. Виробництво має міжнародні сертифікати якості ISO 9001. Вагони «Татра-Юг» використовуються у 22 містах України [3]. У цілому з 2001 року цей виробник відправив на українське трамвайне депо 86 вагонів. До 2013 року компанія «Татра-Юг» була єдиним виробником вагонів трамваю в Україні, та в 2013 році компанія «Електрон» (Львів) випустила першу модель сучасного трамвая типу «Електрон» T5L64, що використовує технічні рішення, що є не гірший за найбільших виробників електромобілів у Європі. Перші зразки таких трамваїв для колій 1000 мм дійшли до Львова, а пізніше - до Києва, де колія становить 1524 мм. З 2017 року на трамвайні депо в Києві надходитимуть трисекційні трамваї від польської компанії PESA, які мають ті ж характеристики, що і вагони компанії «Електрон», але їх експлуатація вимагає додаткового бюджету на технічне обслуговування та ремонт у пізніший період, гарантувати та просувати промисловість Польщі, а не України.

1.4 Умови необхідні для комфортного перевезення пасажирів

Через те що МЕТ є невід'ємною частиною єдиної транспортної мережі України. Він перевозить до 60% усіх пасажирів. Одним з основних завдань залізничного пасажирського транспорту є забезпечення санітарних норм та комфортних умов подорожі. Для цього вагони повинні бути обладнані системами водопостачання, опалення, вентиляції та кондиціонування. На термостійкість вагонів впливає жорсткість і теплопровідність кузова. Герметичність оцінюється на основі кількості повітря, яке проникає в приміщення з навколишнього середовища через тиск вітру та тепла через конструкції, що оточують вагон трамваю. Останній утворюється внаслідок різниці температур і падіння тиску повітря всередині і зовні приміщення. Теплопровідність корпусу визначається товщиною ізолюючого шару,

щільністю заповнювального простору між стінками та наявністю металевих опорних елементів. Суцільнометалевий кузов вагону повинен бути герметичним і мати можливість зберігати тепло. Якість теплоізоляції в основному залежить від властивостей використовуваних матеріалів. Недотримання необхідної температури та режиму вентиляції може призвести до утворення роси на внутрішніх металевих поверхнях корпусу. Це може призвести до зносу захисного покриття та корозії поверхонь корпусу. Існує багато методів оцінки поточного стану теплоізоляційних властивостей та властивостей трамваю. Наприклад, система вимірювання інформації "Пошук". За допомогою електричних обігрівачів або охолоджувальних агрегатів, встановлених всередині автомобіля, внутрішні поверхні корпусів автомобіля нагріваються або охолоджуються. Тоді існує різниця між внутрішньою температурою та температурою навколишнього середовища, а місцеві спотворення температурного поля виникають у місцях пошкодження ізоляції. Система "Пошук" сканує контрольовану поверхню ніби підрядником та аналізує температурне поле. Цей метод дозволяє не тільки виявити зони зниженої ізоляції, але і більш ретельний підхід до ремонту та заміни теплоізоляційного матеріалу на поверхнях корпусу. Однак за допомогою цього методу неможливо повністю діагностувати якість теплоізоляції стін і підлоги. Тому необхідно застосовувати комплексний підхід до визначення теплового стану трамвайного вагону з метою виявлення більш точних показників, які прискорять процес більш точного виявлення дефектів теплоізоляції та витоків кузова, а також при ремонті вагону.

1.5 Способи регулювання швидкості асинхронного двигуна

Асинхронний двигун - найпопулярніший електродвигун. Ці двигуни виробляються потужністю від 0,1 кВт до декількох тисяч кіловат і використовуються у всіх галузях економіки. Головною перевагою асинхронного двигуна є простота його конструкції та низька вартість. Однак асинхронний двигун у звичайному контурі не дозволяє регулювати його

швидкість відповідно до його функціонального принципу. Особливо важливо забезпечити, щоб уникнути значних втрат енергії і, отже, перегріву ротора у випадку короткозамкнених асинхронних двигунів, двигун повинен працювати в тривалому режимі з мінімальними значеннями ковзання.

Розглянемо можливі способи управління швидкістю асинхронних двигунів. Швидкість двигуна визначається двома параметрами: швидкістю обертання електромагнітного поля статора ω_0 і ковзанням s

В принципі можливі два типи регулювання швидкості: контроль швидкості поля статора та контроль ковзання до постійного значення ω_0 .

Швидкість поля статора визначається двома параметрами (див. 3.3): частотою напруги f_1 , що подається на обмотки статора, і кількістю пар полюсів двигуна p . В результаті існує два способи регулювання швидкості: включаючи ланцюг статора двигуна (регулювання частоти) і зміну кількості пар полюсів двигуна.

У разі короткозамкнених асинхронних двигунів ковзання двигуна можна встановити на постійну швидкість поля статора, змінюючи значення напруги статора при постійній частоті цієї напруги. Існують також два інші варіанти асинхронних двигунів із фазним ротором: додавання додаткових опорів до ланцюга ротора (реостатичне управління) та введення ЕР в ланцюг ротора. за допомогою перетворювача частоти в ланцюзі ротора (асинхронний каскадний клапан і двигун подвійної подачі).

Через це основними способами керування швидкістю асинхронного двигуна є наступні:

1. Зміна напруги статора;
2. Змінити частоту напруги живлення статора, включаючи одночасно змінюючи його розмір;

3. Зміна активного електричного опору колеса ротора (лише для фазних роторних двигунів);
4. Змінити кількість пар полюсів (лише для спеціальних полюсних комутаційних двигунів);
5. Використання енергії ковзання через спеціальні каскадні з'єднання (лише для двигунів фазного ротора);
6. Подвійне живлення двигуна (тільки двигуни фазного ротора);
7. Зміна електричного опору колеса статора (тільки при короткозамкнених роторних двигунах);
8. Векторний контроль.

При частотно керованих асинхронних електроприводах векторне управління пов'язане зі змінами значень частоти та струму змінних (напруги, струму статора, зв'язку потоку) та взаємного вирівнювання їх векторів в декартовій системі координат. Завдяки регулюванню як амплітудних значень змінних, так і фазового кута між їх векторами, досягається максимальний контроль якості швидкості, крутного моменту та струму асинхронного двигуна як з точки зору статичної, так і динамічної. У випадках, коли діапазон регулювання частоти обертання асинхронного двигуна не повинен бути перевищений відповідно до вимог технологічного процесу, застосовується безсенсорна система асинхронних електроприводів з векторним управлінням. У таких системах інформація про поточні значення та просторові положення векторів зчеплення та значення швидкості асинхронного двигуна визначається опосередковано миттєвими значеннями струмів та напруг фаз двигуна на основі моделі асинхронного двигуна. Безсенсорна векторна система управління асинхронним двигуном поступається системам з прямим векторним управлінням через нестабільність параметрів еквівалентної схеми двигуна.

Основні переваги асинхронних двигунів, керованих вектором:

- Обмежений сервіс;
- Досить висока ефективність;
- Високі динамічні властивості, обмежений струм в динамічних режимах, пусковий момент, що дорівнює або більший за номінальне значення, низькі значення ковзання, обмежене навантаження на конструктивні елементи ротора;
- Поділ процесів у мережі постачання;
- Низька ціна та висока надійність.
- Основні недоліки векторних асинхронних двигунів:
- Потрібна окрема вентиляція з регулюванням глибини;
- Зміни параметрів циклу заміщення через потепління (активні опори), що ускладнює обробку; високі
- Значення dV / dt породжують стрес ізоляції

1.6 Перспективні двигуни для роботи міського трамваю

Найбільш перспективними для вагонів є імпульсні електроприводи для двигунів змінного струму. Досягнення напівпровідникової техніки, мікроелектроніки та цифрових систем управління на їх основі в галузі автоматизованих електроприводів створили реальну основу для впровадження електроприводів змінного струму в вагоні трамваю. Сучасні промислові асинхронні електроприводи із скалярним та векторним методом вихідної напруги, клапанні двигуни на базі синхронних машин дозволяють отримувати великі розміри енергії та маси, формувати механічні властивості з широким діапазоном швидкостей, коли налаштована вихідна напруга частоти і на номінально. Завдання формування механічної тягової поведінки таких електроприводів повинно взяти на себе управління. У відомих елементах керування електротранспортними приводами визначені оператором ефекти управління є сигналами для встановлення значення частоти або напруги, що приводить в дію приводний двигун. У частотно-регульованих

електроприводних приводів існує три основних методи стабілізації параметрів двигуна: крутний момент, потужність і напруга. Система автоматичного управління забезпечує ці режими роботи електроприводу, реалізацію характерних кривих, для повернення максимальної та часткової потужності. Характеристика тяги формується функціональними перетворювачами, які повинні реалізовувати закони управління, необхідні для роботи електроприводу: підтримка співвідношення U / f , управління постійним крутним моментом у валу двигуна, потужність або напруга, що подаються на двигун.

Промислові асинхронні двигуни послідовно не оснащені датчиками, які можуть безпосередньо вимірювати крутний момент. На практиці для спостереження за цією координатою використовуються оцінювачі та спостерігачі. Поточні значення електромагнітного моменту обчислюються на основі виміряних сигналів датчиків напруги BP і струму як векторного добутку векторів потоку $\vec{\Phi}_1$ і струму статора \vec{I}_1 :

$$M = k \vec{\Phi}_1 \wedge \vec{I}_1 = k \operatorname{Im}(\vec{\Phi}_1 \bullet \vec{I}_1),$$

де вектор потоку визначається інтегруванням рівняння

$$\vec{\Phi}_1 = \int (\vec{U}_1 - R_1 \vec{I}_1) dt$$

Приводні двигуни громадського транспорту працюють з вологим і запиленим повітрям за несприятливих погодних умов. Крім того, на відміну від електродвигунів загального призначення, ТЕД працюють у декількох режимах (короткочасний, знову ж короткочасний з частими пусками), що супроводжується великою зміною швидкості обертання ротора та поточного навантаження (якщо можлива зміна місця розташування). В 2 рази більше, ніж номінал). Ходові двигуни під час роботи зазнають механічних, теплових та електричних перевантажень. Тому при своїй конструкції вони враховують

підвищений електричний і механічний опір деталей і компонентів, термо- і вологостійку ізоляцію деталей і провідних обмоток, а також стабільну комутацію двигунів.

1.7 Необхідні умови для енегрозбереження

Серед найважливіших технічних вимог до сучасних ходових передач, що містять МЕТ, таких як підвищена вантажопідйомність, менша витрата матеріалу автомобілями, забезпечення питомих прискорень та уповільнення, а також комфортних умов для пасажирів, важливо знизити енергоспоживання та знизити витрати на обслуговування . та покращення умов праці. Виконання цих вимог із наявним рухомим складом є проблематичним, оскільки він морально та фізично застарів та значною мірою зношений.

Зусилля для модернізації ТЕП за допомогою ФЕ менші, оскільки використовуються звичайні електродвигуни, а ФЕ має меншу потужність напівпровідникових елементів і простішу систему управління. У той же час при використанні одно- та змінних приводних двигунів, наприклад в електромобілях ТЗ, необхідно забезпечити додатковий статичний перетворювач з асинхронним вентилятором двигуна для примусової вентиляції електродвигунів. А асинхронні тягові двигуни виготовляються з самовентиляцією, тому цей перетворювач не потрібен. У цьому випадку різниця у вартості між асинхронним електроприводом та електроприводом постійного струму менша. В обох випадках необхідно замінити електричні перетворювачі машини на статичні, якщо потрібно.

