

**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)

“ ” _____ 20__ 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: Векторно-керований асинхронний електропривод садового міні-трактора

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-п81

(шифр групи)

Серга Богдан Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник к.т.н., доцент Приймак Богдан Іванович

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



(підпис)

Консультант _____

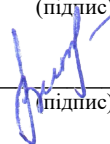
(назва розділу)

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

(підпис)

Рецензент старший викладач Котлярова Вікторія Володимирівна


(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



Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141. 8117.013.БР	Пояснювальна записка	72	
3	A1	141. 8117.013.БР	Креслення загального виду та функціональна схема	1	
4	A1	141. 8117.013.БР	Схема електрична принципова	1	
5	A1	141. 8117.013.БР	Графіки результатів моделювання	1	

				141.8117.013.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Серга Б. П.	<i>Б.П. Серга</i>		Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Приймак Б. І.				2	72
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП _____	
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему:

Векторно-керований асинхронний електропривод садового міні-трактора

Київ – 2021 р.

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)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Сергію Богдану Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: « Векторно-керований асинхронний електропривод садового міні-трактора»,

керівник проекту Приймак Богдан Іванович, к.т.н., доцент,

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

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

2. Термін подання студентом проекту 12.06.2021 _____

3. Вихідні дані до проекту: повна маса трактора – 240 кг, Радіус більшого колеса 0,23 м, радіус меншого колеса 0,19 м, маса більшого колеса 25, кг, маса меншого колеса 10 кг, передатне відношення диференціала 6,3, передатне відношення редуктора 4,7, момент інерції тягового АД 0,05 кгм², максимальне прискорення/сповільнення 1, м/с², номінальна усталена швидкість , км/год 8,3.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ; 1. Аналітичний огляд проблеми та формування технічних вимог до тягового асинхронного електроприводу (АЕП) садового міні-трактора; 2. Розрахунок потужності електродвигуна, акумуляторної

батареї та вибір силового обладнання; 3. Побудова функціональної схеми САК АЕП міні-трактора; 4. Математичний опис об'єкта керування, розроблення структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого АЕП міні-трактора; 5. Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в САК АЕП міні-трактора; Висновок; Використана література.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема електрична принципова; Схема загального виду та функціональна схема; Графіки результатів моделювання.

6. Дата видачі завдання 30 березня 2021 р. _____

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд проблеми та формування технічних вимог до тягового асинхронного електроприводу (АЕП) садового міні-трактора	10.04.21	
2.	Розрахунок потужності електродвигуна, акумуляторної батареї та вибір силового обладнання	20.04.21	
3	Побудова функціональної схеми САК АЕП міні-трактора	25.04.21	
4	Математичний опис об'єкта керування, розроблення структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого АЕП міні-трактора	10.05.21	
5	Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в САК АЕП міні-трактора	20.05.21	
6	Завдання з охорони праці та навколишнього середовища. Підготовка графічної частини	30.05.21	
7	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка презентації дипломного проекту	07.06.21	

Студент


(підпис)

Богдан СЕРГА

Керівник проекту


(підпис)

Богдан ПРИЙМАК

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 72, рисунків – 18, таблиць – 5

В даному дипломному проекті було досліджено тяговий асинхронний електропривід садового міні-трактора. Був проведений аналітичний огляд. Здійснено вибір двигуна. Розроблена функціональна схема системи а також виконано синтез регуляторів для векторного керування. Результати моделювання підтвердили працездатність і ефективність спроектованої системи. Виконання даного дипломного проекту забезпечувались за допомогою використання наступних програм: Microsoft Office Word, Microsoft Office Visio, Matlab.

ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ,
ЕЛЕКТРОТРАКТОР, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ

					<i>141.8117.013.БР</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<div style="text-align: center;"> Векторно-керований асинхронний електропривод садового міні-трактора. Реферат </div>		
Розробив	Серга Б. П.	<i>Б.Серг.</i>					
Перевірів	Приймак Б. І.						
Н. Контр.							
Затв.	Пересада С. М.						
					<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
						6	72
					НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського АЕМС-ЕП ЕП-п81		

SUMMARY

The diploma project contains: pages – 72, figures - 18, tables - 5

In this diploma project the traction asynchronous electric drive of a garden mini-tractor was investigated. An analytical review was conducted. The engine is selected. The functional scheme of the system is developed and the synthesis of regulators for vector control is performed. The simulation results confirmed the efficiency and effectiveness of the designed system. Execution of this diploma project was provided by using the following programs: Microsoft Office Word, Microsoft Office Visio, Matlab.

AC ELECTRIC DRIVE, ELECTRIC TRANSPORT, FREQUENCY CONVERTER, PULSE WIDTH MODULATION, ELECTRIC TRACTOR, VECTORONE

					<i>141.8117.13.BW</i>			
	<i>Letter</i>	<i>No of doc.</i>	<i>Sign.</i>	<i>Date</i>				
<i>Devel.</i>	<i>B. Serha</i>	<i>Temp.</i>			Vector-controlled asynchronous electric drive of a garden mini-tractor Summery	<i>L.</i>	<i>Page</i>	<i>Pages</i>
<i>Cheked</i>	<i>B. Pryimak</i>						7	72
<i>N. Control</i>						NTUU KPI them Igor Sikorsky AEMS-EP EP-p81		
<i>Approved</i>	<i>S. Peresada</i>							

Зміст

ВСТУП.....	12
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (АЕП) ТРАКТОРА.....	13
1.1 Загальні відомості про електротрактор	13
1.2 Огляд основних функціональних та допоміжних елементів	16
1.3 Системи керування асинхронним ЕП	20
1.3.1 Класичне векторне керування АД (Field Oriented Control)	20
1.3.2 Пряме керування моментом DTC (Direct Torque Control)	23
1.4 Технічні вимоги до електроприводу трактора	26
Висновки до розділу.....	28
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА, АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ	29
2.1 Розрахунок потужності двигуна по циклу руху	29
2.2 Перевірка правильності вибору двигуна	33
2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	34
2.4 Розрахунок акумуляторної батареї	37
Висновки до розділу	43
3 ПОБУДОВА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ САК АД ЕЛЕКТРОТРАКТОРА	44
3.1 Побудова функціональної схеми	44
3.2 Синтез регуляторів системи векторного керування	46
3.2.1 Синтез регулятора струму I_d	46
3.2.2 Синтез регулятора струму I_q	48
3.2.3 Синтез регулятора потокозчеплення ротора	50
3.2.4 Синтез регулятора моменту ЕП	52
Висновки до розділу	53

4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО- КЕРОВАНОВОГО АЕП ТРАКТОРА.....	54
4.1 Математична модель асинхронного двигуна	54
4.2 Пряме векторне керування моментом	55
Висновки до розділу.....	61
5 СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ В MATLAB/SIMULINK, ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ І ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В САК АЕП ТРАКТОРА.....	62
5.1 Розрахунок номінальних даних двигуна	62
5.2 Дослідження системи прямого векторного керування електроприводом трактора у режимі косіння з мульчуванням	63
5.3 Дослідження системи прямого векторного керування електроприводом трактора у режимі пересування	66
Висновки до розділу.....	69
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- (a-b) – позначення стаціонарної нерухомої системи координат статора
- (d-q) – позначення синхронної системи координат;
- ε_0 – кутове положення синхронної системи координат (d-q) відносно (a-b);
- ω_0 – кутова швидкість обертання системи координат (d-q);
- ω_2 – кутова швидкість ковзання;
- ω – кутова швидкість обертання ротора;
- ω^* – задана швидкість обертання ротора;
- $\tilde{\omega}$ – похибка відпрацювання кутової швидкості ротора;
- M – момент асинхронного двигуна;
- M^* – заданий момент двигуна;
- \tilde{M} – похибка відпрацювання моменту двигуна;
- M_c – статичний момент навантаження;
- $|\psi|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора;
- $|\hat{\psi}|$ – оцінене значення модуля вектора потокозчеплення ротора;
- ψ^* – задане потокозчеплення ротора;
- $\tilde{\psi}$ – похибка відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора;
- i_1 – вектор струму статора;
- u_1 – вектор напруги статора;
- I_1 – модуль струму статора;
- i_a, i_b – компоненти вектора струму статора в системі (a – b);
- i_d, i_q – компоненти вектора струму статора в системі (d – q);
- u_a, u_b – компоненти вектора напруги статора в системі (a – b);
- u_d, u_q – компоненти вектора напруги статора в системі (d – q);
- ψ_a, ψ_b – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі (a – b);
- ψ_d, ψ_q – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі (d – q);

R_1	– активний опір статора;
R_2	– активний опір ротора;
L_1	– індуктивність статора;
L_2	– індуктивність ротора;
L_m	– індуктивність ланки намагнічування;
J	– повний момент інерції двигуна;
АД	– асинхронний двигун;
АКБ	– акумуляторна батарея;
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння;
АЕП	– асинхронний електропривід
DTC	– пряме керування моментом
IGBT	– біполярний транзистор з ізолюваним затвором

ВСТУП

З розвитком цивілізації, що спостерігається останнім часом, росте кількість транспортних засобів, і, тим самим, збільшується вплив на навколишнє середовище. З року в рік кількість автомобілів та сільськогосподарських машин збільшується на 5 - 8%, і за цієї умови все більшої актуальності набуває задача щодо усунення шкоди сучасного транспорту з ДВЗ - забруднення атмосфери відпрацьованими вихлопними газами. Зростання рівня забруднення повітря у великих містах дуже гостро поставило питання щодо розробки комплексу заходів для зменшення кількості токсичних речовин, що викидаються в атмосферу.

Через цю проблему питання розробки електричних транспортних засобів в наш час є особливо актуальним. Електротранспорт конструкційно простіший, а отже це означає, що він володіє більшою надійністю і, відповідно, простіший в обслуговуванні. Значна проблема розвитку електричного транспорту – це питання акумуляторних батарей, які дорого коштують та мають досить невеликий запас ходу та менший ресурс.

В якості привідних двигунів застосовують, як правило, тягові асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Ці двигуни характеризуються високою надійністю, простотою обслуговування та низькою вартістю. Для реалізації складних алгоритмів керування привідним двигуном створюють спеціальні силові перетворювачі за допомогою силовій електроніки. Енергетична ефективність двигуна та дальність ходу транспортного засобу залежать від алгоритму керування.

Мета даного дипломного проекту – вибір двигуна і проведення аналізу алгоритму прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна міні-трактора.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (АЕП) ТРАКТОРА

1.1 Загальні відомості про електротрактор

Електротрактор (електричний трактор) – безрейковий транспортний засіб, що приводиться в рух за допомогою електричного двигуна, який живиться від хімічного джерела електричного струму, вбудованого в конструкцію трактора. Характеризується великою силою тяги та низькою швидкістю. Можна умовно класифікувати на садові трактори та міні-трактори (райдери).

Райдер - невеликий і малопотужний трактор з сидінням для користувача. Відрізняється хорошою прохідністю, маневреністю і простотою в управлінні і обслуговуванні (регулярне миття і заміна масла). Райдер дешевше і легше повноцінного трактора, а й термін служби у нього коротше. Використовується переважно для стрижки газонів, заготівлі сіна, удобрення ґрунту, прибирання снігу – тобто для обробки порівняно невеликих ділянок і важкодоступних місць.

Садовий трактор - великий і потужний, часто забезпечується закритою кабіною для оператора. Це більш дорога і складна в експлуатації техніка, яка використовується з безліччю додаткового навісного та причіпного обладнання, що розширює її функціонал. Використовується для виконання широкого спектру завдань, в тому числі: культивування і орання ґрунту, прибирання трави і снігу, заготівля сіна, роботи по навантаженню. Садовий трактор - оптимальне рішення для обробки значних площ і виконання великого обсягу робіт.

Електротрактори як і електромобілі та електробуси є частиною найперспективніших типів транспортних засобів на електричній тязі і являються майже єдиним рішенням проблеми забруднення атмосфери, за рахунок відсутності камери згоряння палива, як в ДВЗ. Через це в наш час багато виробників тратять велику кількість сил на вирішення конструктивних проблем електротранспорту. Проводять роботи над створенням акумуляторних батарей з малим часом заряду, в тому числі з використанням наноматеріалів. Також

розглядають можливість використання як джерела струму не акумуляторів, а іоністорів (суперконденсаторів), які володіють дуже малим часом заряду, високою ефективністю (більше ніж 95%) і набагато більшим ресурсом циклів заряду-розряду (до кількох сотень тисяч).

Історично, перший електротрактор було сконструйовано у Всесоюзному інституті електрифікації сільського господарства доктором технічних наук Листовим П.М. та інженером Стеценко В.Г. на базі гусеничного СХТЗ-НАТІ, на раму якого встановили електродвигун потужністю 38 кВт, на напругу 1000 вольт трифазного змінного струму і барабан зі гнучким кабелем, захищені обтічним капотом. Кабель під'єднувався до польової електростанції чи пересувної трансформаторної підстанції, яка, в свою чергу, підключалась до високовольтної мережі, і в процесі роботи намотувався і розмотувався спеціальним механізмом з направляючою стрілою. Підстанція підключалась до високовольтних проводів за допомогою струмозйомного стовба. Кабель разом зі стрілою мав довжину до 750 метрів. Без переміщення підстанції трактор міг обробляти 15-60 гектар землі, а при використанні додаткового кабельного візку – понад 200 га. Але подібна конструкція себе не виправдала, і тому було прийняте рішення про відмову від такого виду електротракторів [1]. Але з початку 2015 року американська компанія-виробник сільськогосподарської техніки John Deere спроектувала та розробила сучасні електротрактори з акумуляторними батареями, які з початку 2016 випускаються серійно.

В межах даного бакалаврського проекту буде розглянута система з живленням від акумуляторних батарей.