Порівнюючи асинхронний електричний тяговий привід та електротяговий привід з ФОП та електродвигунами постійного струму, слід зазначити, що звичайні електродвигуни мають обмежений термін служби, а їх заміна коштує значно більше грошей, ніж придбання індукційного агрегату. Двигуни.

Експлуатаційні витрати при використанні асинхронного приводу значно нижчі, оскільки асинхронний двигун майже не викликає витрат на обслуговування.

Для оцінки можливостей стандартизації електротягового обладнання необхідно розглянути найважливіші параметри електричних тягових двигунів для трамваїв та тролейбусів. Звичайні тягові двигуни суттєво відрізняються за енергосистемами, циклами струму, вентиляцією та збудженням. Тому при модернізації ТЕП трамваїв та тролейбусів шляхом запровадження індивідуальних підприємців їх повна стандартизація неможлива. Потрібно розробити кілька модифікацій СП.

Під час модернізації згаданого ТЕП введення АІН з ТАД та МРСК дає можливість стандартизувати електротягове обладнання, оскільки асинхронні електродвигуни постійного струму замінені. Потужність ТАД для електромобілів може становити 55-65 кВт, що покращує його динамічні властивості. У цьому випадку два асинхронні двигуни, з'єднані паралельно, живляться одним АІН.

1.8 Формулювання вимог до електропривода трамваю, систем автоматичного керування та автоматизації

Електродвигун, система керування і джерело живлення є головним електрообладнанням. Вимоги до нього визначаються умовами роботи трамваю, які, до речі, є досить важкими. Рухомий склад в цілому, експлуатується на лінії практично цілий рік до 20 годин на добу при будь-якій погоді, зустрічаються часті вмикання і вимикання електричних кіл, значні коливання напруги, широкі межі зміни струму, споживаного тяговим електродвигуном, та істотний нагрів електрообладнання.

При русі трамваю електрообладнання піддається ударним впливам трясіння та вібрації, що вимагає підвищеної механічної та електричної міцності деталей і вузлів електрообладнання. Внаслідок проникнення в електрообладнання забрудненого і вологого повітря, а іноді бруду, води і снігу, металеві деталі електрообладнання повинні мати надійне антикорозійне покриття, а ізоляційні та ізольовані деталі вологостійку ізоляцію.

Перераховані умови викликають необхідність формувати досить жорсткі вимоги до приводів рухомого складу і можуть бути сформульовані наступним чином [1]:

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. Струмоведучі деталі електроустаткування приводу повинні мати вологостійку ізоляцію, а всі металеві деталі - бути надійно захищені антикорозійним покриттям.

3. Комутаційна надійність тягових електродвигунів 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.[3]

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 повинен бути забезпечений доступ для оглядів і ремонтів. Їх конструктивне виконання повинно дозволяти швидко замінювати несправні вузли і деталі справними.

Висновок по розділу 1

В даному розділі було проведено

- 1 - аналітичний огляд тягового електропривода міського трамвая
- 2 - аналіз розвитку машинобудування на території України
- 3 - сформульовано основні вимоги застосовуються до ЕП трамвая

2 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

2.1 Розрахунок потужності

У першу чергу необхідно визначити зусилля яке необхідне для приведення трамваю у рух [20]. Для цього використовуємо як приклад 5-ти секційний трамвай з 4 ведучими осями Електрон Т5В64, маса цього трамваю складає 35500кг. Далі необхідно розрахувати масу заповненого вагона. Оскільки знаючи максимальну кількість пасажирів, а це – 287 чоловік, можемо розрахувати повну масу трамваю. Прийmemo середню вагу однієї людини 80 кг. Тоді споряджена маса трамваю буде розраховуватися наступним чином:

$$m_{\text{сп}} = m_{\text{тр}} + (m_{\text{л}} \cdot n_{\text{л}}) = 35500 + (80 \cdot 287) = 58460 \text{ кг}, \quad (2.1)$$

де $m_{\text{сп}}$ – споряджена маса; кг

$m_{\text{тр}}$ – маса вагону;

$m_{\text{л}}$ – маса однієї людини;

$n_{\text{л}}$ – кількість людей.

Прийmemo середнє прискорення – 1,2 м/с², тоді

$$F = \frac{(1 + \gamma) m_{\text{сп}} a_{\text{усп}}}{z} = \frac{1.12 \cdot 58460 \cdot 1.2}{4} = 19643 \text{ Н}, \quad (2.2)$$

де $(1 + \gamma)$ - коефіцієнт інерції обертових частин; $(1 + \gamma) = 1.12$;

$a_{\text{усп}}$ - середнє встановлене прискорення; $a_{\text{усп}} = 1.2 \text{ м/с}^2$;

$m_{\text{сп}}$ - споряджена маса трамваю; $m_{\text{сп}} = 58 \text{ т}$;

z – кількість тягових електродвигунів; $z=4$.

Попередня пускова потужність двигуна трамваю:

$$P = \frac{Fv_x}{\eta} = \frac{19643 \cdot 17}{0.879} = 379898 \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

де v_x - швидкість виходу двигуна на природну характеристику; $v_x = 17 \text{ м/с}$;

η - загальний ККД передачі трамваю

$$\eta = \eta_M \eta_p \eta_{\text{ЕЛ}} = 0.95 \cdot 0.93 \cdot 0.995 = 0.879, \quad (2.4)$$

В формулі (2.4) η_M – ККД карданного шарніру; $\eta_M = 0.95$;

η_p - ККД редуктора; $\eta_p = 0.93$;

$\eta_{\text{ЕЛ}}$ - ККД електричної передачі; $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0.995$.

Варто зазначити, що номінальна потужність тягового електродвигуна завдяки його перевантажувальній здатності зазвичай у декілька, а саме 3 рази нижча ніж пускова потужність у випадку із двигуном змінного струму. Тому, номінальна потужність двигуна розраховується наступним чином:

$$P = \frac{P_{\text{д}}}{k_{\text{ПЕР}}} = \frac{379898}{3} = 126632, \quad (2.5)$$

де $k_{\text{ПЕР}}$ - коефіцієнт перевантажувальної здатності двигуна; $k_{\text{ПЕР}} = 3$

Обираємо асинхронний двигун 4А280М4У3, з наступними параметрами:

Таблиця 2.1 – Параметри обраного асинхронного двигуна

Номінальна потужність:	$P_N = 132 \text{ кВт}$
Номінальна напруга:	$U_N = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів:	$p_n = 2$
Активний опір статора:	$R_1 = 0.0188 \text{ Ом}$
Активний опір ротора	$R_2 = 0.0154 \text{ Ом}$
Індуктивність статора	$L_1 = 0.0134 \text{ Гн}$

Індуктивність ротора:	$L_2 = 0.0135 \text{ Гн}$
Взаємоіндуктивність	$L_{12} = 0.0131 \text{ Гн}$
Коефіцієнт ковзання	$s_n = 0.023$

2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.1593 \text{ рад/с} \quad (2.6)$$

Швидкість ідеального неробочого ходу двигуна:

$$\omega_{\text{нх}} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157.0796 \text{ рад/с} \quad (2.7)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{\text{нх}} (1 - s_n) = 157.0796 \cdot (1 - 0.023) = 153.4668 \text{ рад/с} \quad (2.8)$$

в обертах за секунду:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{153.46}{6.28} = 24.43 \text{ об/с.} \quad (2.9)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{132000}{153.4668} = 860.1209 \text{ Нм.} \quad (2.10)$$

Швидкість руху трамваю при номінальній частоті обертання:

$$v_n = \frac{n_n}{K_p} \Pi = \frac{24.43}{7.36} \cdot 2.2 = 7.3 \text{ м/с} = 26.28 \text{ км/год,} \quad (2.11)$$

де K_p - передатне число редуктора; $K_p = 7.36$;

Π – периметр колеса:

$$\Pi = \pi D = 3.14 \cdot 0.7 = 2.2 \text{ м}, \quad (2.12)$$

де D – діаметр колеса, $D=0,7$ м.

Частота обертання двигуна при максимальній швидкості трамваю:

$$\omega_{max} = \omega_n \frac{v_{max}}{v_n} = 153.46 \frac{70}{26.28} = 408.75 \text{ рад/с}, \quad (2.13)$$

де v_{max} – максимальна швидкість трамваю $v_{max}=70$ км/год;

Приведене значення моменту інерції порожнього вагону $m_{тр}=35000$ кг:

$$J_{\Pi} = m_{тр} \frac{v_n^2}{\omega_n^2} = 35000 \frac{7.3^2}{153.46^2} = 79.19 \text{ кг/м}^2, \quad (2.14)$$

З врахуванням моменту інерції двигуна, приведені значення моменту інерції порожнього вагону на кожний двигун складає:

$$J'_{\Pi} \approx 20 \text{ кг/м}^2, \quad (2.15)$$

Приведене значення моменту інерції завантаженого вагону, $m_{сп}=57960$ кг:

$$J'_{\Pi} \approx 33 \text{ кг/м}^2. \quad (2.16)$$

Момент двигуна, який відповідає тяговій силі вагону масою 35000 кг:

$$M_T = \frac{35000 \cdot D}{2 \cdot z \cdot K_p} = \frac{35000 \cdot 0.7}{2 \cdot 4 \cdot 7.36} = 416.1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.17)$$

Максимальне прискорення порожнього вагону:

$$a = 1.8 \text{ м/с}^2. \quad (2.18)$$

Номінальне діюче значення фазної напруги:

$$U_{1_{нф}} = \frac{U_{1_{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (2.19)$$

Номінальне діюче значення струму статора:

$$I_{1_{н}} = \frac{P_{2_{н}}}{3 \cdot \eta \cdot U_{1_{нф}} \cdot \cos \varphi} = \frac{132000}{3 \cdot 0.93 \cdot 220 \cdot 0.9} = 239.609 \text{ А} \quad (2.20)$$

Момент опору двигуна при русі завантаженого трамваю на підйом нахилом 9%:

$$F_C = m_{\text{сп}} \cdot 0.09 = 5216.4 \text{ кг} = 51120.72 \text{ Н}, \quad (2.21)$$

$$M_C = F_C \cdot \frac{D}{2 \cdot z \cdot K_p} = 51120.72 \cdot \frac{0.7}{2 \cdot 4 \cdot 7.36} = 607.753 \text{ Нм}. \quad (2.22)$$

2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна

Математична модель електродвигуна отримана для Т-подібної схеми заміщення, що зображена на рисунку 2.1, в той час як приведені параметри із каталогу відповідають Г-подібній схемі заміщення, на рисунку 2.2. Перерахунок параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну виконуються наступним чином.

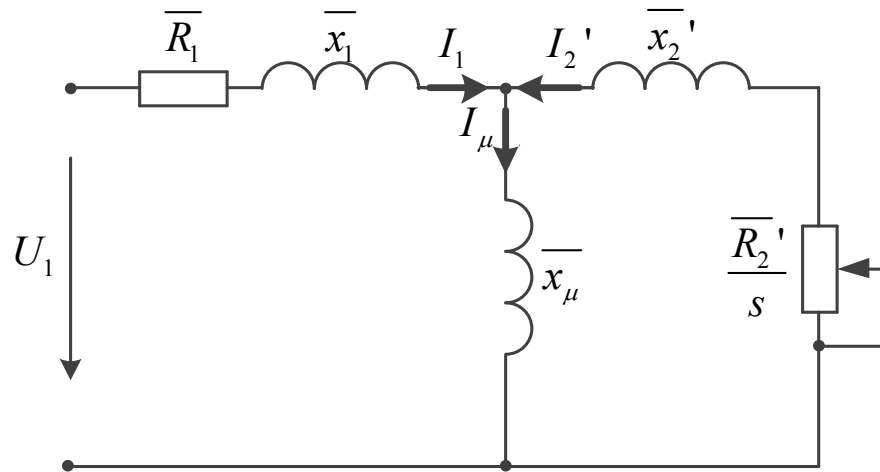


Рисунок 2.1 – Т-подібна схема заміщення АД

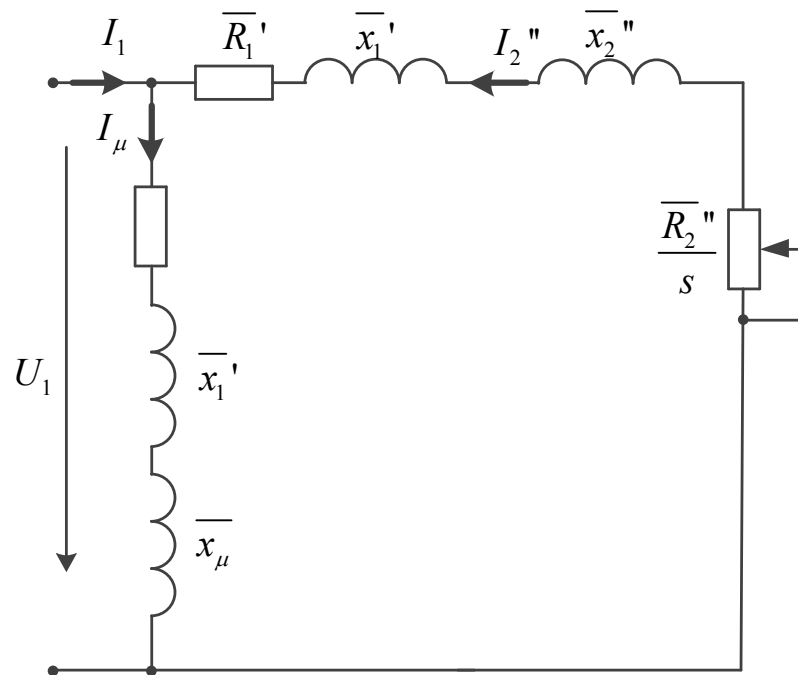


Рисунок 2.2 – Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення [22]:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{4.5 + \sqrt{4.5^2 + 4 \cdot 0.115 \cdot 2.1}}{2 \cdot 4.5} = 1.0249.$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення подано, як у [1].

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.076}{1.0249} = 0.0734, \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.098}{1.0249} = 0.0205,$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.13}{1.0249^2} = 0.1214, \quad \bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.06}{1.0249^2} = 0.0171.$$

Отримаємо значення параметрів Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U}{I_n} = 0.0734 \frac{220}{239.6096} = 0.1027 \text{ Ом},$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U}{I_n} = 0.0205 \frac{220}{239.6096} = 0.0188 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U}{I_n} = 0.1214 \frac{220}{239.6096} = 0.1307 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \bar{R}'_2 \frac{U}{I_n} = 0.0171 \frac{220}{239.6096} = 0.0157 \text{ Ом},$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U}{I_n} = 4.5 \frac{220}{239.6096} = 4.1203 \text{ Ом}.$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.1027}{314} = 0.00032702 \text{ Гн},$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_0} = \frac{0.1307}{314} = 0.00041617 \text{ Гн.}$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{4.1203}{314} = 0.0131 \text{ Гн.}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0131 + 0.00032702 = 0.0134 \text{ Гн,}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0131 + 0.00041617 = 0.0135 \text{ Гн.}$$

На основі проведених розрахунків розраховуємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0157}{0.0135} = 1.162 \text{ Ом/Гн,}$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0188}{0.0134} = 1.402 \text{ Ом/Гн,}$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.0134 \left(1 - \frac{(0.0131)^2}{0.0134 \cdot 0.0135}\right) = 0.000696 \text{ Гн,}$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0131}{0.0135 \cdot 0.000696} = 1394.21 \text{ 1/Гн,}$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0188}{0.000696} + 1.402 \cdot 0.0131 \cdot 1394.21 = 52.61 \text{ Ом/Гн}$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0131}{0.0135} = 1.455.$$

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення

Опір обмотки статора, Ом	$R_1 = 18.8 \cdot 10^{-3}$
Опір ротора, Ом	$R'_2 = 15.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$
Індуктивність статора, Гн	$L_1 = 13.4 \cdot 10^{-3}$
Індуктивність ротора, Гн	$L_2 = 13.5 \cdot 10^{-3}$
Індуктивність контуру намагнічування, Гн	$L_M = 13.1 \cdot 10^{-3}$
Номінальна фазна напруга, В	$U_{1\phi} = 220\text{В};$
Фазний струм, А	$I_{1\phi\text{н}} = 239.609 \text{ А};$

Висновок по розділу 2

- 1 – Розраховувалося зусилля, з яким мають справлятися обранні трамвайні двигуни.
- 2 – Після цього було отримано живлення одного з чотирьох двигунів та зроблено вибір, на основі якого було обрано двигун 4A280M4У3.
- 3 – Обчислювалися моменти інерції та опір шасі.
- 4 – Також було розраховано параметри двигуна, які необхідні для проведення моделювання в наступних розділах.

3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Розрахунок автономного інвертора напруги

Амплітудне значення струму статора:

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 239.609 = 338.859 \text{ А.} \quad (3.1)$$

Приймаючи перевантажувальну здатність для підйомника $k_{ovl} = 1,5$ будемо розраховувати максимальний струм на виході перетворювача

$$I_{max} = k_{ovl} \cdot I_{na} = 1,5 \cdot 239,6096 = 359.4144 \text{ А.} \quad (3.2)$$

Обираємо IGBT за критерієм

$$I_C > I_{max}, U_{ce_{max}} > U_{ce}, \quad (3.3)$$

де I_C та $U_{ce_{max}}$ – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-

емітер, які представлені в паспортних даних IGBT. Абсолютно необхідний антипаралельний діод, який в більшості випадків вбудований в той самий корпус, що і транзистор, і не вимагає окремого розрахунку. Обираємо по каталогу [16] IGBT модуль типу IRG5U400SD12B з необхідними параметрами $U_{ce} = 1200 \text{ В}$, $I_C = 400 \text{ А}$.

3.2 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра

При ввімкненні перетворювача забезпечимо заряд конденсаторів фільтра з обмеженим струмом. Для цього необхідно включити в цю ланку постійного струму резистор з шунтуючим ключем. Схема для керування реле представлена на рисунку 3.1

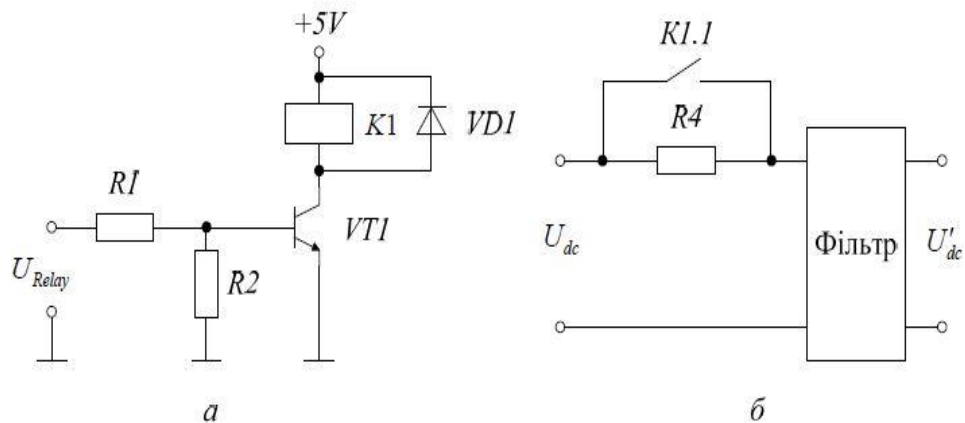


Рисунок 3.1 – Зарядне коло конденсаторів фільтра

Опір зарядного резистора дорівнює:

$$R_4 = \frac{U_{dcn}}{I_{cmax}} = \frac{1200}{400} = 3 \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

По напрузі U_{KE} та по максимальному струму колектора, що відповідає пусковому струму реле $I_{Kmax} = I_{\text{РЕЛЕ ПУСК}}$, обираємо транзистор BSP52 [24] з параметрами $U_{co} = 80 \text{ В}$, $I_c = 1000 \text{ мА}$.

Реле K1 обирається залежно від струму в ланці постійного струму $I_{dc} = 410.256 \text{ А}$.

3.3 Ємнісний фільтр

Для того щоб знизити пульсації лінійного струму, та для захисту схеми від перенапруг контактної мережі служить індуктивно-ємнісний фільтр, що складається з індуктивності LF і батареї конденсаторів СА-СВ.

Параметри індуктивності:

- величина індуктивності – 1 мГн;
- струм тривалого режиму – 500 А.

Параметри батареї конденсаторів:

- загальна встановлена ємність батареї – 2200 мкФ;
- максимально допустима напруга батареї – 2200 В;
- подвійна амплітуда пульсацій напруги – 50 В;
- частота пульсацій – 1 кГц.

Батарея зібрана з конденсаторів типу E50.R23-115N10 з наступними параметрами:

- номінальна ємність конденсатора – 1100 мкФ;
- номінальна напруга – 1100 В.

Кожен конденсатор батареї зашунтовано резистором величиною 40 кОм, потужністю 10 Вт.

3.4 Розрахунок параметрів баластного опору

Визначаємо опір $R_B = 2 \text{ Ом}$.

Максимальний струм баластного опору - 450 А.

Потужність баластного опору - 34 кВт.

Зазначена потужність визначена, як:

$$P = \frac{R_B}{T} \int_0^T I_R^2 dt \quad (3.5)$$

де I_R - струм резистора в режимі динамічного гальмування; T - час динамічного гальмування.

Для відводу потужності баластного резистора необхідно сконструйовати з вентилятором примусового обдування.

3.5 Розрахунок датчиків струму та напруги

Датчики струму обираються на основі максимального струму, що вимірюється, тобто діапазон вимірювання датчика перевищує максимальний струм, дозволений в системі. Щоб виміряти струми на виході інвертора, обираємо максимальне значення струму.

Вибір датчика струму буде здійснено на сайті по розрахованому значенню струму I_{dc} . Виходячи з цього, обираємо датчик струму HCS-K5-300A [17].

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму буде побудований з використанням датчика типу LV-25 P.

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{pmax} = 14$ мА. Через це значення опору резистора R_1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Зі стандартного ряду резисторів обираємо $R_1 = 56$ кОм.