В переважній більшості випадків в тракторах використовується електродвигунна система електроприводу, яка зображена разом з механічною частиною трактора на рис.1.1. [2]

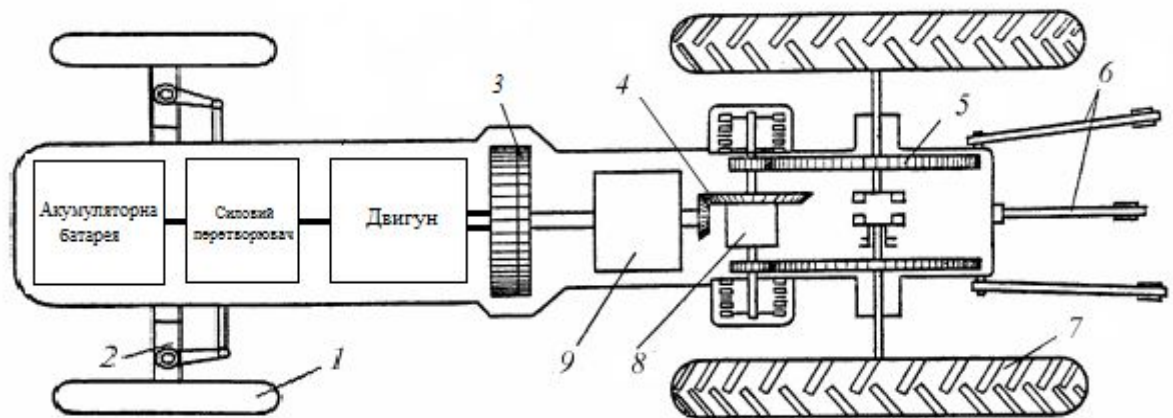


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення основних агрегатів на вузлів електротрактора

На рисунку зображено:

1. Керуюче колесо
2. Передній міст
3. Зчеплення
4. Центральна передача
5. Кінцева передача
6. Механізм навісу
7. Ведуче колесо
8. Диференціал
9. Коробка передач

Під час проектування електричного трактора буде використовувється одноступінчастий реверсивний редуктор. Його призначення - зменшення швидкості обертання та збільшення крутного моменту. Диференціал слугує для розділення потужності на колесах при поворотах – внаслідок цього збільшується керованість та маневреність. Інформація, яка збирається з датчиків та органів керування, обробляється силовим перетворювачем та системою керування, після чого формується керуючий сигнал певної амплітуди і частоти на двигун. Також

система керування регулює процес рекуперації енергії при гальмуванні, контролює заряд та розряд акумуляторної батареї.

До переваг електротракторів можна віднести наступні пункти:

- Майже необмежений ресурс роботи електродвигуна
- Екологічна чистота електродвигуна
- Безшумна робота
- Високий ККД електродвигуна
- Можливість рекуперації енергії при гальмуванні

Електротрактори мають наступні недоліки:

- Обмежена дальність та запас енергії на борту електротрактора
- Велика вага та низька питома енергоємність акумуляторів
- Не вирішена проблема утилізації батарей
- Вища ціна порівняно з моделям з ДВЗ
- Підвищені витрати енергії під час розгону, негативний вплив великих струмів на термін роботи акумуляторів
- Створення інфраструктури заряду електротранспорту

1.2 Огляд основних функціональних та допоміжних елементів

Більшість сучасних електротракторів використовують кузов, шасі та інші механічні вузли від серійних виробників тракторів з ДВЗ. Лиш невелика кількість моделей проектувались як електротрактори з самого початку. Але й ті, й інші мають схожий склад основних функціональних і допоміжних компонентів - вони зображені на рисунку 1.2

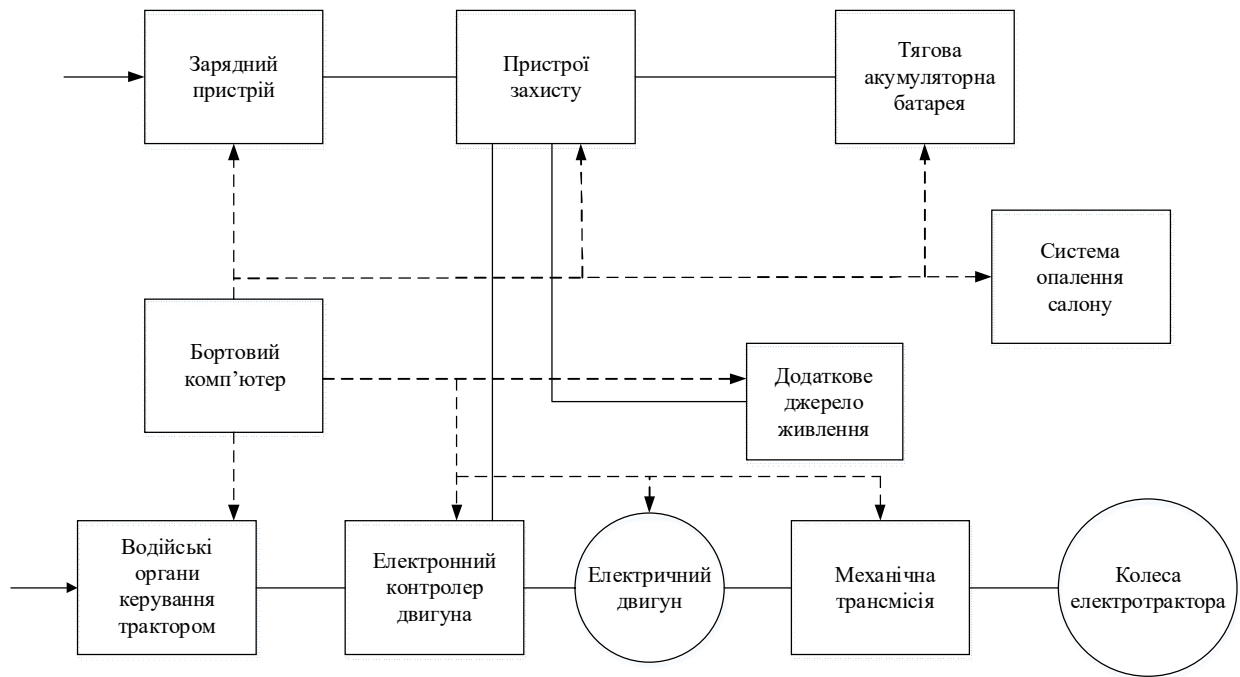


Рисунок 1.2 – Функціональні елементи трактора

На рисунку позначено:

1. Зарядний пристрій. Виконує функцію перетворення змінної напруги зовнішньої мережі в постійну напругу для заряду акумуляторних батарей - тягової і допоміжної. Містить в собі ланцюг підключення до мережі змінного струму, випрямляч, регулятор зарядного струму (напруги), систему управління зарядом (переважно мікропроцесорну) для контролю рівня заряду, параметрів батареї, відключення при виникненні аварійної ситуації. Зарядний пристрій може розміщуватися на борту електротрактора. В такому випадку бортовий комп'ютер керує процесом заряду, а мережа змінного струму підключається до трактора.

2. Пристрій захисту (блок запобіжників і реле). Складається з вимикачів, реле, запобіжників, що включені між акумулятором та електричною схемою - споживачами. При виникненні несправностей ланцюг змінного струму та акумуляторні батареї відключаються. В електротранспорті металеві частини корпусу не використовуються в якості провідника (маси) – вся електрична проводка ізолювана від корпусу, колісні покришки (шини) також ізолюють корпус від дороги. Порушення ізоляції між електричним колом і корпусом в одній точці не призводить до появи значних струмів, які могли б розрядити

аккумулятори. Пробій ізоляції у другій точці може бути причиною замикання аккумуляторної батареї і становить небезпеку для користувача.

3. Тягова аккумуляторна батарея. Забезпечує електроенергією двигун електротрактора. Є велика кількість різновидів аккумуляторів, жоден з них повністю не відповідає усім вимогам і немає чіткого критерію вибору оптимального аккумулятора. На виході батареї знімають постійну напругу порядку 600В. Великий час заряду, недостатня ємність та мала питома енергія аккумуляторів вже значний час обмежують зусилля конструкторів електромобілів та тракторів. Існують наступні типи аккумуляторів для тягових аккумуляторних батарей які використовуються на сьогоднішній день:

- свинцево-кислотні аккумулятори (СК);
- нікель-хлоридні аккумулятори (Ni-Cl).
- нікель-кадмієві аккумулятори (Ni-Cd);
- нікель-металгідридні аккумулятори (Ni-MH);
- натрієво-сірчані аккумулятори (Na-S);
- залізонікелеві аккумулятори (Ni-Fe);

Перспективні джерела енергії для електромобілів:

- літій-іонні сульфідні аккумулятори;
- рідинні паливні елементи;
- літій-полімерні аккумулятори;
- інерційні маховики;
- суперконденсатори (іоністори) надвеликої ємності.

4. Бортовий комп'ютер. Відповідає за контроль стану основних функціональних компонентів і бортових систем електромобіля. За необхідності ініціює засоби захисту.

5. Додаткове джерело електроенергії (зазвичай допоміжна аккумуляторна батарея на 12 В). Відповідає за електроживлення освітлювальних приладів, панелі приладів, склопідйомників, склоочисників і т. д.

6. Система опалення салону. Складається з електричного нагрівача і кондиціонера.

7. Електронна система керування. Забезпечує виконання в електричному тракторі кількох функцій, спрямованих на забезпечення безпеки, енергозберігання та комфорт:

- керування високою напругою;
- керування плавним прискоренням;
- регулювання тяги;
- забезпечення оптимального режиму руху;
- управління рекуперативним гальмуванням;
- оцінка заряду акумуляторної батареї;
- контроль використання енергії.

Конструктивно система об'єднує в собі ряд вхідних давачів, блок керування і виконавчі пристрої різних систем трактора. Вхідні давачі оцінюють положення педалей газу та гальма, селектора перемикання передач, тиск у гальмівній системі, ступінь заряду акумуляторної батареї. На основі цих та інших сигналів датчиків блок управління забезпечує найкращий для конкретних умов рух трактора. Головні параметри роботи (споживання електроенергії, відновлення електроенергії, залишковий заряд акумуляторної батареї) візуально відображаються на панелі приладів.

8. Електродвигун. Надає рух колесам трактора безпосередньо або через трансмісію. Спочатку електромобілі оснащувалися звичайними електродвигунами постійного або змінного струму. Сьогодні на електромобілях використовуються в основному спеціальні електродвигуни змінного струму. До таких електродвигунів пред'являються вимоги високої ефективності при сталості тягових характеристик, необхідності в періодичному техобслуговуванні, здатності витримувати перевантаження і забруднення.

В ряді конструкцій можуть застосовуватись трактори, з декількома електродвигунами, які приводять в рух дві пари коліс, що значно підвищує тягову потужність транспортного засобу. Також електродвигун може буде розміщений безпосередньо в колесі, скорочуючи до мінімуму трансмісію, але така схема погіршує керованість.

9. Механічна трансмісія. Складається з коробки передач, диференціала та інших механічних пристроїв для забезпечення руху трактору.

10. Водійські органи управління електромобілем. Це педалі, кермове управління, важіль ручного гальмування, органи управління системами і приладами електромобіля.

11. Рушії (колеса) електромобіля. При застосуванні тягового електродвигуна, колеса мають конструкцію характерну для автомобілів.

Одна з найсерйозніших проблем експлуатації трактора його невисока ступінь автономності. Величина пробігу без підзарядки залежить від багатьох факторів: ємності акумуляторної батареї, характеру і умов руху та роботи, ступеня використання допоміжних систем. В даний час середня дальність використання трактора складає близько 50-70 км. При русі з більшою швидкістю та навантаженням, пробіг різко зменшується [3].

1.3 Системи керування асинхронним ЕП

1.3.1 Класичне векторне керування АД (Field Oriented Control)

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є нелінійним багатовимірним об'єктом керування [4] і описується системою нелінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку, у якої два виходи: момент та модуль вектора потокозчеплення ротора мають керуватися за допомогою двовірного вектора напруги статора. Оскільки в стандартному випадку до вимірювання доступні лише струми статора та кутова швидкість ротора (компоненти вектора потокозчеплення ротора не вимірюються), то розглядається задача керування по вимірюваному виходу. Для вирішення проблеми неповної вимірюваності вектора стану в системах з лінійними об'єктами, відповідно до принципу розділення, невимірювана частина змінних стану замінюється на їх оцінені значення, які отримуються за допомогою асимптотичного спостерігача [5]. В

нелінійних системах принцип розділення потребує доведення стійкості для кожної із структур алгоритмів керування і спостерігачів.

На сьогоднішній день векторні методи керування асинхронними двигунами розглядаються як основні для більшості технологічних застосувань, поступово витісняючи алгоритми частотного керування АД.

Метод частотного керування, який вперше запропоновано для регулювання кутової швидкості АД полягає у зміні амплітуди та кутової швидкості обертання вектора напруги статора, які є компонентами двомірного скалярного керування. Цей метод не дозволяє забезпечити асимптотичного керування моментом і потокозчепленням навіть в усталеному режимі, а також отримати наперед задану динамічну поведінку цих змінних. При векторному керуванні здійснюється керування амплітудою і просторовим положенням вектора напруги статора, завдяки чому можливе незалежне керування механічними координатами і модулем вектора потокозчеплення АД. Векторно-керовані асинхронні електроприводи виконуються на основі типових структур прямого і непрямого векторного керування [6], що в теперішній час визначаються як стандартні або класичні. Опис технології побудови таких систем керування АД, що вперше почали впроваджуватися в серійне виробництво в середині 1980-х, наведено в роботі [7]. Типові структури систем стандартного прямого і непрямого векторного керування, конфігурація яких включає перетворення змінних АД в полеорієнтовану систему координат (d-q), наведено на рис. 1.3 і рис. 1.4.