3.6 Опис силової схеми електропривода

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму, інтегрованого в привід з проміжним контуром, представлена на рисунку 3.2. Асинхронний електропривод заснований на перетворювачі частоти, який поєднує в собі перетворювач частоти та блок управління для класичного визначення електричного приводу. В свою чергу перетворювач поділяється на дві основні компоненти:

- датчики вихідного струму, вхідний фільтр, нерегульований випрямляч, ланцюг навантаження, ємність фільтра випрямляча, інвертор, датчик постійного

струму, клема, силова секція, схема управління та гальванічне розділення сигналів від автоматичного вимикача та управління інвертором;

- регулятор управління, який містить в собі власний цифровий регулятор, який, як правило, базується на цифровому процесорі сигналу та схемі кондиціонування

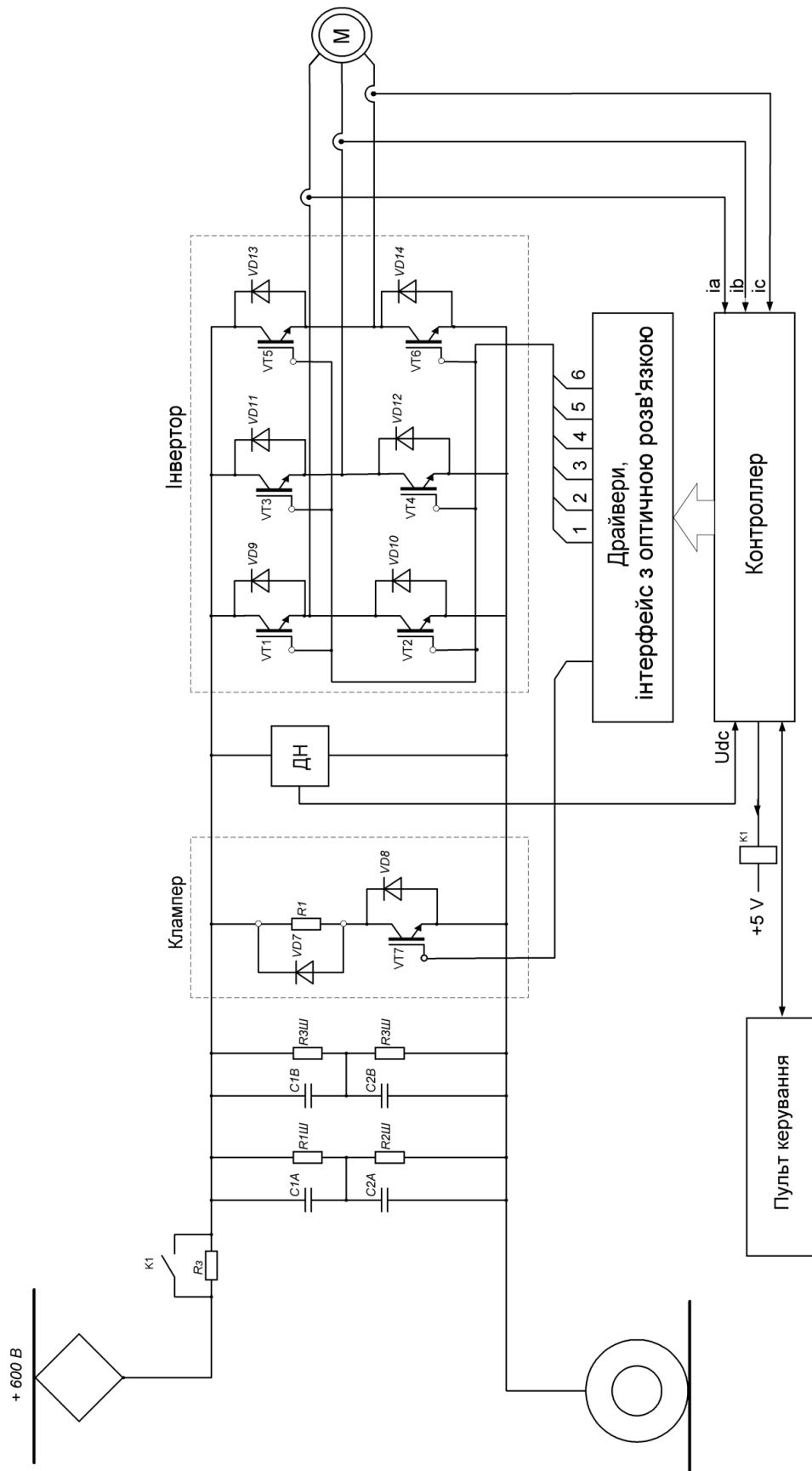


Рисунок 3.2 – Функціональна схема керування асинхронним двигуном

Висновок по розділу 3

1 – Було проведено розрахунок та вибір необхідних компонентів для живлення перетворювача частоти, а саме: модулі IGBT, ємність та індуктивність фільтрів напруги, опір дроселя, та датчики струму і напруги.

2 – Створено функціональну схему електроприводу.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Для конструювання контурів відпрацювання струмів статора визначимо:

похибки відпрацювання струмів статора:

$$\begin{aligned}\tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^* \\ \tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*\end{aligned}$$

а також закон зміни керуючих дій в (4.1) у вигляді

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_{1q} + v_d \\ \omega_0 i_{1d} + v_q \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Враховуючи (4.1), визначимо електромеханічну підсистему АД, задану рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \tilde{\psi}_q i_{1d}) \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q\end{aligned} \quad (4.2)$$

а також електромагнітну підсистему у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\psi}_q + \alpha L_m i_{1d} \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q + v_d\end{aligned} \quad (4.3)$$

Синтез електромагнітної підсистеми. За умови непрямого полеорієнтування в силу визначення перші два рівняння в (4.3) запишуться

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d + \omega_2\tilde{\psi}_q + \alpha L_m \dot{i}_{ld}^* + \alpha L_m \tilde{\dot{i}}_{ld} - \alpha\dot{\psi}^* - \dot{\psi}^* \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - \omega_2\tilde{\psi}_d \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n \omega + \omega_2
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\text{де: } \omega_2 = \alpha L_m \frac{\dot{i}_{lq}}{\psi^*}.$$

Сформувавши в (4.4) задане значення струму статора по осі (d) як

$$\dot{i}_{ld}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha\dot{\psi}^* + \dot{\psi}^*), \tag{4.5}$$

рівняння в (4.24) набувають вигляду

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d + \omega_2\tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{\dot{i}}_{ld} \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - \omega_2\tilde{\psi}_d
\end{aligned} \tag{4.6}$$

За умов ідеального струмового керування $\tilde{i}_{ld} = 0$ положення рівноваги $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q)^T = 0$ системи (6.26) є глобально експоненційно асимптотично стійким.

Таким чином необхідно забезпечити керування польовою компонентою струму статора так, що помилка відпрацювання \tilde{i}_{ld} асимптотично затухає в нуль. Рівняння динаміки \tilde{i}_{ld} з (4.3) запишеться у вигляді

$$\dot{\tilde{i}}_{ld} = -\gamma\tilde{i}_{ld} + \alpha\beta\tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega\tilde{\psi}_q + v_d - \gamma\dot{i}_{ld}^* + \alpha\beta\dot{\psi}^* - \dot{i}_{ld}^*, \tag{4.7}$$

де похідна \dot{i}_{ld}^* розрахована в силу (4.5).

Сформувавши керуючу дію v_d в формі

$$\begin{aligned}
\dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{ld} \\
v_d &= -k_{idl} \tilde{i}_{ld} - x_d + \gamma i_{ld}^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{ld}^* \\
\dot{i}_{ld}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*),
\end{aligned} \tag{4.8}$$

отримаємо рівняння динаміки помилок відпрацювання координат в електромагнітній підсистемі АД у вигляді

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_{ld} \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d \\
\dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{ld} \\
\dot{\tilde{i}}_{ld} &= -k_{idl} \tilde{i}_{ld} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q,
\end{aligned} \tag{4.9}$$

де $k_{id} = \gamma + k_{idl}$

З структури (4.9) слідує висновок: для усіх обмежених (за припущенням) траєкторій кутової швидкості ω існує значення коефіцієнта k_{id} таке, що забезпечує асимптотичність положення рівноваги (4.9)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_{ld}, x_d) = 0.$$

Таким чином, цілі відпрацювання модуля потокозчеплення $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_d = 0$ та асимптотичної орієнтації за полем машини $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_q = 0$ забезпечуються. Не важко також встановити, що структура двох останніх рівнянь (4.5) лінійності при $(\tilde{\psi}_d = \tilde{\psi}_q = 0)$.

Синтез електромеханічної підсистеми. Алгоритм відпрацювання моменту при непрямому векторному керуванні формується так, як і в разі прямого зі спостерігачем. Рівняння динаміки похибок відпрацювання моменту та струму при цьому запишуться у вигляді

$$\begin{aligned}\tilde{M} &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_{lq}^* + \tilde{i}_{lq}) + \psi^* \tilde{i}_{lq} - \tilde{\psi}_q (i_{ld}^* + \tilde{i}_{ld}) \right] \\ i_{lq}^* &= \frac{2}{3} \frac{L_2}{p_n L_m} \frac{M^*}{\psi^*}\end{aligned}\quad (4.10)$$

$$\dot{\tilde{i}}_{lq} = -\gamma \tilde{i}_{lq} + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega (\psi^* + \tilde{\psi}_d) - \gamma i_{lq}^* - \dot{i}_{lq}^* + v_q \quad (4.11)$$

Аналогічно, як це виконано для прямого полеорієнтування, керуюча дія в (4.11) формується у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq} \\ v_q &= -k_{iq1} \tilde{i}_{lq} - x_q + \gamma i_{lq}^* + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{lq}^*\end{aligned}\quad (4.12)$$

де $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі (q).

Рівняння динаміки помилок відпрацювання моменту та струму при цьому запишуться у вигляді

$$\begin{aligned}\tilde{M} &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_{lq}^* + \tilde{i}_{lq}) + \psi^* \tilde{i}_{lq} - \tilde{\psi}_q (i_{ld}^* + \tilde{i}_{ld}) \right] \\ \dot{\tilde{i}}_{lq} &= -k_{iq} \tilde{i}_{lq} - x_q - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{ld} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{lq} \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq}\end{aligned}\quad (4.13)$$

З (4.13) встановлюємо, що за умови $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_{ld}, x_d) = 0$ забезпечується асимптотичність відпрацювання $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{lq}, x_q, \tilde{M}) = 0$, тобто цілі керування моментом також досягаються.

Повні рівняння динаміки похибок відпрацювання з (4.9), (4.13) мають вигляд:

для електромагнітної підсистеми

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_{ld} \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d \\
\dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{ld} \\
\dot{\tilde{i}}_{ld} &= -k_{id} \tilde{i}_{ld} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q,
\end{aligned} \tag{4.14}$$

для електромехаричної підсистеми

$$\begin{aligned}
\tilde{M} &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (\tilde{i}_{lq}^* + \tilde{i}_{lq}) + \psi^* \tilde{i}_{lq} - \tilde{\psi}_q (\tilde{i}_{ld}^* + \tilde{i}_{ld}) \right] \\
\dot{\tilde{i}}_{lq} &= -k_{iq} \tilde{i}_{lq} - x_q - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{ld} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{lq} \\
\dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Об'єднані рівняння алгоритму векторного керування з непрямою орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора запишуться з виразів (4.1), (4.5), (4.8), (4.10), (4.12) і вміщують:

Асимптотично лінеаризуючий регулятор за вимірюваним виходом

$$\begin{pmatrix} u_{la} \\ u_{lb} \end{pmatrix} = e^{J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} u_{ld} \\ u_{lq} \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{pmatrix} = e^{-J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \end{pmatrix}; \tag{4.16}$$

$$\begin{pmatrix} u_{ld} \\ u_{lq} \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_{lq} + v_d \\ \omega_0 i_{lq} + v_q \end{pmatrix} \tag{4.17}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = p_n \omega + \frac{\alpha L_m i_{lq}}{\psi^*} \tag{4.18}$$

Алгоритм відпрацювання моменту

$$i_{lq}^* = \frac{1}{\mu_1 \psi^*} M^*; \quad \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2};$$

$$v_q = -k_{iq} \tilde{i}_{lq} - x_q + \gamma i_{lq}^* + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{lq}^* \tag{4.19}$$

$$\dot{x}_q = k_{iiq} \tilde{i}_{lq} \tag{4.20}$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right) \quad (4.21)$$

Алгоритм відпрацювання модуля потокозчеплення

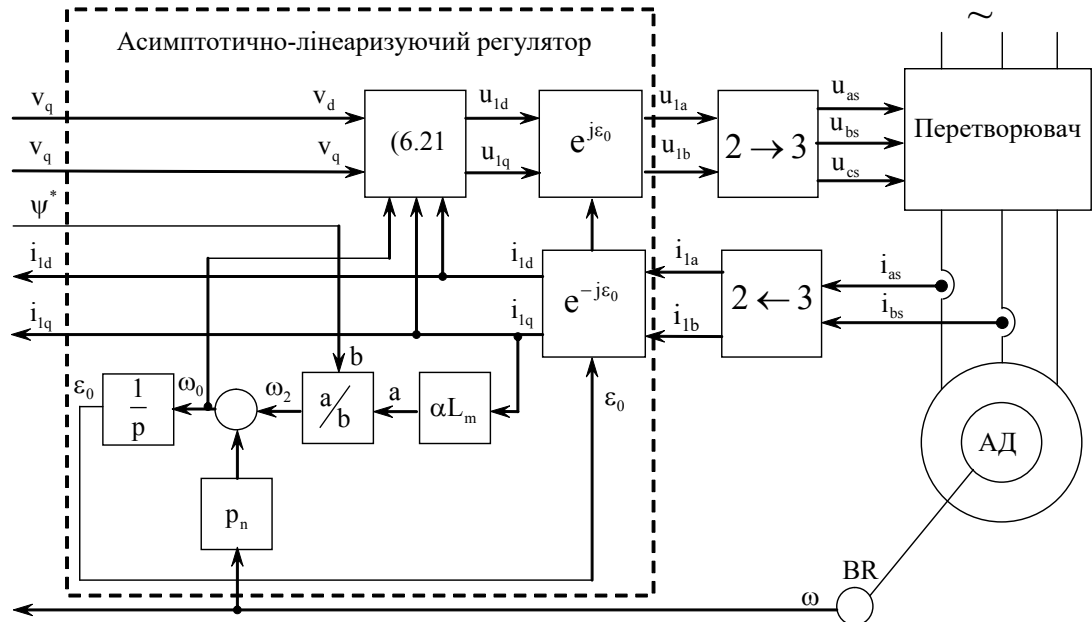
$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) \quad (4.22)$$

Алгоритм регулятора струму по осі d

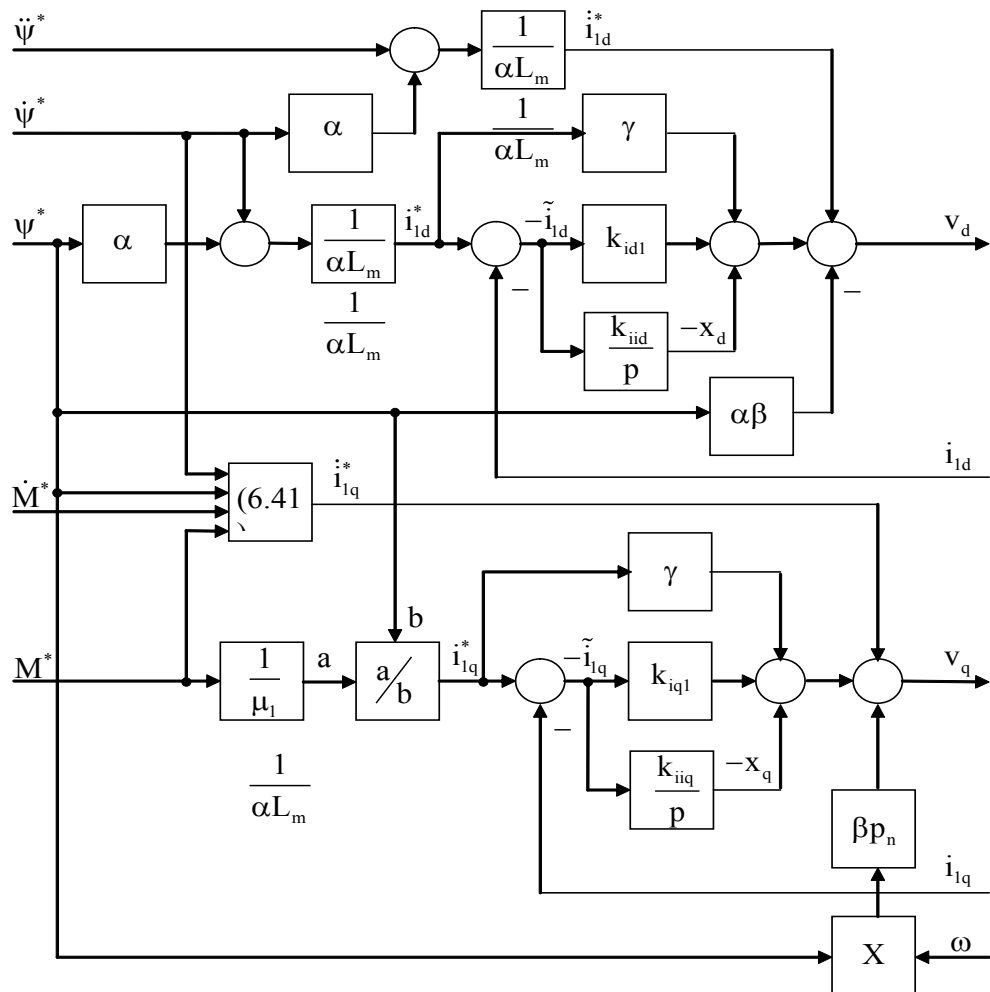
$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{1d} \\ v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d + \gamma i_{1d}^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*)$$

Структурна схема системи відпрацювання моменту та потокозчеплення при непрямому векторному керуванні АД приведена на Рис.4.1



a)



б)

Рисунок – 4.1 Структурна схема системи відпрацювання моменту та потокозчеплення при непрямому векторному керуванні: а) асимптотично-лінеаризуючий регулятор; б) регулятор моменту та потокозчеплення

Висновок по розділу 4

У цьому розділі розглядаються принципи реалізації векторних систем управління асинхронними двигунами. Здійснюється синтез регулятора. Створено структурну схему алгоритму непрямого векторного управління.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У цьому розділі проведено дослідження статичних та динамічних режимів ЕМС шляхом моделювання у програмному середовищі Matlab/Simulink. Був виконан дослід – розгін, підтримання швидкості та гальмування завантаженого трамвайного вагону. Для дослідження та моделювання була використана стандартна модель АД з непрямым керуванням моментом із SimPowerSystem з необхідними змінами для моделювання трамвайного приводу. Загальний вигляд схеми керування представлено на рисунку 5.1.

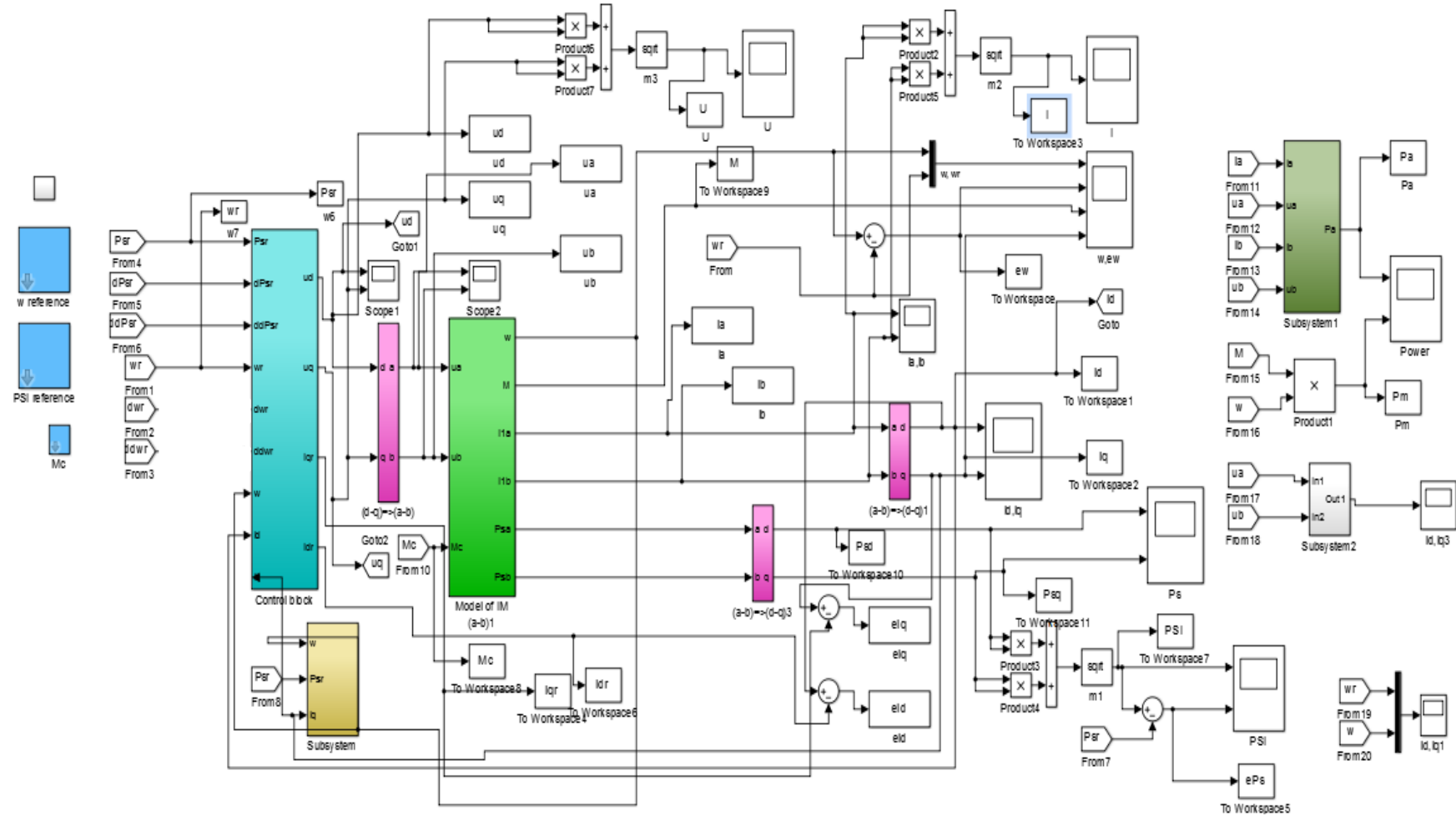


Рисунок 5.1 – Функціональний блок «IM direct control»