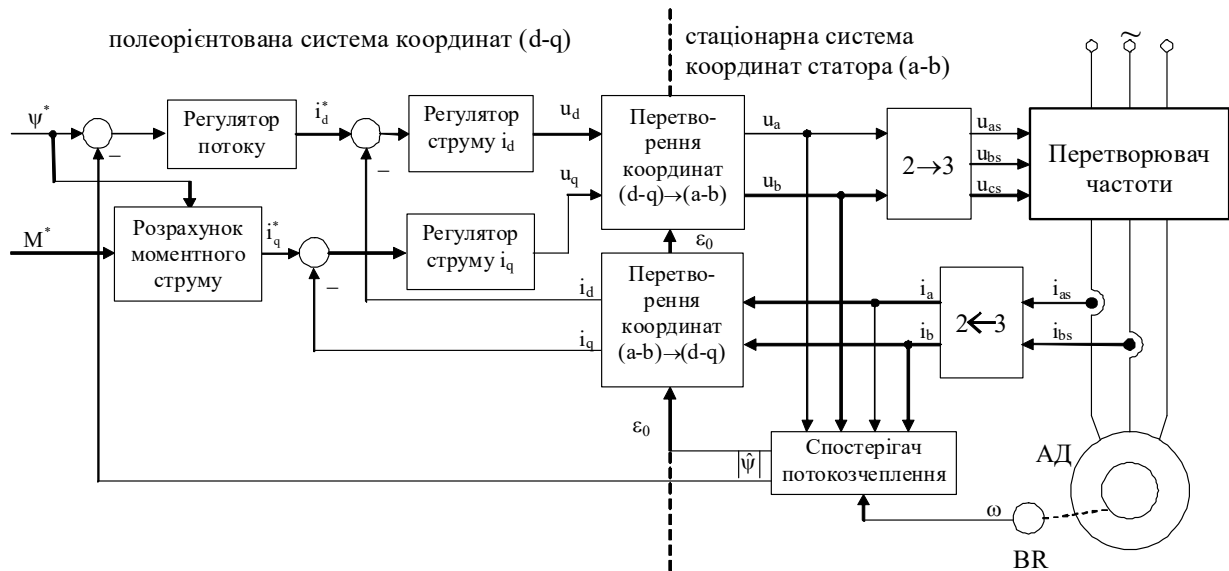


Рисунок 1.3 – Структурна схема системи стандартного прямого векторного керування АД

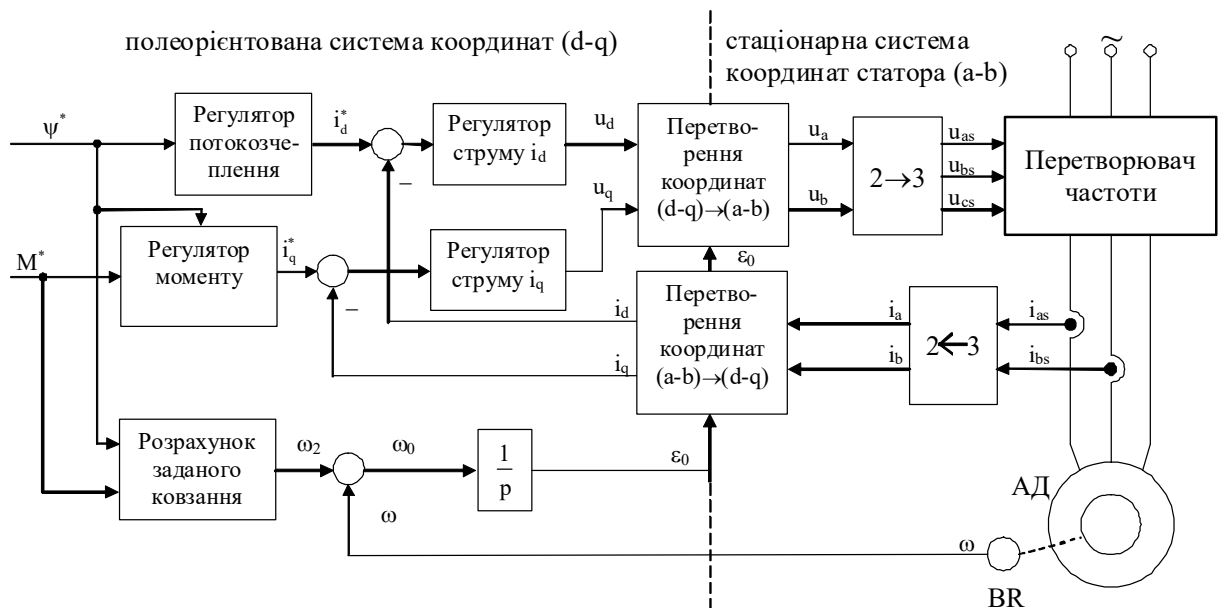


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи стандартного непрямого векторного керування АД

Теорія класичного векторного керування АД ґрунтується на припущенні про струмове керування обмотками статора, що досягається шляхом використання ПІ-регуляторів струму з "великим" коефіцієнтом підсилення. В цьому випадку знижується порядок задачі керування, яка в полеорієнтованій системі координат структурно стає подібною до задачі керування двигуном постійного струму з незалежним збудженням. Такий підхід не враховує в

повному обсязі особливості АД як нелінійного об'єкта, проте дозволяє сформулювати принципи векторного керування, не вимагаючи при цьому спеціальних знань в області сучасної нелінійної теорії керування.

В системах прямого векторного керування орієнтація системи координат (d-q) задається за допомогою спостерігача вектора потокозчеплення ротора, виходами якого є оцінені кутове положення ε_0 і модуль вектора потокозчеплення ротора $|\hat{\psi}|$. У випадку непрямого векторного керування полеорієнтування здійснюється шляхом формування заданого кутового положення ε_0 системи координат (d-q) в функції заданого ковзання.

Формування керуючих дій (u_d, u_q) по осям d і q відбувається за допомогою ПІ регуляторів струму, для яких задані значення моментної i_q^* та польової i_d^* компонент струму статора є промасштабованими завданнями для моменту (q -вісь) і потокозчеплення (d -вісь) [8].

1.3.2 Пряме керування моментом DTC (Direct Torque Control)

Додатково до систем векторного керування, миттєве регулювання крутного моменту може бути отримано шляхом використання концепції прямого регулювання моменту. Пряме управління моментом було розроблено в 1980-х японськими і німецькими дослідниками (Takahashi 1984, 1985; Depenbrock 1985). Електроприводи з прямим керуванням моментом Direct Torque Control (DTC) в даний час користуються великим інтересом, так як фірма АВВ розробила електропривод з прямим керуванням крутним моментом АД, який відповідно до заяв АВВ може працювати навіть при нульовій швидкості. Це дуже значний промисловий внесок, і як було заявлено АВВ, пряме керування моментом (DTC) є останнім методом керування двигуном змінного струму, розробленим АВВ (Тіттен 1996).

В приводах з DTC, потокозчеплення і електромагнітний момент регулюються напряму і незалежно вибором оптимальних режимів переключення інвертора. Вибір робиться так, щоб обмежити похибки потокозчеплення електромагнітного моменту в межах відповідного гістерезису потоку і електромагнітного моменту. За рахунок цього отримати швидку реакцію моменту, низьку частоту перемикання інвертора і низькі гармонічні втрати. Потрібні оптимальні вектори перемикання напруги можуть бути вибрані за допомогою так званої довідкової таблиці оптимальних векторів перемикання напруги. Це може бути отримано шляхом простих фізичних міркувань, пов'язаних з положенням просторового вектора потокозчеплення статора, доступних векторів перемикання, потрібного крутного моменту, і потокозчеплення.

Рисунок 1.3 показує функціональну схему електропривода АД з DTC, який використовує потокозчеплення статора. Таким чином, вона буде називатися електроприводом АД з DTC на основі потоку статора. Однак, слід зазначити, що інші форми також можливі, які ґрунтуються на потокозчепленнях ротора або потокозчепленнях намагнічування. На рис. 1.3 асинхронний двигун живиться від VSI інвертора, потокозчеплення статора та помилки електромагнітного моменту обмежені в рамках їх відповідних смуг гістерезису. Для цього використовуються дворівневий компаратор потоку з гістерезисом і тривірневий компаратор моменту, відповідно. Виходи компараторів потоку і крутного моменту (dM , $d\psi$) використовуються в таблиці оптимального перемикання інвертора, в якій також використовується інформація про просторове положення ρ_s вектора потокозчеплення статора. Слід зазначити, що це не фактичне положення вектору потокозчеплення, а тільки сектор, де вектор потокозчеплення знаходиться. Видно, що схема електроприводу вимагає спостерігачі потокозчеплення статора та електромагнітного моменту. Аналогічним чином, як це робиться в системі векторного керування з орієнтацією по вектору потоку статора, потокозчеплення статора може бути оцінене шляхом інтегрування рівняння статорного кола. Однак, на низьких частотах великі помилки можуть виникнути у зв'язку зі

змінюю опору статора, помилки інтегратора та вимірювання. Тому замість використання розімкнених спостерігачів потокозчеплення, інші методи повинні бути використані (наприклад, спостерігачі потоку).

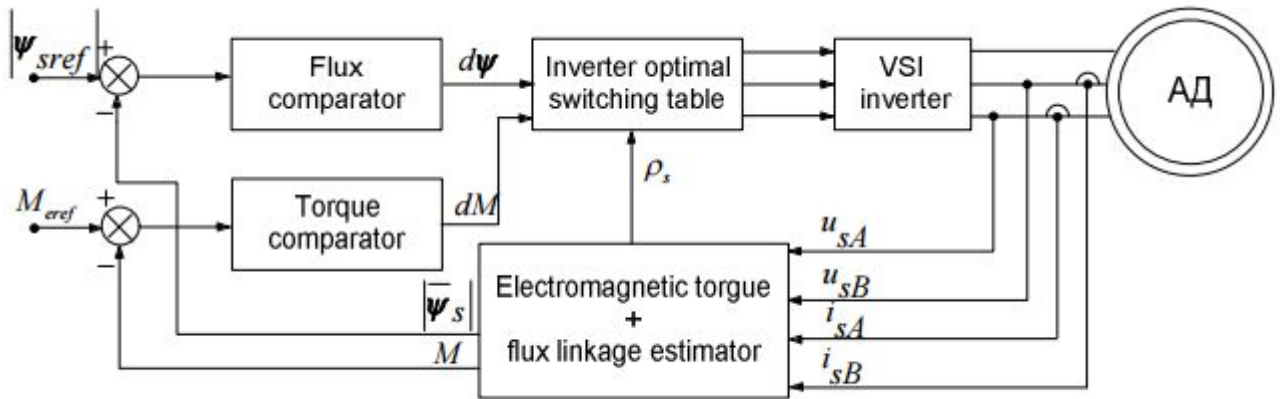


Рисунок 1.5 – Схема привода з DTC при орієнтації по вектору потоку статора

Спостерігачі мають знижену чутливість до варіації параметрів, але точність спостерігача потокозчеплення статора може бути додатково збільшена також за допомогою спостерігачів з адаптацією параметрів (наприклад, для оцінки опор статора), або теплова модель машини виходи якої можуть бути використані для точної оцінки опор статора. Однак, також можна використовувати адаптивні спостерігачі, які оцінюють потокозчеплення статора, опір статора або температуру (необхідні для оцінки "гарячих" значень опор статора), а також швидкість обертання ротора. Слід зазначити, що для оцінки потокозчеплення статора не потрібно стежити за напругою статора, так як вони можуть бути відновлені за допомогою функції перемикавання інвертора і оціненої напруги ланки постійного струму разом з моделлю для падіння напруги перемикачів інвертора. Можливо також мати такі схеми DTC, які містять інтелектуальний спостерігач вектора перемикавання напруги. Наприклад схема, яка може бути використана при наявності перехідного процесу в заданому електромагнітному моменті (який є найбільш практичною ситуацією), при збереженні робастного керування потокозчепленням статора.

Основними особливостями DTC є:

- безпосередній контроль потоку статора і електромагнітного моменту; - непрямий контроль струмів і напруг статора;
- приблизно синусоїдальні потоки і струми статора; -зниження коливань крутного моменту;
- відмінна динаміка обертового моменту;
- частота перемикання перетворювача залежить від смуг гістерезису потоку і моменту.

Основними перевагами DTC є:

- відсутність перетворень координат (які потрібні в реалізації більшості векторно керованих електроприводів);
- відсутність окремого блоку широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги (обов'язкового в векторних приводах);
- відсутність схеми розв'язки (потрібна в векторних приводах з інверторами напруги); -скорочення числа контролерів (наприклад, потрібен тільки регулятор швидкості, якщо привод містить контур швидкості);
- фактичне положення вектора потокозчеплення не повинне бути визначене, а тільки сектор, де потокозчеплення знаходиться, і т.д.

Основними недоліками звичайних DTC можуть бути:

- можливі проблеми під час запуску і в діапазоні малих швидкостей роботи і при зміні команд крутного моменту;
- необхідність у використанні спостерігачів для потокозчеплення та електромагнітного крутного моменту (та ж проблема існує для векторних електроприводів); змінна частота перемикання [9].

1.4 Технічні вимоги до електроприводу трактора

На основі проведено аналізу сформуємо технічні вимоги, що ставляться до тягового електроприводу трактора:

1. Простота конструкції та обслуговування

2. Високий ККД в широкому діапазоні моменту та швидкості.
3. Високі масогабаритні показники
4. Здатність витримувати значні перевантаження та забруднення.
5. Енергетична ефективність
6. Швидкодія
7. Швидке відпрацювання моменту
8. Можливість керування в II зоні.
9. Високе значення моменту при низьких швидкостях при русі в гору та старті.
10. Можливість рекуперації енергії

Висновки до розділу

1. Аналітичний огляд проблеми показав, що електротрактори є дуже перспективним напрямком в машинобудуванні і мають значну кількість переваг в порівнянні з ДВЗ, але і мають свої недоліки. Найбільш розповсюдженими є трактори на основі акумуляторних батарей. В загальному випадку привідними електроприводами в тракторах слугують АД з КЗ, так як вони є досить дешевими та мають великі показники надійності.
2. Були розглянуті найбільш поширені системи керування моментом АД, що можуть бути застосовані в електротракторах, а саме векторне керування (FOC) та пряме керування моментом (DTC). Також були оглянуті структура та основні вузли та агрегати сучасного електричного трактора та сформовані технічні вимоги, що ставляться до нього.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА, АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Ставиться задача визначення потужності асинхронного двигуна для електротрактора на базі трактора Нечт 5114 [10].