5.1 Дослідження перехідних процесів при розгоні завантаженого вагону

Для досягнення мети аналізу роботи АД було проведено серію тестів, а саме виконано накидання та скидання рушійного моменту для розгону, підтримка швидкості руху та гальмування противмиканням. Розгін проводиться з початку моделювання, спочатку підтримується стале значення швидкості рушійним моментом, котрий потім скидається. Після цього застосовується електричне гальмування, у результаті цих дій швидкість спадає до нуля. На отриманих нижче графіках побачимо графіки кутової швидкості обертання ротора двигуна та лінійної швидкості трамвайного вагону, моменту двигуна та його струму. Тести проведені за умови повної посадки пасажирів для демонстрації показників роботи електродвигуна

- під час початкового інтервалу часу 0-0.1с машина збуджується
- починаючи з $t=0.2\text{с}$ без навантаження розганяється по заданій траєкторії швидкості, яка має нульове початкове значення і досягає 90 рад/с
- в момент часу $t=0.5\text{с}$ до валу двигуна прикладається постійний номінальний момент навантаження

Перехідні процеси в АД з алгоритмом непрямого векторного керування при $\omega^*=\omega_n=157\text{рад/с}$ представлені нижче

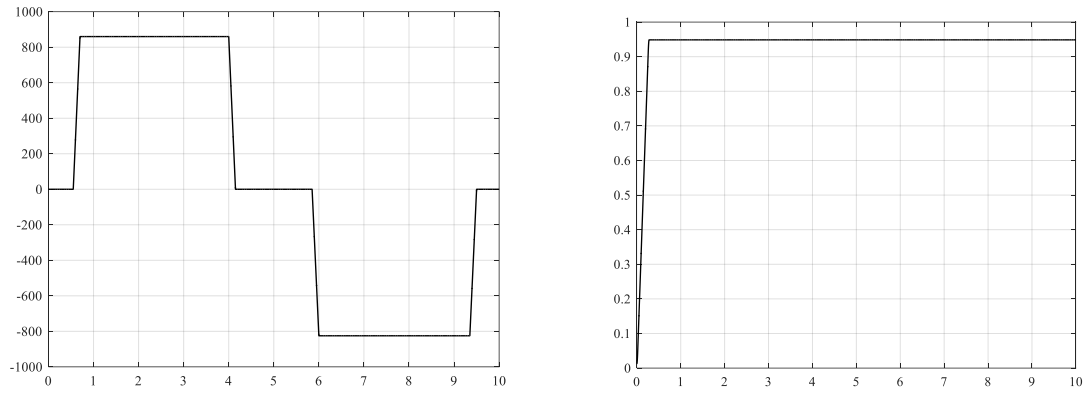


Рисунок 5.2 – Задана траєкторія моменту. Нм(ліворуч), задана траєкторія поточозчеплення(праворуч)

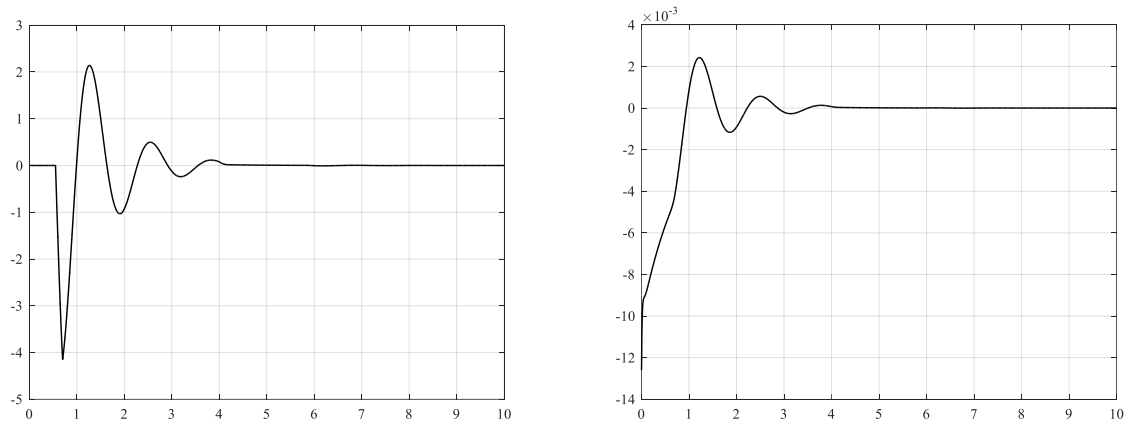


Рисунок 5.3 – Похибка відпрацювання моменту(ліворуч), похибка відпрацювання поточозчеплення,Вб (праворуч)

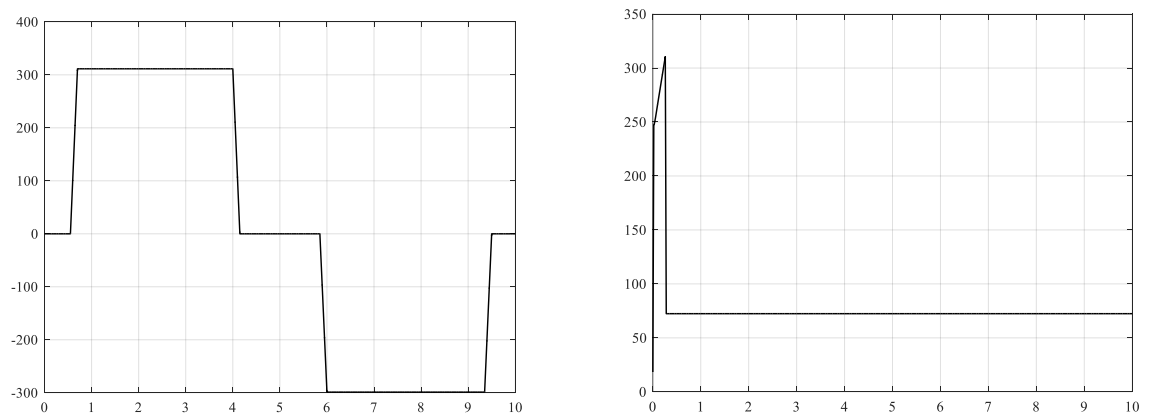


Рисунок 5.4 – Заданий струм i_q^* , А(ліворуч), заданий струм i_d^* , А (праворуч)

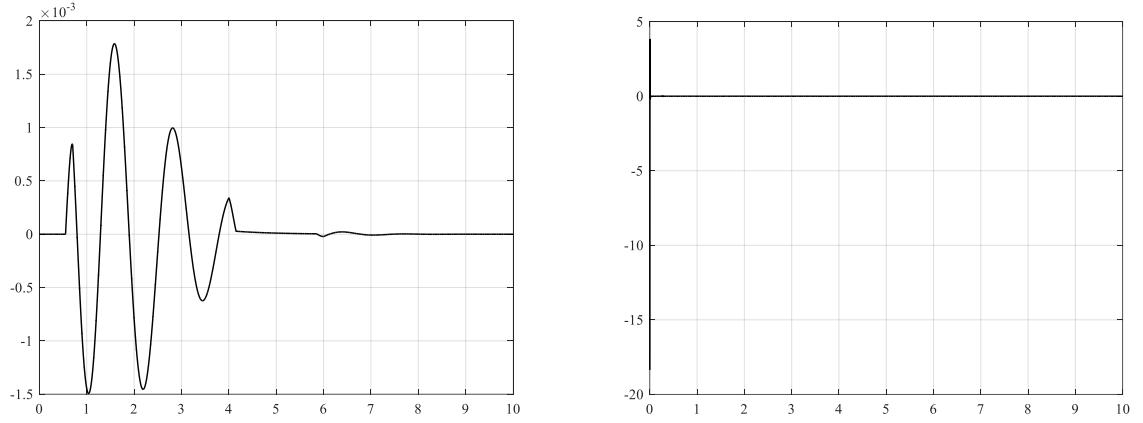


Рисунок 5.5 – Похибка відпрацювання струму i_q , А (ліворуч), струму i_d , А (праворуч)

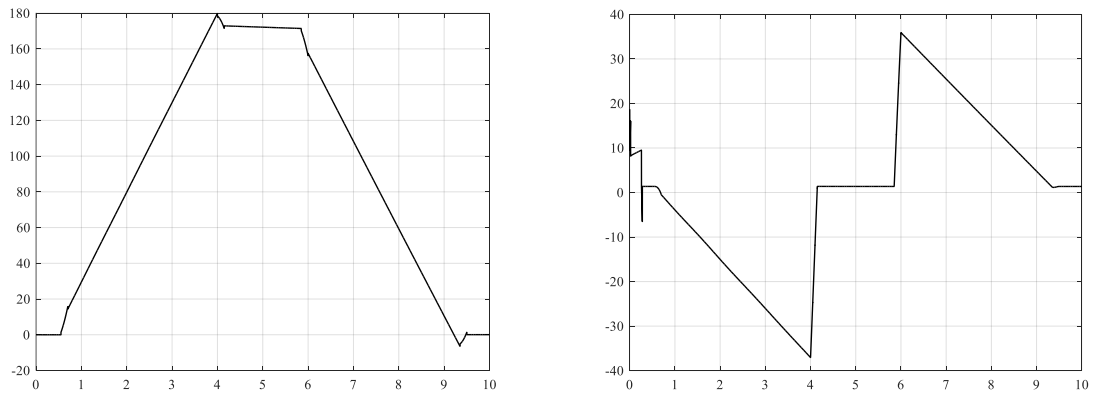


Рисунок 5.6 – Напруга U_q , В(ліворуч), напруга U_d , В(праворуч)

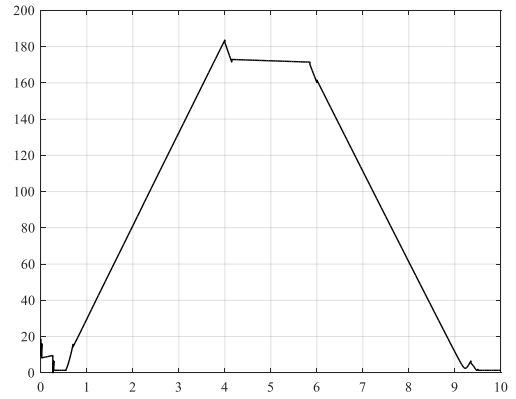
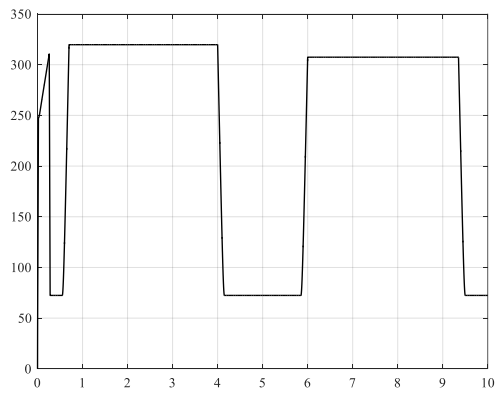


Рисунок 5.7 – Модуль струму статора I , А (ліворуч), модуль напруги статора U , В (праворуч)