Вихідними даними для розрахунку потужності є параметри трактора та основні характеристики руху, які наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані електротрактора на базі трактора Нечт 5114

Повна маса електротрактора m , кг	240
Радіус більшого колеса R_k , м	0,23
Радіус меншого колеса r_k , м	0,19
Маса більшого колеса m_{k1} , кг	25
Маса меншого колеса m_{k2} , кг	10
Передатне відношення диференціала i_δ	6,3
Передатне відношення редуктора i_p	4,7
Момент інерції тягового АД J_δ , кгм ²	0.05
Максимальне прискорення/сповільнення $a_m = b_m$, м/с ²	1
Номінальна усталена швидкість V_n , км/год (м/с)	8,3 (2,3)

2.1 Розрахунок потужності двигуна по циклу руху

Рівняння руху механічної частини електропривода транспортного засобу у вигляді одномасової розрахункової схеми має наступний вигляд:

$$J \dot{\omega} = M_\delta, \quad (2.1)$$

де J – сумарний приведений момент інерції, M_δ – динамічний момент,

$$\dot{\omega} = \varepsilon = \frac{a_m \cdot i}{R_k} - \text{кутове прискорення.}$$

Розрахуємо приведений момент інерції за наступною формулою:

$$J = J_m + J_o + J_k = m \cdot \frac{R_k^2}{i^2} + J_o + \frac{2 \cdot m_{k1} \cdot R_k^2 + 2 \cdot m_{k2} \cdot r_k^2}{2 \cdot i^2} \quad (2.2)$$

де J_m – приведений момент інерції ТЗ,

J_o – момент інерції тягового АД,

J_k – сумарний момент коліс трактора.

Згідно з вихідними даними, наведеними в таблиці 2.1 момент інерції з виразу (2.2) дорівнює 0,14 кгм².

Визначення потужності двигуна буде виконуватись на основі траєкторії зміни швидкості трактора, який здійснює операцію косіння трави з подрібненням – 3 цикли косіння . Траєкторія зміни швидкості показана на рисунку 2.1.

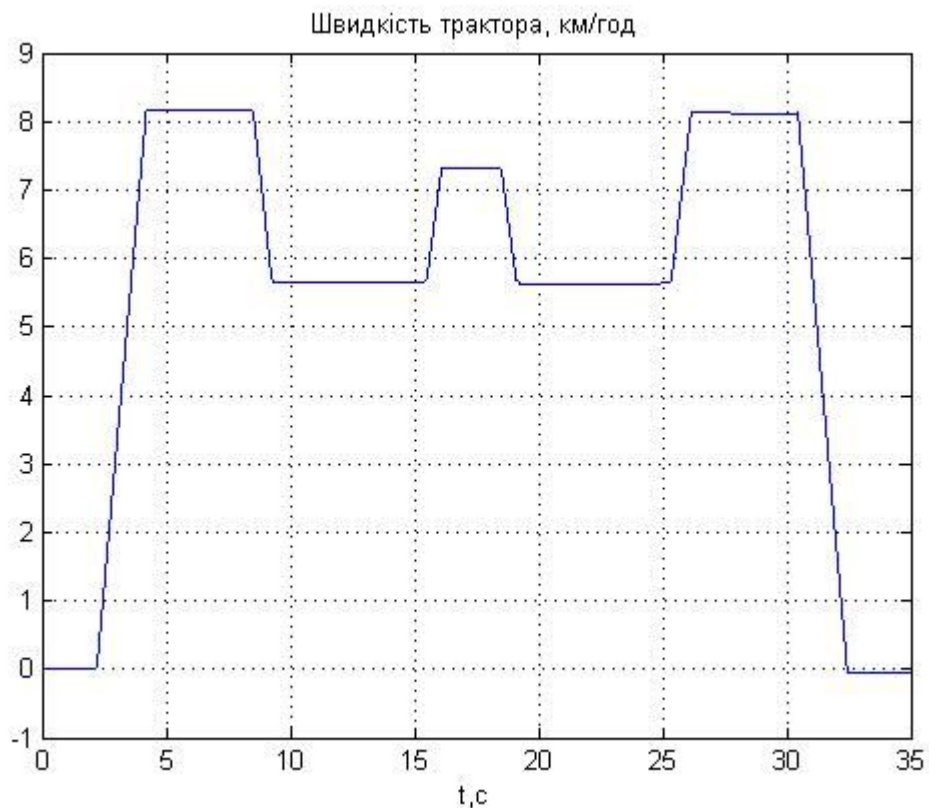


Рисунок 2.1 – Траєкторія зміни швидкості трактора

Отримаємо траєкторію зміни прискорення трактора взявши похідну по часу від траєкторії зміни швидкості. Результат зображений на рисунку 2.2.

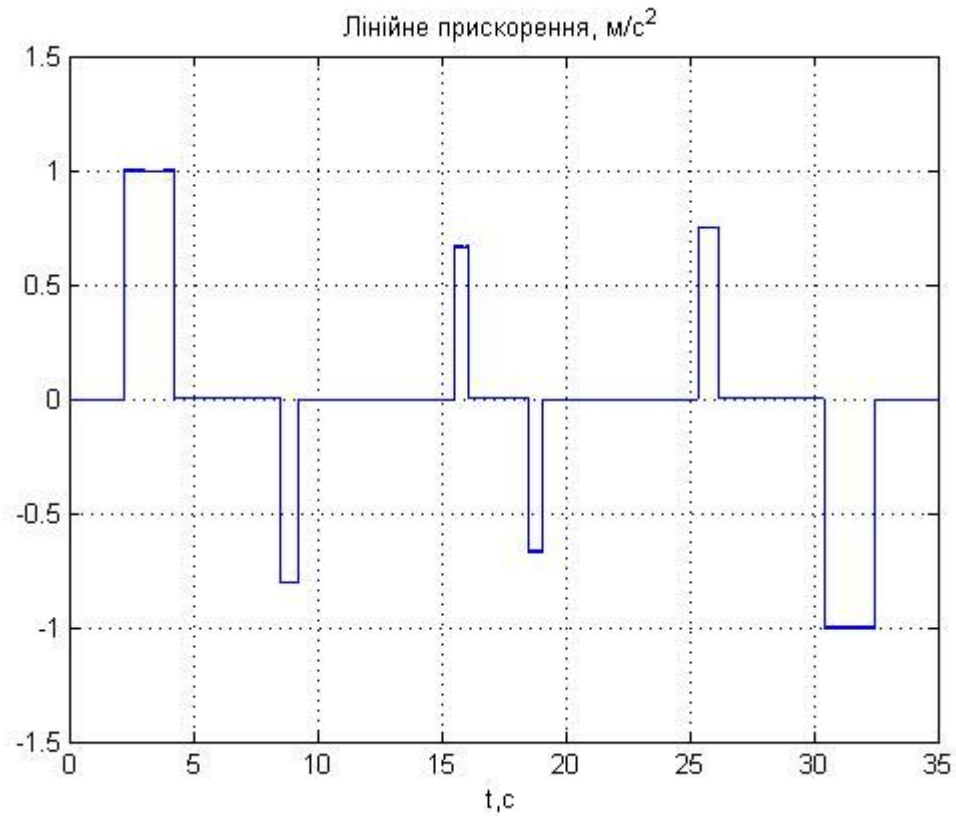


Рисунок 2.2 – Траєкторія зміни прискорення/сповільнення трактора

З рівняння $M_o = J \frac{a_m \cdot i}{R_k}$ отримаємо навантажувальну діаграму двигуна:

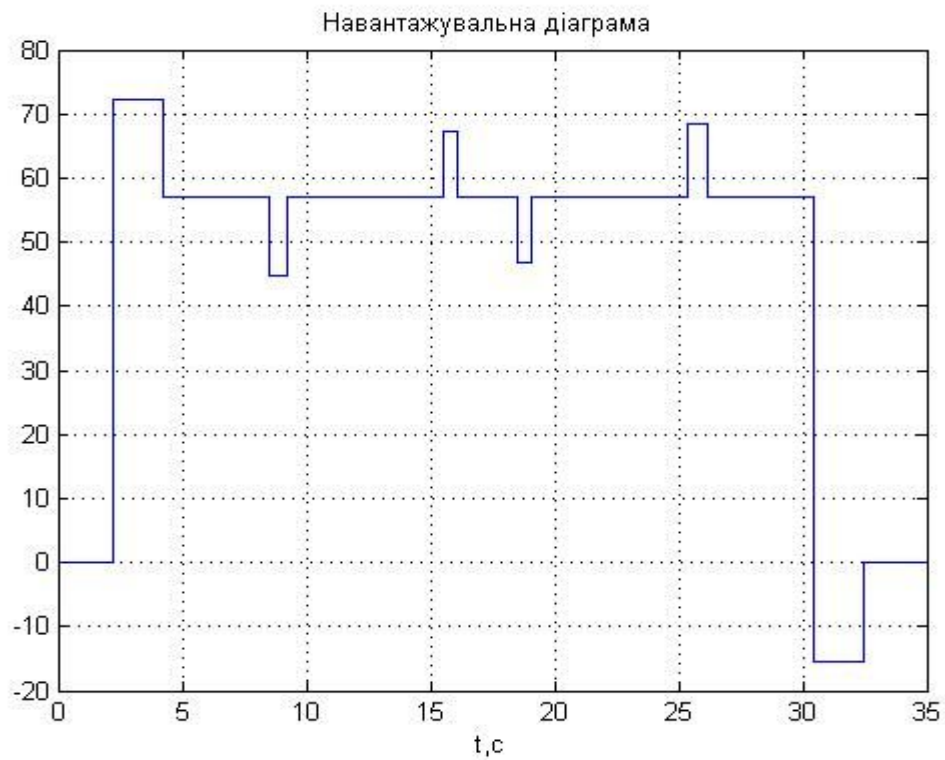


Рисунок 2.3 – Навантажувальна діаграма двигуна

На рисунку 2.3 зображений момент двигуна, тобто сума динамічного і статичного моментів. Повний опір при русі трактора визначається як сума всіх складових опор руху, які розділяють на основні і додаткові. В основні входять всі сили, що діють на трактор на прямій ділянці руху, а саме: внутрішній опір руху трактора (обумовлений тертям спряжених елементів конструкції); опір викликаний взаємодією коліс трактора і дорожнього покриття; опір повітря та опір викликаний навісним знаряддям. Додатковий опір трактор зазнає на спусках, підйомах і поворотах. Для спрощення аналізу припустимо, що опір викликаний взаємодією коліс трактора і дорожнього покриття, а також внутрішній опір руху є постійним і незмінним в часі. Величиною опору повітря знехтуємо, так як робоча швидкість трактора порівняно низька. Статичний момент на валу привідного двигуна, на основі вище вказаних припущень, визначається таким чином $M_c = M_{ct} + M_{cz}$. Прийmemo значення статичного моменту рівним $M_c = 0.8M_n = 47 \text{ Нм}$

Визначимо еквівалентний момент двигуна шляхом чисельного інтегрування навантажувальної діаграми, загальна формула якого має наступний вигляд [11]:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} M^2(t) dt} = 47 \text{ Нм} \quad (2.3)$$

де M - момент двигуна на навантажувальній діаграмі, T_u - час циклу.

Номінальна потужність двигуна визначається:

$$P_{\partial\partial} = k_z \cdot M_e \cdot \omega_n = 1.1 \cdot 47 \cdot 314 = 16.4 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

де $k_z = 1.1 \div 1.3$ – коефіцієнт запасу, ω_n – номінальна швидкість обертання валу двигуна.

У каталогах на тягові асинхронні двигуни відсутні параметри, які необхідні для подальшого аналізу та синтезу регуляторів, тому з каталогу [12] обираємо АД 4А160М2У3 параметри якого наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна 4A160M2Y3

Номінальна потужність двигуна	$P_{2n} = 18.5 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 1$
Момент інерції двигуна	$J_d = 0,053 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
ККД двигуна	$\eta = 88.5\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.92$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$S_n = 2.1\%$
Критичне ковзання	$S_k = 12.5\%$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1^I = 0.092$
Активний опір статора	$\bar{R}_1^I = 0.049$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2^{\parallel} = 0.12$
Приведений індуктивний опір ротора	$\bar{R}_2^{\parallel} = 0.022$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_{\mu} = 4.5$

2.2 Перевірка правильності вибору двигуна

Перевірка правильності вибору двигуна є важливим етапом. Неправильний вибір потужності може призвести до негативних наслідків, таких як постійне перевантаження двигуна, збільшення маси трактора, погіршення тягових властивостей [13].

Для того щоб перевірити двигун по перевантажувальній здатності необхідно порівняти максимальний момент на навантажувальній діаграмі з максимальним моментом обраного двигуна і повинна виконуватись умова:

$$M_{max} > M_1, \quad (2.5)$$

де M_1 - максимальний момент на навантажувальній діаграмі, $M_{max} = \lambda M_n$ - максимальний момент обраного двигуна.

Розрахуємо номінальний момент двигуна за формулою:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\omega_{xx}(1 - S_n)} = \frac{18500}{314.16(1 - 0.021)} = 60 \text{ Нм}, \quad (2.6)$$

де $\omega_{xx} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад/с}$ – кутова швидкість ідеального холостого ходу.

Відповідно максимальний момент двигуна дорівнює:

$$M_{max} = \lambda \cdot M_n = 2.2 \cdot 60 = 132 \text{ Нм} \quad (2.7)$$

Отже, перевірка за перевантажувальною здатністю виконується, тому що:

$$M_{max} > M_1 = 132 \text{ Нм} > 75 \text{ Нм} \quad (2.8)$$

Обов'язково перевірити двигун по нагріву, необхідне виконання наступної умови:

$$M_n > M_{екв} \quad (2.9)$$

Дана умова виконується, тому що $M_n = 60 > M_{екв} = 47$.

Обидві перевірки виконуються, це свідчить про те, що двигун обрано вірно.

2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

В середовищі MATLAB Simulink математична модель асинхронного двигуна отримана для Т-подібної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 2.4

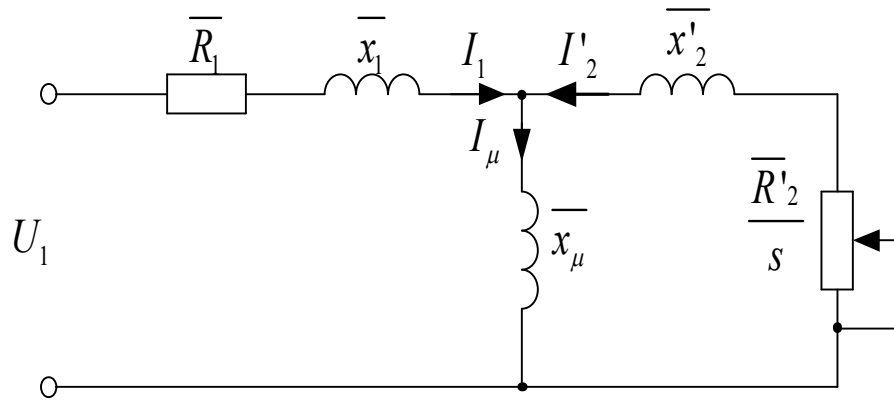


Рисунок 2.4 – Т-подібна схема заміщення АД

Параметри двигуна в таблиці 2.2 наведені для Г-подібної схеми заміщення, що зображена на рисунку 2.5

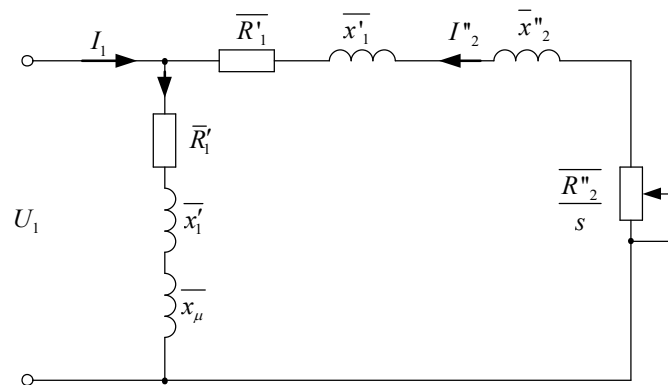


Рисунок 2.5 – Г-подібна схема заміщення АД

Тому необхідно зробити перерахунок параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну за допомогою наступних формул [14]

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемою дорівнює:

$$c_1 = \frac{\overline{x}_\mu + \sqrt{(\overline{x}_\mu)^2 + 4 \cdot \overline{x}'_1 \cdot \overline{x}_\mu}}{2 \cdot \overline{x}_\mu} = \frac{4.5 + \sqrt{4.5^2 + 4 \cdot 0.092 \cdot 4.5}}{2 \cdot 4.5} = 1.02 \quad (2.10)$$

Активні та індуктивні опори статора і ротора:

$$X_1 = \frac{\bar{X}_1^|}{c_1} Z_n = \frac{0.092}{1.02} \cdot 6.37 = 0.57, \quad (2.11)$$

$$X_2^| = \frac{\bar{X}_2^||}{c_1^2} Z_n = \frac{0.12}{1.02^2} \cdot 6.37 = 0.73, \quad (2.12)$$

$$R_1 = \frac{\bar{R}_1^|}{c_1} Z_n = \frac{0.049}{1.02} \cdot 6.37 = 0.306, \quad (2.13)$$

$$R_2^| = \frac{\bar{R}_2^||}{c_1^2} Z_n = \frac{0.022}{1.02^2} \cdot 6.37 = 0.13. \quad (2.14)$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_\mu = \bar{X}_\mu Z_n = 4.5 \cdot 6.37 = 28.66 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.57}{314.159} = 0.0018 \text{ Гн}, \quad (2.16)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2^|}{\omega_0} = \frac{0.73}{314.159} = 0.0023 \text{ Гн}. \quad (2.17)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{28.66}{314.159} = 0.09 \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.09 + 0.0018 = 0.0918 \text{ Гн}, \quad (2.19)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.09 + 0.0023 = 0.0923 \text{ Гн}. \quad (2.20)$$

За допомогою вище розрахованих параметрів обчислимо значення констант, які необхідні для проведення математичного моделювання:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.13}{0.0923} = 1.4 \text{ Ом/Гн}, \quad (2.21)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.0918 \cdot \left(1 - \frac{0.09^2}{0.0918 \cdot 0.0923}\right) = 0.004 \text{ Гн}, \quad (2.22)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2} = \frac{0.09}{0.004 \cdot 0.0923} = 243.77 \text{ 1/Гн}, \quad (2.23)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot \beta \cdot L_m = \frac{0.306}{0.004} + 1.4 \cdot 243.77 \cdot 0.09 = 107.6 \text{ Ом/Гн}, \quad (2.24)$$

$$\mu = \frac{3 \cdot p_n \cdot L_m}{2 \cdot L_2} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 0.09}{2 \cdot 0.0923} = 1.46. \quad (2.25)$$

2.4 Розрахунок акумуляторної батареї

Ставиться задача визначення ємності акумуляторної батареї для електротрактора на базі трактора Нечт 5114. Вихідними даними є параметри електротрактора, що наведені в таблиці 2.1. Розрахунок акумуляторної батареї буде виконуватись по методиці, яка розглянута в роботі [15].

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики трактора

Есплуатаційна маса, кг	240
Довжина, мм	2590
Ширина, мм	1080
Висота, мм	1080
Щільність повітряного потоку ζ	1.225
Аеродинамічний коефіцієнт C_w	0.7
Фронтальна площа A_f , м ²	2.24

Енергія, що витрачається при русі трактора, складається з втрат при перетворенні електричної енергії в кінетичну і навпаки, а також втрат на тертя та аеродинамічний опір. Звідси необхідна енергія акумуляторної батареї розраховуватиметься таким чином

$$W_{\text{акум.бат}} = W_{\text{тертя}} + W_{\text{ел}} \quad (2.26)$$

де $W_{\text{тертя}}$ – енергія втрат, що обумовлена силами тертя та аеродинамічним

опором; W_{el} – втрати в електричному обладнанні та трансмісії. Скориставшись формулою для розрахунку потужності [16], запишемо:

$$W_{тептя} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(mgf_r + \frac{1}{2} \xi C_w A_f V^2 \right) \cdot V dt, \quad (2.27)$$

де T — кінцевий час маршрутного циклу; $g = 9.81$ – прискорення вільного падіння.

При перетворенні електричної енергії батареї в кінетичну енергію її шлях пролягає через перетворювач, електричний двигун та редуктор. Прийmemo, що ККД інвертора $\eta_{инв}=0,97$, ККД двигуна $\eta_{дв}=0,88$, ККД редуктора $\eta_{ред}=0,98$.

Отже, сумарний ККД становить $\eta_{\Sigma} = \eta_{инв} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{ред} = 0,97 \cdot 0,88 \cdot 0,98 = 0.83$

Тоді енергія, що втрачається при перетворенні з електричної в кінетичну запишеться наступним чином:

$$W_{el} = (1 - \eta_{\Sigma}) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T m \frac{dV}{dt} dt \quad (2.28)$$

Підставивши відомі коефіцієнти та розрахувавши інтеграли (2.11) та (2.12), знайдемо необхідний запас енергії акумуляторної батареї на 0.29 км.

$$W_{AKB} = 2.2 \text{ МДж} \quad (2.29)$$

Тоді заряд, необхідний для подолання маршруту в 25 км в силовому режимі для даного електротрактора, при умові, що постійна напруга акумуляторної батареї $U_{dc} = 540 \text{ В}$, становить:

$$W_{25} = \frac{W_{AKB} \cdot 25}{S} = 190 \text{ МДж} \quad (2.30)$$

де $W_{AKB} = 3.54 \text{ МДж}$ — для циклу маршруту при $S = 0.29 \text{ км}$

$$Ih = \frac{W_{25}}{3600 \cdot U_{dc}} = \frac{190 \cdot 10^6}{3600 \cdot 540} = 97.7 \text{ А} \cdot \text{год} \quad (2.31)$$

Для того, щоб отримати таку акумуляторну батарею будемо використовувати літій-іонні акумулятори типу NCR18650PF, параметри яких наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри акумулятора типу NCR18650PF

Виробник	Panasonic
Вага, кг	0.048
Номінальна ємність (C), А×год	2.9
Номінальна напруга, В	3,6
Номінальний струм заряду, А	1.3
Максимальна напруга заряду, В	4.2
Температура заряду, °С	0 – 45
Температура розряду, °С	-20 – 60

Продовження таблиці 2.4 – Параметри акумулятора типу NCR18650PF

Температура зберігання, °С	-20 – 50
Висота, мм	65.3
Діаметр, мм	18.5
Вартість батареї, \$	3,5

Результати розрахунків акумуляторної батареї зведені в таблицю 2.5

Таблиця 2.5 – Результат розрахунку батареї.

Номінальна постійна напруга батареї, В	$U_{dc} = 540$
Ємність батареї, А·год	98,6
Кількість послідовно з'єднаних елементів	150
Кількість паралельно з'єднаних елементів	34
Сумарна кількість елементів	5100
Вага, кг	224
Вартість, \$	17850

Розглянемо спрощений розрахунок силової частини перетворювача [17] для двигуна 4A180S2Y3.

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ovl} , яка, в загальному випадку

залежить від конкретного типу механізму і дорівнює $k_{ovl} = (2 - 3)$ для електричних транспортних засобів. Прийmemo $k_{ovl} = 2.5$ і розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача

$$I_{max} = k_{ovl} \cdot I_{na} = 2.5 \cdot 48.7 = 121.75 \text{ A.} \quad (2.32)$$

При живленні перетворювача від трифазної мережі живлення $U_{grid} = 380$ В, напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде приблизно рівною

$$U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} \approx 540 \text{ В.} \quad (2.33)$$

При виборі IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто

$$U_{ce} > 1.5 U_{dc \max} \quad (2.34)$$

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням $U_{grid} = 380$ В.

Таким чином $U_{ce} = 1.5 \cdot 750 = 1125$ В.

Обираємо IGBT модуль типу SEMiX151GD12E4s [18] з такими параметрами $I_{Cn} = 150$ А, $U_{ce} = 1200$ В.

Ємність фільтру визначаємо за формулою

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} \quad (2.35)$$

де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні $(0.02 \div 0.05)$, m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі живлення, R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Для визначення R_0 розрахуємо значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{P_{2n}}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{2.5 \cdot 18500}{540 \cdot 0.885 \cdot 0.97} = 99.7 \text{ А}, \quad (2.36)$$

де $\eta_{inv} = (0.95 \div 0.97)$ – коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Тоді еквівалентний опір навантаження розраховується як:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{99.7} = 5.4 \text{ Ом}. \quad (2.37)$$

У відповідності з (2.19) розрахункове значення ємності фільтра для $k_p = 0.04$ буде дорівнювати:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 5.4} = 4914 \text{ мкФ}. \quad (2.38)$$

Вибираємо по каталогу [19] конденсатори типу В43712, ємністю $C_c = 10000$ мкФ та максимальною напругою 450 В. Потрібна ємність та робоча напруга фільтра досягається послідовним включенням двох конденсаторів. При цьому сумарна ємність буде

$$C_{12} = \frac{C_c}{2} = \frac{10000}{2} = 5000 \text{ мкФ}. \quad (2.39)$$

Вибір датчиків струму здійснюють за максимальним струмом, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим від максимально допустимого струму в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача для вибору використовують значення максимального струму (2.16).

Обираємо 2 давачі струму НО 80 – S – 0100 [20] номінальний струм якого складає 80А, діапазон вимірювання 200 А.

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25NP [21], схема підключення якого показана на рис. 2.4

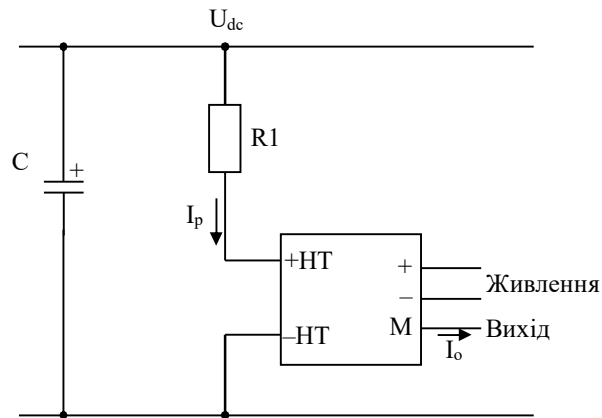


Рисунок 2.4 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{p\max}=14$ мА. Тому значення опору резистора R_1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{DC}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом.} \quad (2.40)$$

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

Висновки до розділу

1. Розрахована потужність двигуна, на основі циклу руху методом еквівалентного моменту. Це дало змогу обрати асинхронний двигун 4A180S2Y3 загального виконання, тому що для тягових АД відсутні параметри, які необхідні для подальшого дослідження. Були виконані перевірки правильності вибору двигуна по перевантажувальній здатності та нагріву.

2. Розраховано тягову акумуляторну батарею на елементах Panasonic NCR18650PF, сумарна ємність якої становить $98.6\text{А}\cdot\text{год}$. Дана ємність досягається за допомогою певної кількості паралельних та послідовних з'єднань елементів.