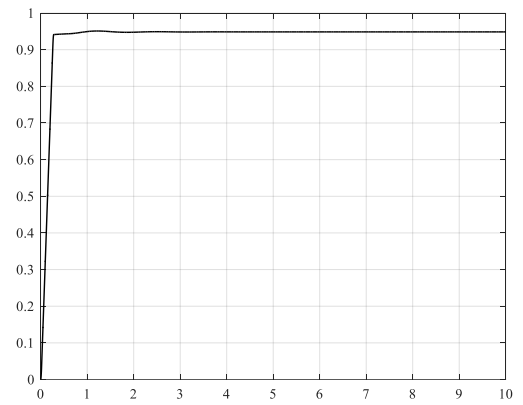
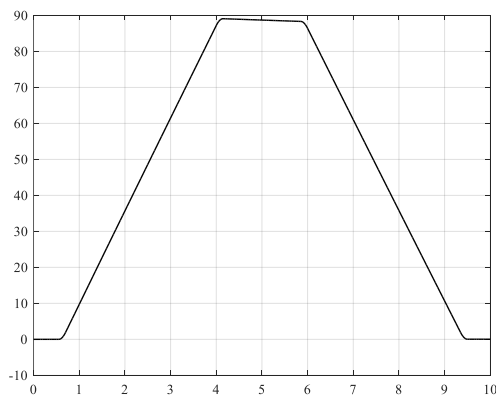


Рисунок 5.8 – Кутова швидкість ротора, рад/с (ліворуч), модуль потокозчеплення (праворуч)

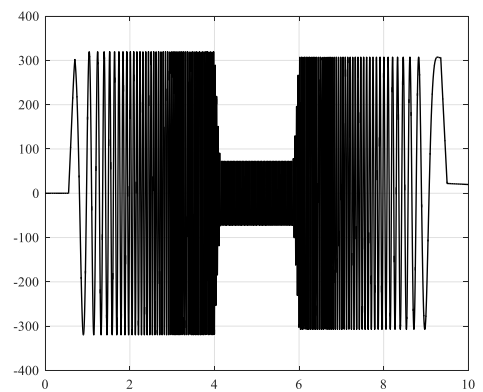
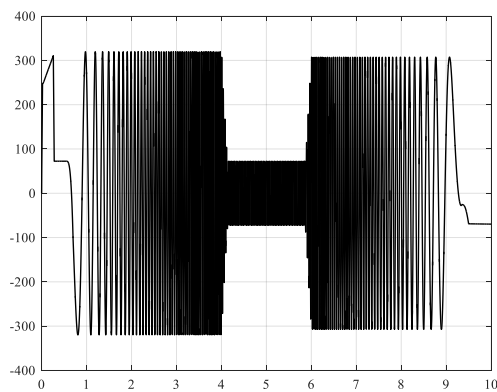


Рисунок 5.9 – Миттєві значення струму I_a , А & I_b , А

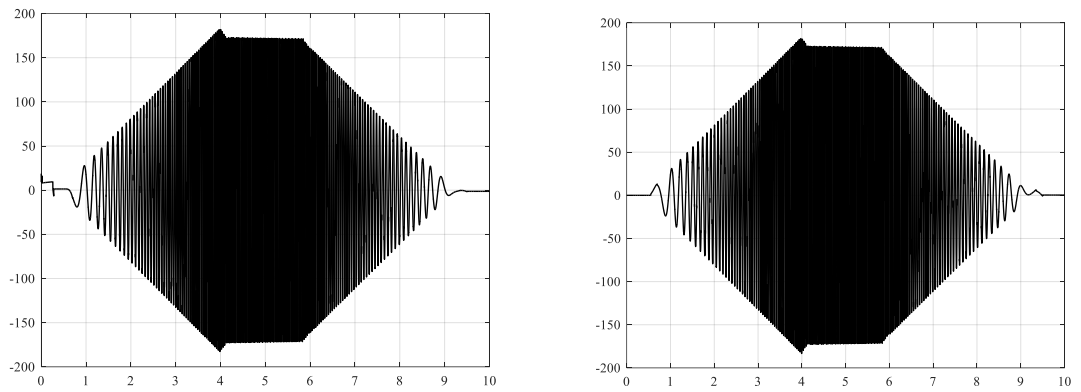


Рисунок 5.10 – Миттєві значення фазної напруги U_a, B & U_b, B

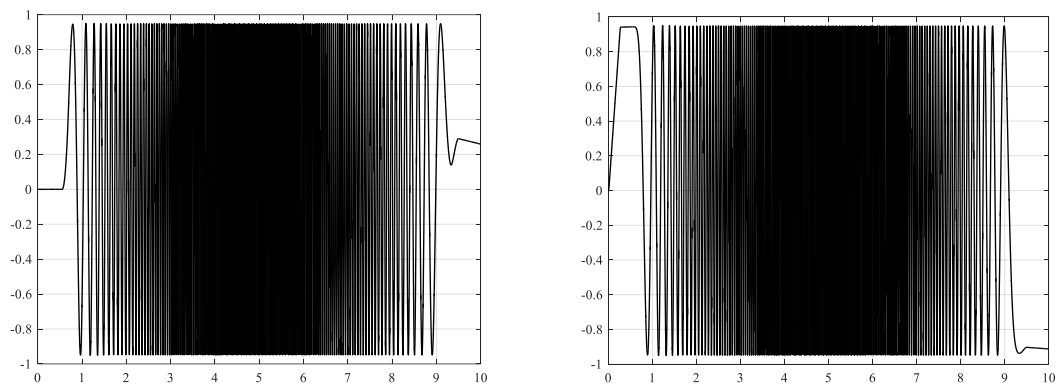


Рисунок 5.11 – Перехідний процес потокозчеплення Ψ_a & Ψ_b

Перехідні процеси в АД з алгоритмом непрямого векторного керування при $\omega^* = 0.5\omega_n = 78.5 \text{ рад/с}$ представлені нижче

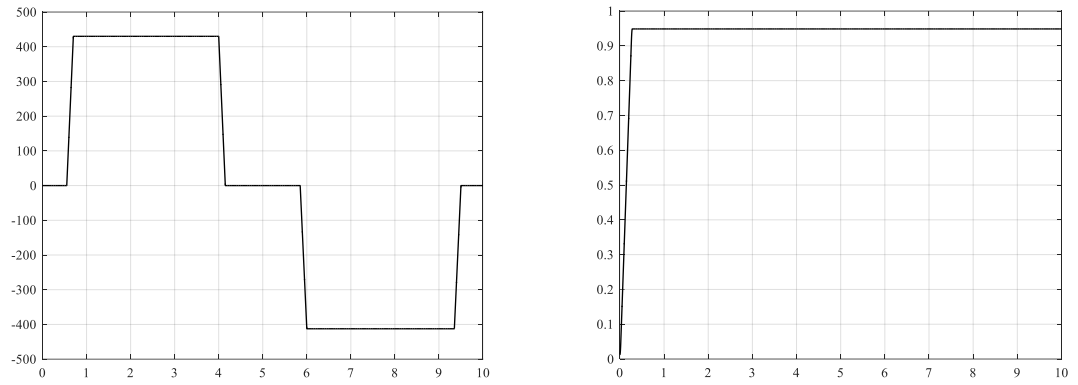


Рисунок 5.9 – Задана траєкторія моменту, Нм(ліворуч), задана траєкторія поточозчеплення(праворуч)

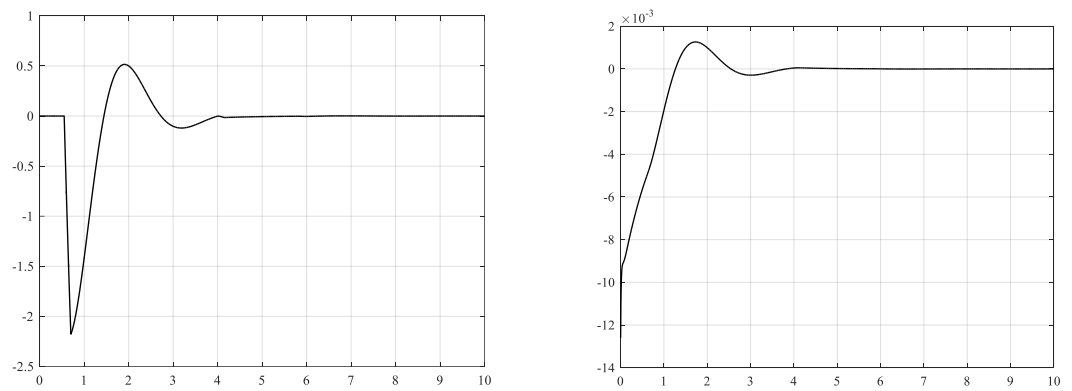


Рисунок 5.10 – Похибка відпрацювання моменту(ліворуч), похибка відпрацювання поточозчеплення, Вб (праворуч)

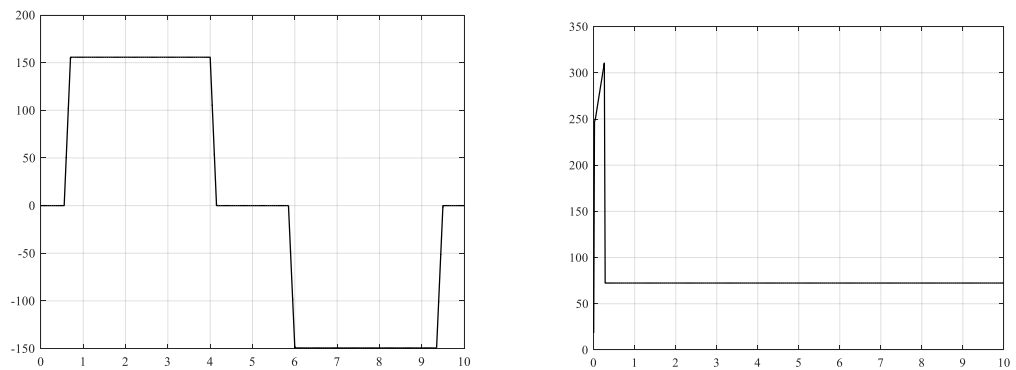


Рисунок 5.11 – Заданий струм i_q^* , А(ліворуч), заданий струм i_d^* , А (праворуч)

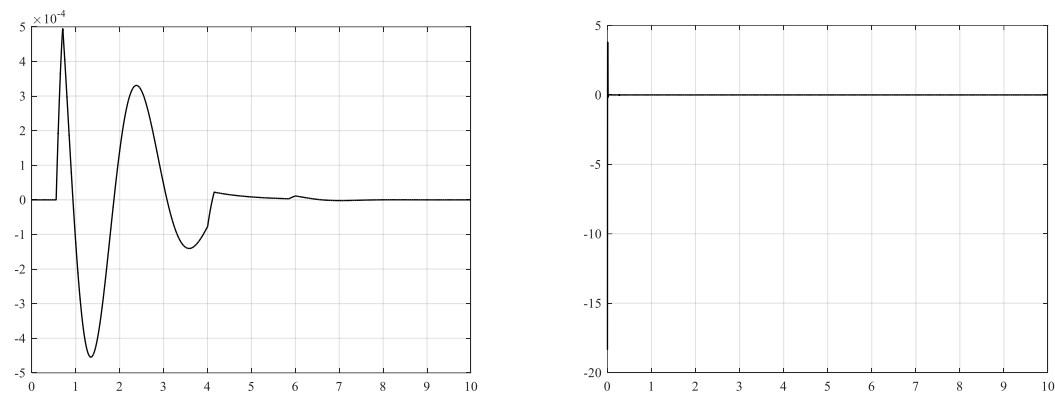


Рисунок 5.12 – Похибка відпрацювання струму i_q , А (ліворуч), струму i_d , А (праворуч)