3. В даному розділі був проведений спрощений розрахунок силового перетворювача двигуна для практичної реалізації системи векторного керування. В результаті розрахунків було обрано IGBT модуль типу SEMiX151GD12E4s $I_{Cn}=150\text{ А}$, $U_{ce}=1200\text{ В}$, конденсатори фільтру В43712 ємністю $C_c=10000\text{ мкФ}$ датчики струму НО 80-NP-0100, номінальний струм 80А, а також давач напруги LV-25NP.

3 ПОБУДОВА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ САК АД ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

В даному розділі буде здійснена побудова функціональної схеми САК АЕП електротрактора, з її описом, здійснений перелік, розрахунок регуляторів даної схеми. Також здійснена побудова енергоощадної САК АД електротрактора. Зроблені висновки по розділу.

3.1 Побудова функціональної схеми

Функціональна схема умовно ділиться на три частини, а саме – частина регулювання, силова частина та частина векторних перетворень. На (рис. 3.1) та на кресленні зображена дана схема системи векторного керування АД [22-24].

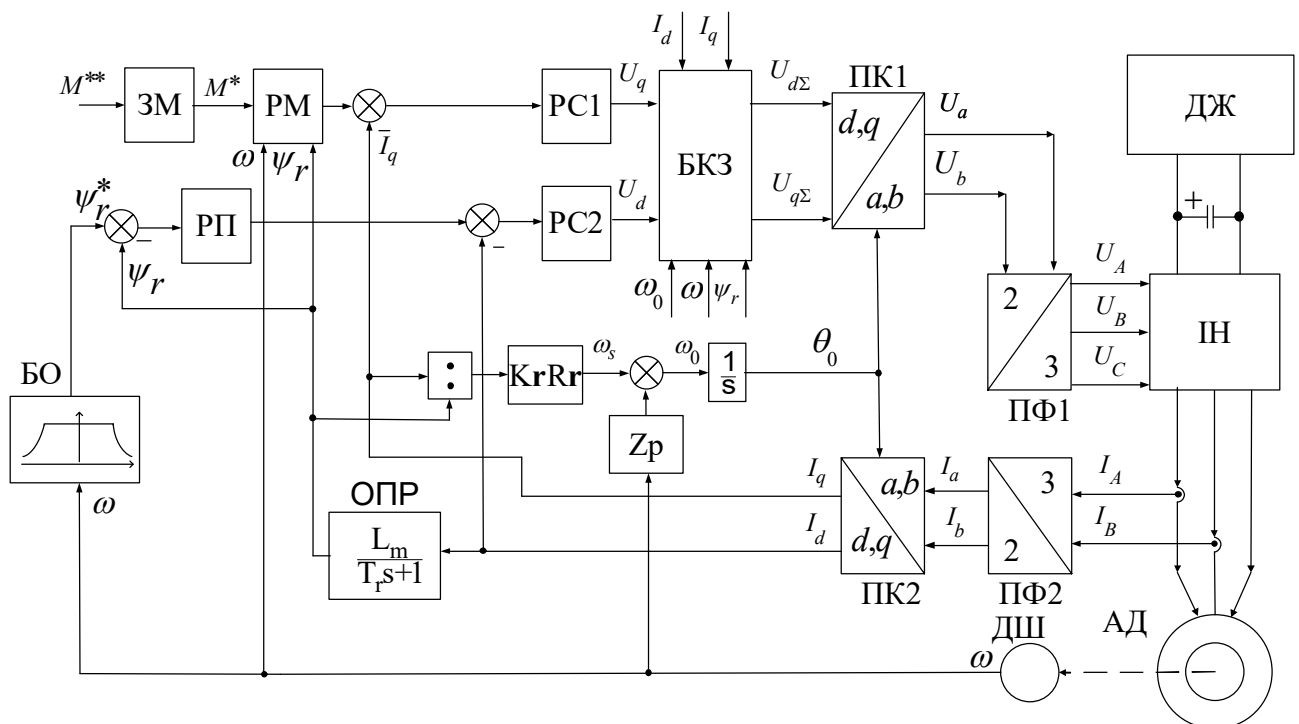


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САК АД електротрактора

$ЗМ$ – завдання моменту, у випадку електротрактора це може бути педаль (педаль газу)

M^* – заданий момент електромобіля;

РС1 – регулятор струму I_q ;

РС2 – регулятор струму I_d ;

РП – регулятор потокозчеплення;

РМ – регулятор моменту;

Силова частина:

ДЖ – джерело напруги, у випадку електротрактора це АКБ чи підключення безпосередньо до мережі;

ІН – інвертор;

БКЗ – блок компенсування зв'язків, в даному блоці відбувається пряме компенсування зв'язків у моделі АД, для цього компенсування подається вектор даних, наведений нижче:

$$\bar{y} = [I_d, I_q, \hat{\Psi}_r, \hat{\omega}, \hat{\omega}_0, \hat{T}_r^{-1}]^T, \text{ де } \hat{T}_r^{-1} - \text{оцінка } T_r^{-1}.$$

ПК1, 2 – блоки перетворення координат, де перетворюються сигнали рухомої системи (d, q) у нерухомому, координат статора відповідно;

ПФ1 – перетворювач фаз, Здійснює перетворення з двофазної в трифазну системи [24]

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B)/\sqrt{3} \quad (0.1)$$

У ПК2 сигнали I_β, I_α перетворюються на сигнали I_q, I_d рухомої системи координат d, q вирази:

$$I_d = I_\alpha \cos \Theta_0 + I_\beta \sin \Theta_0; \quad I_q = I_\beta \cos \Theta_0 - I_\alpha \sin \Theta_0, \quad (0.2)$$

де Θ_0 це кут повороту $\bar{\Psi}_r$ вектора потокозчеплення. БКЗ визначає сигнали u_{dk}, u_{qk} які наведені нижче:

$$u_{qk} = (L_1 \omega_0 I_d + K_r z_p \omega \Psi_r) / K_u, \text{ та } u_{dk} = -(L_1 \omega_0 I_q + K_r \Psi_r / T_r) / K_u, \quad (0.3)$$

де K_u – коефіцієнт передачі ІН.

Отримавши значення u_{dk} , та u_{qk} в блоці БКЗ визначаються $u_{d\Sigma}, u_{q\Sigma}$ складові вектора напруги статора електродвигуна U_d, U_q :

$$\begin{aligned} u_{d\Sigma} &= u_d + u_{dk}; \\ u_{q\Sigma} &= u_q + u_{qk}. \end{aligned} \quad (0.4)$$

ПК1 реалізовує перетворення сигналів із рухомої системи координат d, q у нерухому систему координат α, β згідно наступних сигналів u_α, u_β двофазної системи:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_{d\Sigma} \cos \Theta_0 - u_{q\Sigma} \sin \Theta_0; \\ u_\beta &= u_{d\Sigma} \sin \Theta_0 + u_{q\Sigma} \cos \Theta_0. \end{aligned} \quad (0.5)$$

В ПК1 сигнали u_α та u_β перетворюються у сигнали завдання напруги статора електродвигуна u_A, u_B, u_C трифазної системи А, В, С:

$$\begin{aligned} u_A &= u_\alpha, \quad u_B = (-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta)/2 \\ u_C &= (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta)/2. \end{aligned} \quad (0.6)$$

3.2 Синтез регуляторів системи векторного керування

У цьому підрозділі буде здійснено синтез наступних регуляторів: регулятори струму i_d , струму i_q та потокозчеплення ротора Ψ_r

3.2.1 Синтез регулятора струму I_d

Контур регулятора компоненти вектора струму ротора I_d зображено на рис. 3.2. [26]

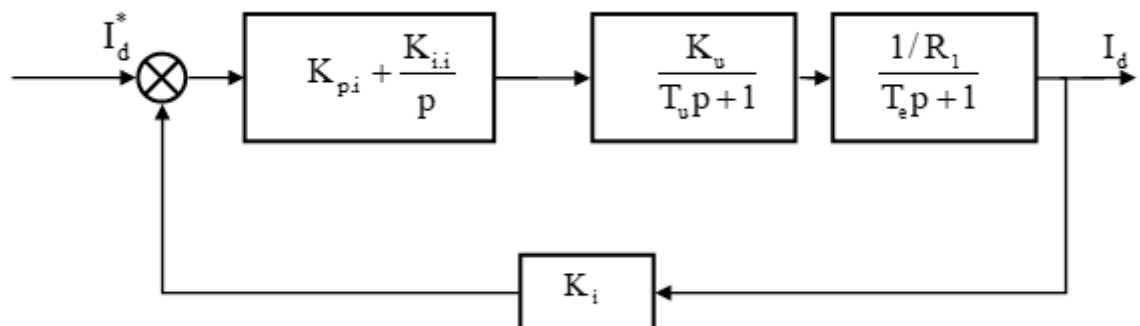


Рисунок 3.2 – Контур регулятора струму i_d

Передатна функція регулювання набуває наступного вигляду:

$$W_{0p.c}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (0.7)$$

Передатна функція цього регулятора струму i_d при налаштуванні контура на модульний оптимум матиме такий вигляд:

$$W_{per.i}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2T_u K_u K_i p} \quad (0.8)$$

Одержаний ПІ-регулятор струму i_d :

$$W_{рег.i}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}, \quad (0.9)$$

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i},$$

$$\text{де } T_e = \frac{L_s \sigma + \frac{L_m}{L_r} L_r \sigma}{R_1}; \quad K_u = 311 \text{ В}; \quad R_1 = R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r;$$

Розрахунок наведений в наступних формулах

$$R_1 = 0.04 + \left(\frac{0.023}{0.0231} \right)^2 \cdot 0.022 = 0.061 \text{ Ом}; \quad (0.10)$$

$$T_e = \frac{0.00094}{0.061} = 0.016 \text{ с}. \quad (0.11)$$

Сталу часу T_u визначаємо сумою сталої часу, T_f фільтра давачів струму статора. T_k аперіодичної ланки, що описує інвертор напруг та сталу часу[26].

$$T_u = T_f + T_k = 0.0008 + 0.0002 = 0.001 \text{ с} \quad (0.12)$$

Для моделювання обираємо коефіцієнт зворотного зв'язку, K_i який дорівнює 1.

Після підстановки параметрів R_1 , T_u , K_i , K_u , T_e , до формул (3.9), коефіцієнти $K_{p.i}$, $K_{i.i}$ ПІ-регулятора струму набувають наступних значень[26]:

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} = \frac{0.016 \cdot 0.061}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.0015; \quad (0.13)$$

$$K_{i.i} = \frac{R_1}{2T_u K_u K_i} = \frac{0.016}{2 \cdot 0.002 \cdot 311 \cdot 1} = 0.2. \quad (0.14)$$

Тоді функція розімкненої системи матиме вигляд[26]:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)}. \quad (0.15)$$

Передатна функція замкненої системи наведена далі:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{2 \cdot 0.001 \cdot p (0.001 \cdot p + 0.001 \cdot p + 1)} \quad (0.16)$$

Оскільки $T_u^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$ – має таке мале значення, то даним значенням можна знехтувати.

Тоді передатна функція замкненої системи матиме вигляд:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1}. \quad (0.17)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0.002p + 1} \quad (0.18)$$

3.2.2 Синтез регулятора струму I_q

Контури регулювання i_d та I_q є однаковими, в такому випадку синтез виконується по такому ж принципу що і для синтезу I_q [26].

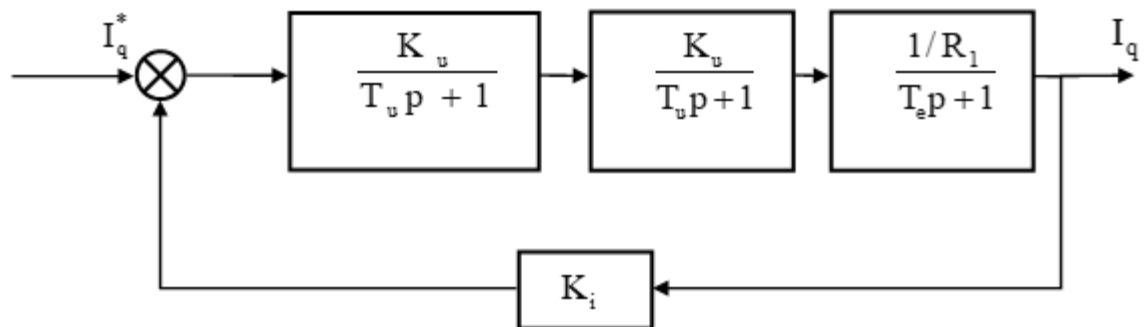


Рисунок 3.3 – Контур регулювання струму

Передатна функція регулювання отримує такий вигляд[26]:

$$W_{op.c}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (0.19)$$

Передатна функція даного регулятора струму i_d при налаштуванні контуру на модульний оптимум набуває наступного вигляду [26]:

$$W_{per.i}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2 T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i p} \quad (0.20)$$

Одержаний ПІ-регулятор струму i_d [26]:

$$W_{per.i}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}, \quad (0.21)$$

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i},$$

$$\text{де } T_e = \frac{L_s \sigma + \frac{L_m}{L_r} L_r \sigma}{R_1}; \quad R_1 = R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r; \quad K_u = 311 \text{ В};$$

Розрахунок наведений у наступних формулах

$$R_1 = 0.04 + \left(\frac{0.023}{0.0231} \right)^2 \cdot 0.022 = 0.061 \text{ Ом}; \quad (0.22)$$

$$T_e = \frac{0.00094}{0.061} = 0.016 \text{ с}. \quad (0.23)$$

Для даного моделювання оберемо коефіцієнт зворотного зв'язку, K_i який і в цьому випадку буде рівним 1.

Після підстановки параметрів R_1 , T_u , K_i , K_u , T_e , до формул (3.9), коефіцієнти $K_{p.i}$, $K_{i.i}$ ПІ-регулятора струму набувають наступних значень(3.24):

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} = \frac{0.016 \cdot 0.061}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.0015; \quad (0.24)$$

$$K_{i.i} = \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i} = \frac{0.016}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.1. \quad (0.25)$$

Функція розімкненої системи виглядатиме так:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)}. \quad (0.26)$$

Передатна функція замкненої системи наведена нижче:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{2 \cdot 0.001 \cdot p (0.001 \cdot p + 0.001 \cdot p + 1)}. \quad (0.27)$$

Оскільки $T_u^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$ – має таке мале значення, то даним значенням можна знехтувати.

Тоді передатна функція замкненої системи [26] набуває такого вигляду:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1}. \quad (0.28)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0.002p + 1} \quad (0.29)$$

3.2.3 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

На рис 3.4 відображено контур регулювання вектору потокозчеплення Ψ_r .

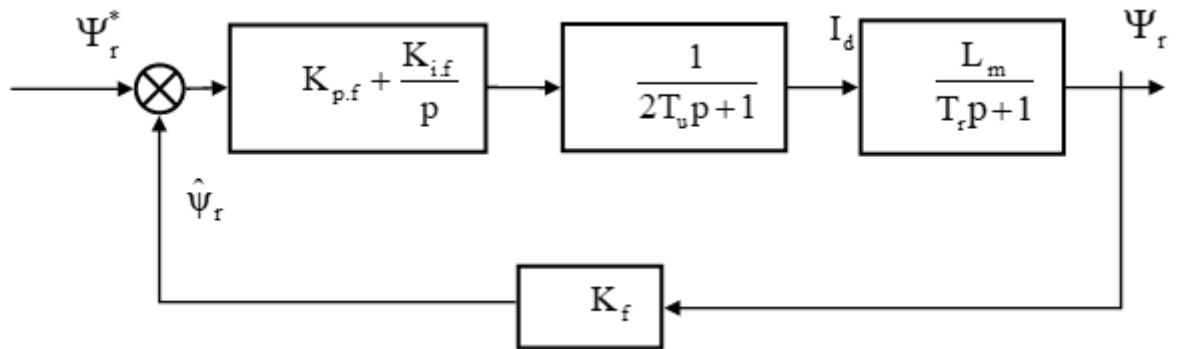


Рисунок 3.4 – Контур регулювання потокозчеплення ротора

Передаточна функція об'єкту:

$$W_{\text{оп.п}}(p) = \frac{L_m K_f}{(2T_u p + 1)(T_r p + 1)} \quad (0.30)$$

При налаштуванні контуру на модульний оптимум передатна функція [26] набуде вигляду:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = \frac{T_r p + 1}{4T_u K_f L_m p} = \frac{T_r}{4T_u K_f L_m p} + \frac{1}{4T_u K_f L_m p} \quad (0.31)$$

ПІІ - регулятор поточкозчеплення ротора:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p}, \quad (0.32)$$

$$\text{де; } K_{i.f} = \frac{1}{4T_u K_f L_m}; T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0.023}{0.022} = 1.05 \text{ с.}$$

$$K_{p.f} = \frac{T_r}{4T_u K_f L_m} \quad (0.33)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку оберемо рівним одиниці ($K_f=1$) для зменшення часу моделювання

Підставивши параметри K_f, T_u, T_r, L_m до формули (3.32), отримаємо наступний вигляд коефіцієнтів ПІІ-регулятора поточкозчеплення [26]:

$$K_{p.f} = \frac{T_r}{4T_u L_m K_f} = \frac{1.05}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.023 \cdot 1} = 1162; \quad (0.34)$$

$$K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_m K_f} = \frac{1.05}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.023 \cdot 1} = 1106. \quad (0.35)$$

Передатна функція розімкнутої [26] системи:

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1)}. \quad (0.36)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{\text{зам.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-6} p^2 + 0.004 p + 1} \quad (0.37)$$

3.2.4 Синтез регулятора моменту ЕП

Регулятор моменту, відображений на рис. 3.5, містить у собі блок обмеження (БО) в який входить зворотній зв'язок по швидкості, пропорційну ланку, а також елемент ділення.

На вхід контура регулювання надходить завдання моменту M^* , а на виході регулятора моменту є завдання моментної складової струму I_q^* . Обмеження визначається як $|y| \leq y_{\text{lim}}$, отже обмеження в І зоні швидкості з максимальним момент двигуна буде рівнятися номінальному значенню, що у паспортних даних електродвигуна. Також на вході регулятора присутній фільтр, призначенням якого є згладжування різних завдань моменту. Регулятор являє собою аперіодичну ланку І-го порядку зі сталою часу T_ϕ .

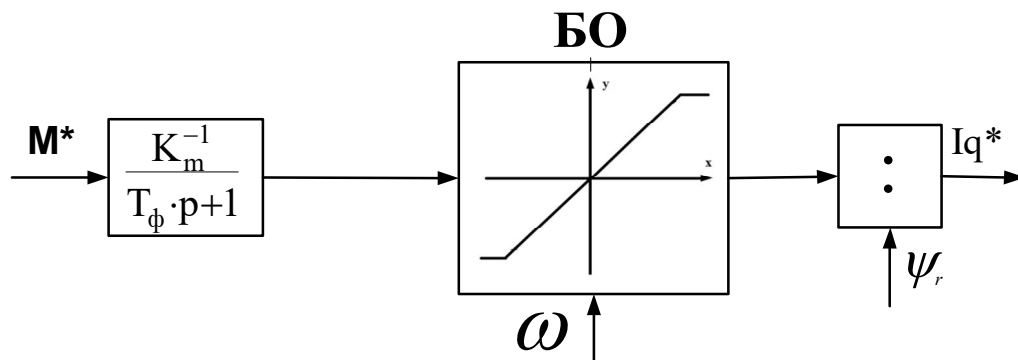


Рисунок 3.5 – Блок регулятора моменту

Висновки до розділу

В даному розділі було розроблено функціональну схему силової частини АЕП трактора, було детально розглянуто та описано її основні елементи.

4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОВОГО АЕП ТРАКТОРА

4.1 Математична модель асинхронного двигуна

Математична модель АД в системі координат (d-q), яка обертається з довільною кутовою швидкістю ω_0 , задана наступною системою нелінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \mu_1(\psi_d i_q - \psi_q i_d), \\ \dot{i}_d &= -\gamma i_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + \frac{u_d}{\sigma}, \\ \dot{i}_q &= -\gamma i_q - \omega_0 i_d + \alpha \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + \frac{u_q}{\sigma}, \\ \dot{\psi}_d &= -\alpha \psi_d + (\omega_0 - \omega) \psi_q + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\psi}_q &= -\alpha \psi_q - (\omega_0 - \omega) \psi_d + \alpha L_m i_q, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \quad \varepsilon_0(0) = 0,\end{aligned}\tag{4.1}$$

де $(u_d, u_q)^T$ – вектор керуючих напруг статора, $(i_d, i_q)^T$, $(\psi_d, \psi_q)^T$ – компоненти векторів струму статора та потокозчеплення ротора, ω – кутова швидкість ротора, M – електромагнітний момент, M_c – момент навантаження, J – повний момент інерції, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, ε_0 , ω_0 – кутове положення та кутова швидкість системи координат (d-q), що обертається, відносно стаціонарної системи координат статора (a-b). Модель (2.1) прийнята для однієї пари плусів.

Коефіцієнти, що присутні в моделі розраховуються наступним чином:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right); \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m; \quad \mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2};$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори і індуктивності статора і ротора відповідно [27]

4.2 Пряме векторне керування моментом

Ідея полягає в тому, що в алгоритмі векторного керування використовуються оцінені значення вектора потокозчеплення ротора за допомогою спостерігача.

Вимірюваним є вектор змінних $y = (\omega, i_d, i_q)^T$, в той час, як потокозчеплення ротора не вимірюється.

Визначимо вектор заданих значень як $y_1^* = (M^*, \psi^*)^T$, де M^* та $\psi^* > 0$ – задані траєкторії зміни моменту та модуля потокозчеплення. Похибка відпрацювання заданої траєкторії моменту запишеться у вигляді

$$\tilde{M} = M - M^*. \quad (4.2)$$

Проблема відпрацювання заданих траєкторій зміни електромагнітного моменту – потоку формується наступним чином. Припустимо, що для моделі АД, заданої (4.1), справедливо наступне:

А.1. Кутова швидкість та струми статора, задані вектором y , доступні для вимірювання.

А.2. Параметри АД відомі та незмінні.

А.3. Задані траєкторії моменту M^* та потоку $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями часу з обмеженими першою та другою похідними за часом.

Відповідно до припущень потрібно синтезувати алгоритм керування по вимірюваному виходу, який забезпечує:

О.1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту – потоку, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (4.3)$$

О.2 Асимптотичну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0 \quad (4.4)$$

О.3. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Відповідно до припущень А1-А3 потрібно синтезувати алгоритм керування по вимірюваному виходу, який забезпечує:

О.1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту – потоку, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (4.5)$$

О.2 Асимптотичну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0 \quad (4.6)$$

О.3. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Для того, щоб побудувати алгоритм векторного керування використаємо заміну реальних потокозчеплень на їх оцінені значення

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2a}}{|\hat{\psi}_2|} \\ \sin \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2b}}{|\hat{\psi}_2|} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\text{де } |\hat{\psi}_2| = (\hat{\psi}_{2a}^2 + \hat{\psi}_{2b}^2)^{\frac{1}{2}}$$

Рівняння АД з урахуванням (4.29) та рівняння спостерігача набувають вигляду

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega \\
\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c) \\
M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \tilde{\psi}_{2q} i_{1d})
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q \\
\dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} + v_d \\
\dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q} + \alpha L_m i_{1d}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\
\left| \dot{\hat{\psi}}_2 \right| &= -\alpha \hat{\psi}_2 + \alpha L_m i_{1d} \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n \omega_0 + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\left| \hat{\psi}_2 \right|}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Згідно принципу розділення необхідно замінити в алгоритмі керування моментом та потокозчеплення реальний модуль вектора потокозчеплення $|\psi_2|$ на його оцінене значення $|\hat{\psi}_2|$, а також реальну похибку відпрацювання оціненого значення модуля потокозчеплення $\tilde{\psi}_2$, визначену як

$$\tilde{\psi}_2 = |\hat{\psi}_2| - \psi^* \tag{4.11}$$

Для подальшого конструювання алгоритму відпрацювання струмів статора визначимо похибки відпрацювання струмів статора:

$$\begin{aligned}
\tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^* \\
\tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Похибки оцінювання потокозчеплень в системі координат (d-q)

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_d &= \psi_d - \hat{\psi}_d, \\
\tilde{\psi}_q &= \psi_q - \hat{\psi}_q
\end{aligned} \tag{4.13}$$

З останніх чотирьох рівнянь (4.8) отримаємо рівняння динаміки похибок оцінювання в системі (d-q)

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d\end{aligned}$$

Рівняння динаміки похибок оцінювання моменту, струмів статора та оціненого потокозчеплення запишуться

$$\begin{aligned}M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi^* \tilde{i}_{lq} + \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_{2d} (\dot{i}_{lq}^* + \tilde{i}_{lq}) - \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_{2q} (\dot{i}_{ld}^* + \tilde{i}_{ld}) \\ \dot{\tilde{i}}_{ld} &= -\gamma \tilde{i}_{ld} + \alpha \beta (\tilde{\psi}_d + |\hat{\psi}_2|) + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q - \gamma \dot{i}_{ld}^* - \dot{i}_{ld}^* + v_d \\ \dot{\tilde{i}}_{lq} &= -\gamma \tilde{i}_{lq} + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega (\tilde{\psi}_d + |\hat{\psi}_2|) - \gamma \dot{i}_{lq}^* - \dot{i}_{lq}^* + v_q \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -\alpha \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_{ld} - \alpha \psi^* + \alpha L_m \dot{i}_{ld}^* - \dot{\psi}^* \\ \dot{i}_{lq}^* &= \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*}\end{aligned}\quad (4.14)$$

Аналогічно, як це виконано для ідеального полеорієнтування, керуюча дія в (4.14) формується як:

$$\begin{aligned}\dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq} \\ v_d &= -k_{iq1} \tilde{i}_{lq} - x_q + \gamma \dot{i}_{lq}^* + \beta p_n \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{lq}^*\end{aligned}\quad (4.15)$$

де $(k_{id1}, k_{iid}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі q, похідна \dot{i}_{lq}^* розраховується з (4.14).

Для електромагнітної підсистеми синтезуємо:

- Регулятор модуля потокозчеплення

$$\begin{aligned}\dot{i}_{ld}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi} \right), \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi}\end{aligned}\quad (4.16)$$

- Регулятор струму польової компоненти вектора струму статора \dot{i}_{ld}

$$\begin{aligned}\dot{x}_d &= k_{id} \tilde{i}_{1d} \\ v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d + \gamma i_{1d}^* - \alpha \beta \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^*\end{aligned}\quad (4.17)$$

$(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора модуля потокозчеплення, $(k_{id1}, k_{id}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі d, похідна \dot{i}_{1d}^* розраховується з (4.8).

Після підстановки модифікованих (4.15) – (4.17) отримаємо наступні рівняння похибок відпрацювання моменту

$$\begin{aligned}M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left((\tilde{\psi}_d + \tilde{\psi}) (\dot{i}_{1q}^* + \tilde{i}_{1q}) + \psi^* \tilde{i}_{1q} - \tilde{\psi}_{2q} (\dot{i}_{1d}^* + \tilde{i}_{1d}) \right) \\ \dot{x}_q &= k_{iq} \tilde{i}_{1q} \\ \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2d}\end{aligned}\quad (4.18)$$

та координат електромагнітної підсистеми АД

$$\begin{aligned}\dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -(\alpha + k_{\psi 1}) \tilde{\psi} - x_\psi + \alpha L_m \tilde{i}_{1d} \\ \dot{x}_d &= k_{id} \tilde{i}_{1d} \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2d} - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q}\end{aligned}\quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d\end{aligned}\quad (4.20)$$

Об'єднані рівняння алгоритму відпрацювання моменту та потокозчеплення ротора вміщують наступні функціональні блоки [28].