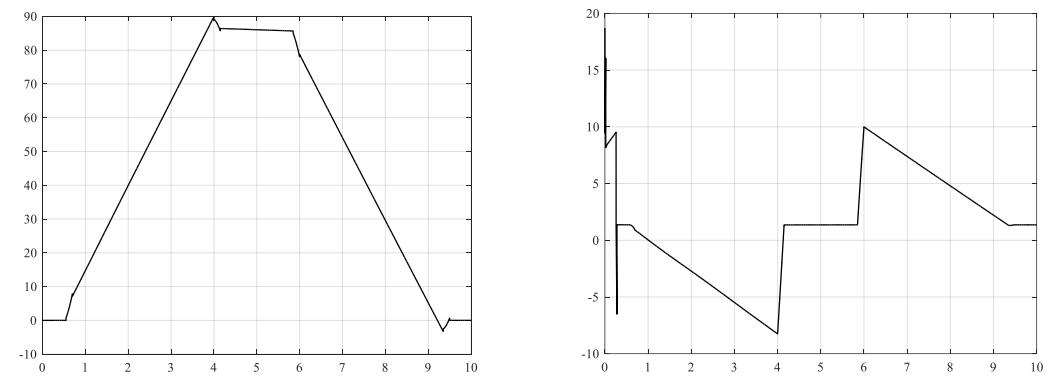


Рисунок 5.13 – Напруга U_q , В(ліворуч), напруга U_d , В(праворуч)

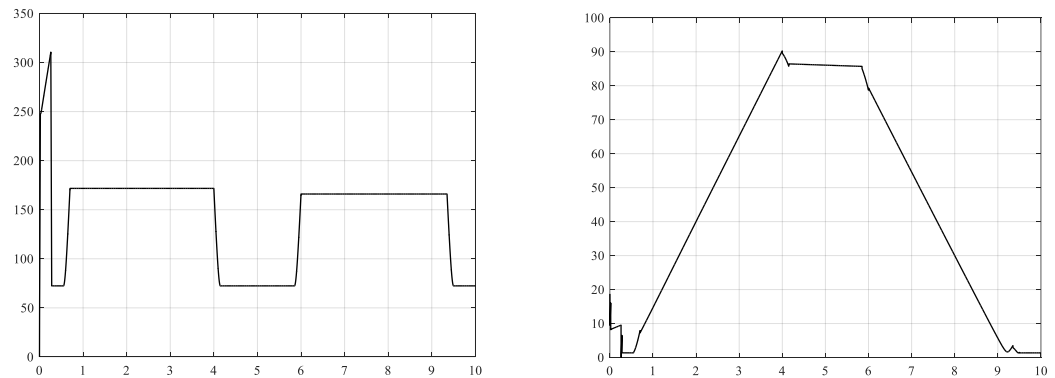


Рисунок 5.14 – Модуль струму статора I, А (ліворуч), модуль напруги статора U, В(праворуч)

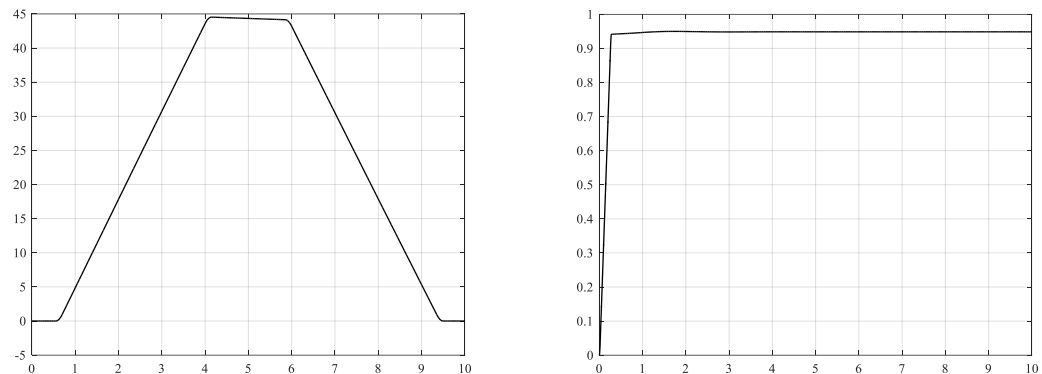


Рисунок 5.15 – Кутова швидкість ротора, рад/с(ліворуч), модуль потокозчеплення(праворуч)

Виконавши аналіз отриманих графіків отримали, що пульсації механічного моменту можуть призвести до швидшого старіння обертових частин, що у свою чергу призведе до потреби більш частого проведення технічних оглядів, або – заміну деталей. Також за результатами досліджень ми можемо зробити висновки, що графіки швидкостей мають траєкторії другого порядку, бо момент накладається поступово. Як бачимо при зменшенні заданих параметрів електродвигун відпрацьовує в нормальному режимі

Висновок до розділу 5

У данному розділі було проведено моделювання розгону, підтримки швидкості вагона трамвая. Обраний двигун відпрацьовує коректно, але при цьому форма струму має значні завади. При розгоні до більших швидкостей

перехідні процеси будуть аналогічними за винятком тимчасового збільшення збільшення струму, що допустимо млту що цей режим буде короткочасним, а сам двигун здатен забезпечити певне перевантаження.

ВИСНОВКИ

У вступі було проаналізовано типи і складові систем керування приводом трамваю, а також різновиди алгоритмів керування. Останні хоч і вимагають складної та дорогої системи керування, але у свою чергу можуть забезпечувати суттєве зменшення втрат при розгоні двигуна за рахунок зменшення пускових струмів, а також дозволяють керувати двигуном за обраним законом зміни траєкторії руху в залежності від умов, які визначає технологічний процес. Виходячи з розглянутих вимог було вирішено, що для керування приводом трамваю буде використовуватись пряме керування моментом (DTC). Також було описано особливості тягового приводу та рейкового міського транспорту в цілому, сформульовано основні вимоги до електроприводу двигуна трамвая.

1. В результаті ознайомлення з особливостями електроприводу трамваю було розраховано зусилля, яке потрібно подолати двигунам для розгону трамвая, після чого за отриманою розрахунковою потужністю було підбрано двигун 4A280M4Y3 (один з чотирьох) потужністю 132 кВт та розраховано його параметри схеми заміщення для подальшого моделювання.

2. Було побудовано функціональну схему електропривода та проведено опис її роботи. В цьому розділі було проведено розрахунок та вибір таких силових елементів для перетворювача частоти, як: IGBT модулі, ємності та індуктивності для фільтрів напруги, баласний опір, а також давачі струму та на напруги.

3. Результати моделювання в таких режимах, як: розгін та гальмування порожнього вагону, розгін з подальшим рухом за рахунок інерції (вільний вибіг), а також розгін та підтримання сталої швидкості при русі на підйом з величиною нахилу 9% показали, що обраний двигун цілком підходить для поставленої задачі, тобто запасу його потужності вистачає для розгону розрахункового трамваю навіть у найскладніших умовах. Під час

розгону виникає тимчасове збільшення струму, що допустимо, оскільки воно є короткочасним. Для моделювання була використана стандартна модель асинхронного двигуна з прямим керуванням моментом із SimPowerSystem з певними модифікаціями для моделювання трамвайного приводу.

4. За результатами моделювання було встановлено, що реальне значення струму коли двигун знаходиться під навантаження відповідає розрахунковому значенню. З отриманих графіків можна побачити сильні коливання моменту, які місцями складають 25% від заданого значення, та високочастотні завади у формі струму, які можна усунути використанням фільтру. Спотворення форми струму може погіршити техніко-економічні показники приводу – поява вищих гармонік призводить до додаткового нагріву двигуна, що в свою чергу може призвести до швидшого старіння двигуна та можливого несвоєчасного виходу його з ладу. Отже, в дипломному проекті було проведено розробку асинхронного приводу трамвая з подальшим моделюванням різних режимів роботи та вибором елементів силової частини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 – Вірченко В.В. Основні напрямки реформування міського електричного транспорту України. Коммунальное хозяйство городов. Вып. 53. К.: Техніка, 2003.
- 2 – Компанія «Татра-Юг» (вебсайт підприємства). URL: <http://tatrayug.com.ua/index.php/uk>
- 3 – Л. Карплюк, Б. Панченко Особливості застосування частотнокерованого асинхронного електроприводу для тягових механізмів
- 4 – Корпорація «Електрон» (вебсайт підприємства) URL: <http://electron.ua>
- 5 – Веклич В. Ф. , Збарский Л. В. Проблемы и перспективы развития трамвайного транспорта в Украинской ССР — К.:Общество «Знание» УССР, 1980.
- 6 – Тархов С., Козлов К., Оландер А. Электротранспорт Украины. Энциклопедический путеводитель. — К.: Варто, 2011.
- 7 – Никитин В. В, Пармас А. Я.-Ю., Пивоваров В. М., Саттаров Р. Р., Безредукторный тяговый электропривод городского рельсового транспорта // Современные технологии – транспорту, 2013. №1, С. 3138.
- 8 – Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором // Железные дороги мира. – № 4. – 2002. С. 29–31.
- 9 – Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.
- 10 – L. Morel, H. Godfroid, J. M. Kauffmann Field Oriented Control of a Double fed Asynchronous Machine. Modelling and Implementation / [IFAC Proceedings Volumes](#), Volume 30, Issue 6, 1997, P. 1101-1106.
- 11 – Abdelsalam A.Ahmed*ByungKwon Koh**Jung-SuKim**YoungIl Lee Finite Control Set-Model Predictive Speed Control for Induction Motors with Optimal Duration, / [IFAC-PapersOnLine](#), [Volume 50, Issue 1](#), P. 7801-7806.

- 12 – Dimitrios Karagiannis, Alessandro Astolfi Rotor resistance estimation for current fed induction motors / [IFAC Proceedings Volumes](#), Volume 38, Issue 1, 2005, P. 77-82.
- 13 – Hou-Tsan Lee, Li-Chen Fu, Su-Hau Hsu Adaptive SPR speed/position control of induction motor / [IFAC Proceedings Volumes](#), Volume 35, Issue 1, 2002, P. 513-518.
- 14 – Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблем // Техн. електродинаміка. Київ, 1999. №27, С. 27–32.
- 15 – Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости // Техн. електродинаміка. Київ, 1999. № 4, С. 26–31.
- 16 – Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. – New York: Oxford University Press Inc, 2000. С. 9-12.
- 17 – P. Vas, “Sensorless Vector and Direct Torque Control” (London, U.K.: Oxford Science Publication, 1998).
- 18 – Карандеев Д. Ю., Энгель Е. А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, №5 2015.
- 19 – Ефремов И. С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчёт). — изд. 3, испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1969.
- 20 – Балденков А. А. Структурные методы линеаризации динамических характеристик асинхронных электроприводов с частотным управлением 2019.
- 21 – Подземный транспорт шахт и рудников. Справочник / Под общ. Ред. Г. Я. Пейсаховича, И. П. Ремизова. — М. : Недра, 1985. 565с.

- 22 – Блантер С.Г. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности // М., Недра, 1980. 478с.
- 23 – Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1991.
- 24 – Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям по тяговым расчетам по дисциплине «Основы электрической тяги», Харьков, ХНАГХ, 2008. 86с.