Асимптотично лінійаризуючий регулятор за вимірюваним виходом

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} &= e^{J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \dot{i}_{1d} \\ \dot{i}_{1q} \end{pmatrix} = e^{-J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} \dot{i}_{1a} \\ \dot{i}_{1b} \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} &= \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 \dot{i}_{1q} + v_d \\ \omega_0 \dot{i}_{1d} + v_q \end{pmatrix} \\ \omega_0 &= \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_q}{|\hat{\psi}_2|}\end{aligned}\quad (4.21)$$

Регулятор моменту

$$\dot{i}_{1q}^* = \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*} \quad (4.22)$$

Регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{1q} \\ v_q &= -k_{iq1} \tilde{i}_{1q} - x_q + \gamma i_{1q}^* + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{1q}^* \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right) \quad (4.24)$$

Регулятор модуля потокозчеплення

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi} \right) \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Регулятор струму по осі d

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{1d}, \\ v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d + \gamma i_{1d}^* - \alpha \beta \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^*, \\ \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* + \alpha L_m k_{\psi 1} \tilde{i}_{1d} + \left[k_{\psi 1} (\alpha + k_{\psi 1}) - k_{\psi i} \right] \tilde{\psi} - k_{\psi i} x_{\psi} \right) \end{aligned} \quad (4.48)$$

Висновки до розділу

В даному розділі проведено синтез прямого (DFOC) алгоритму векторного керування АД. Головна різниця між DFOC та IFOC – це наявність спостерігача в DFOC. В одному випадку при керуванні в регуляторі потоку є і завдання і компенсація похибок, а в іншому – лише завдання. З точки зору динаміки – обидва алгоритми при однакових початкових умовах дають однакові результати, але якщо задане потокозчеплення прораховується в реальному часі, то може виникнути проблема з розрахунком похідної від завдання потоку, тобто якщо обох алгоритмів позбавити похідної від заданого потокозчеплення, то обидва алгоритми працюватимуть по різному.

5 СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ В MATLAB/SIMULINK, ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ І ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В САК АЕП ТРАКТОРА

5.1 Розрахунок номінальних даних двигуна

Вихідні дані для розрахунку параметрів наведені в таблиці 2.2.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад/с.} \quad (5.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.16}{1} = 314.16 \text{ рад/с.} \quad (5.2)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_n) = 314.16 \cdot (1 - 0.021) = 307.5 \text{ рад/с.} \quad (5.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{18.5 \cdot 10^3}{307.5} = 60.16 \text{ Нм.} \quad (5.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності):

$$M_k = M_n \cdot \lambda = 2.2 \cdot 60.16 = 132.35 \text{ Нм.} \quad (5.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В,} \quad (5.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{18.5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.885 \cdot 0.92} = 34.5 \text{ А.} \quad (5.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$\begin{aligned} U_{na} &= \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В} \\ I_{na} &= \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 34.5 = 48.7 \text{ А} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Номінальний повний опір:

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{220}{34.5} = 6.37 \text{ Ом} \quad (5.10)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора на холостому ході за $R_f = 0$

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314.16} = 0.987 \text{ Вб.} \quad (5.11)$$

5.2 Дослідження системи прямого векторного керування електроприводом трактора у режимі косіння з мульчуванням

Дослідження синтезованого алгоритму прямого векторного керування моментом АД виконувалось методом математичного моделювання для асинхронного двигуна 4A160M2У3 потужністю 18.5 кВт з параметрами, наведеними в п.п. 5.2.

Для дослідження було змодельовано процес косіння трави в саду і використовувалась наступна послідовність операцій:

1. На початковому інтервалі часу ($0 \leq t < 2.2\text{с}$) двигун збуджується до значення, яке дорівнює номінальному потокозчепленню ротора $\psi^* = 0.95 \text{ Вб}$.
2. Починаючи з моменту часу $t = 2.2 \text{ с}$ трактор розганяється до номінальної швидкості ($\omega_n = 2,3 \text{ м/с}$).
3. На проміжку часу $t = 4.2 \div 8.5 \text{ с}$ трактор їде з номінальною швидкістю.
4. Починаючи з часу $t = 8.5 \text{ с}$ трактор сповільнюється до швидкості $\omega = 0,7\omega_n$.
5. В час $t = 9.25$ трактор закінчує сповільнення і починає їхати зі швидкістю $\omega = 0,7\omega_n (1,61 \text{ м/с})$
6. В час $t = 9.3 \text{ с}$ водій вмикає косарку і починається процес косіння (момент двигуна в цей час $M = 0.8N_n$)
7. В час $t = 15.4$ водій вимикає косарку (момент двигуна повертається до значення $M = 0.3M_n$)
8. На проміжку часу $t = 15.5 \div 16.1 \text{ с}$ трактор розганяється до швидкості $\omega = 0.9\omega_n (2.07 \text{ м/с})$ для виконання розвороту
9. Протягом часу $t = 16.1 \div 18.5$ виконується розворот.
10. В час $t = 18.5 \div 19.1$ трактор знову сповільнюється до швидкості $\omega = 0,7\omega_n$.
11. В час $t = 19.2$ водій знову вмикає косарку і починається процес косіння.
12. В час $t = 24.95$ водій вимикає косарку.
13. В період часу $t = 25.35 \div 26.15$ трактор розганяється до $\omega = \omega_n$.
14. До часу $t = 30.45$ трактор їде з номінальною швидкістю.
15. На проміжку часу $t = 30.45 \div 32.45$ трактор сповільнюється і зупиняється.

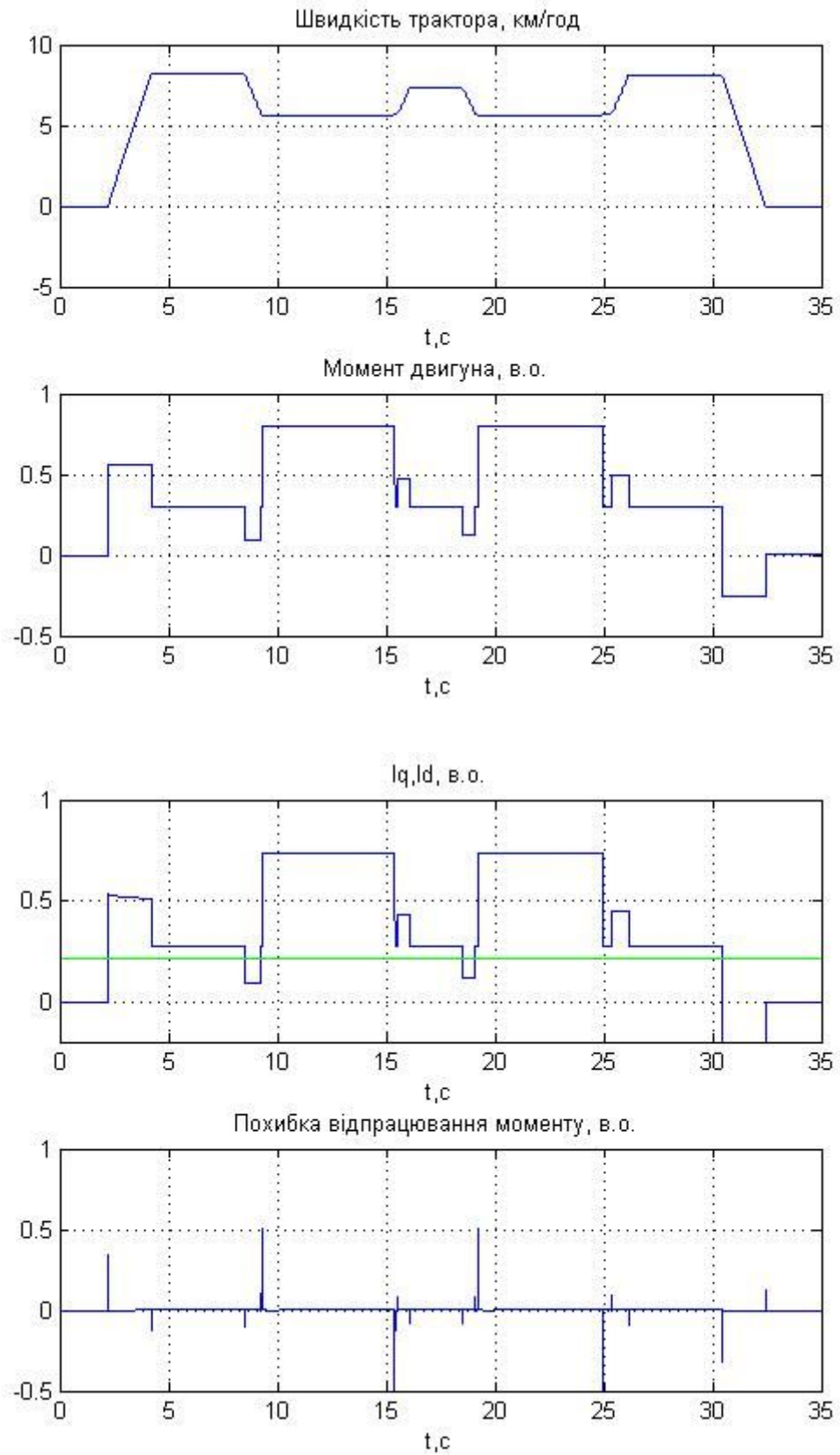


Рисунок 5.1 а) – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні моментом АД потужністю 18.5 кВт в режимі косіння з мульчуванням

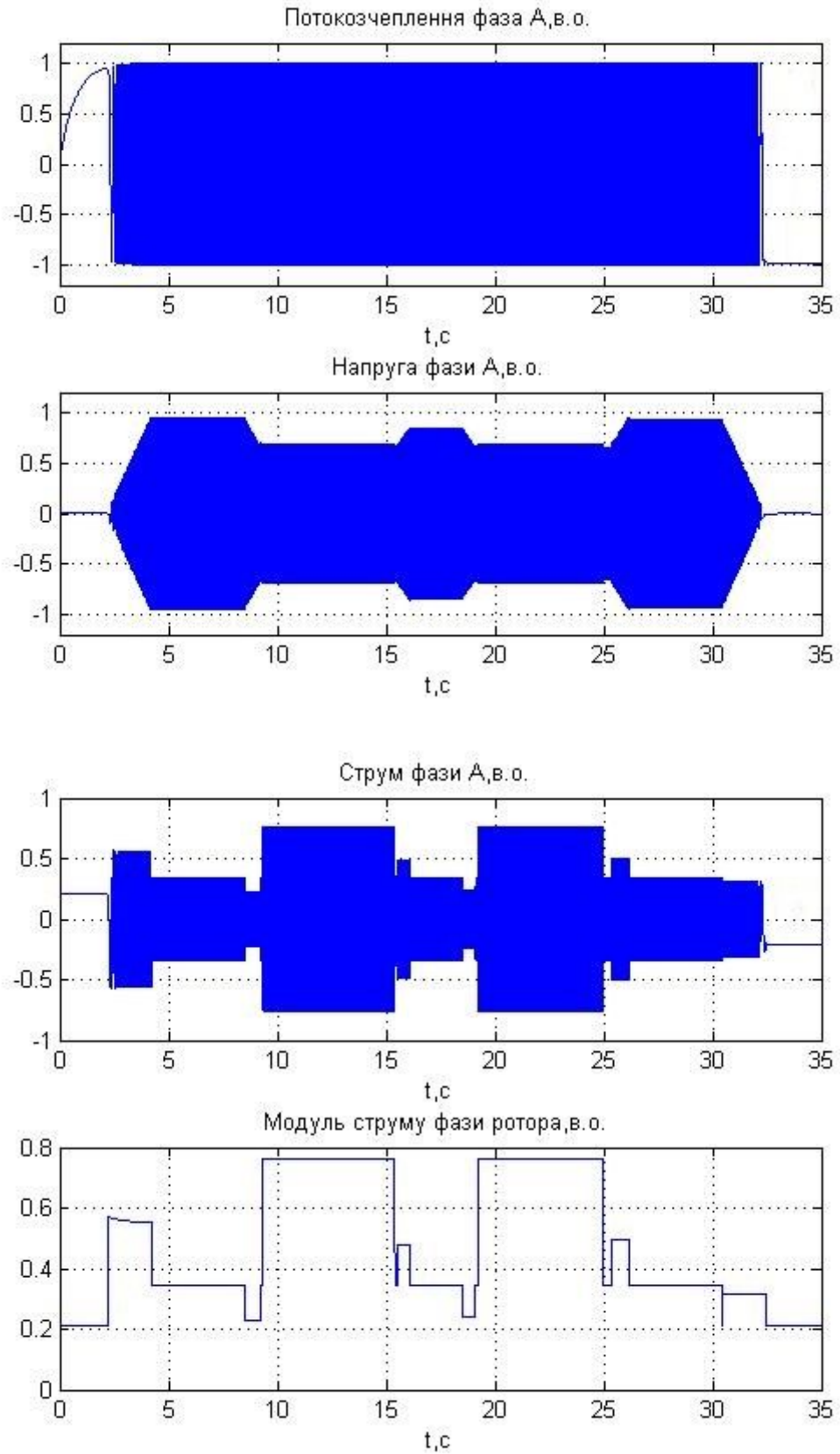


Рисунок 5.1 б) – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні моментом АД потужністю 18.5 кВт в режимі косіння з мульчуванням

5.3 Дослідження системи прямого векторного керування електроприводом трактора у режимі пересування

Під час досліджень використовувалась наступна послідовність операцій:

1. Протягом початкового інтервалу часу ($0 \leq t < 2.2$ с) двигун збуджується до номінального значення потокозчеплення ротора, а саме $\psi^* = 0.95$ Вб.
2. Починаючи з часу $t = 2.2$ с трактор розганяється до $\omega = \omega_n = 2,3$ м/с.
3. На проміжку часу $t = 4.2 \div 25$ с трактор їде з номінальною швидкістю.
4. В період $t = 9.3$ починається підйом – трактор їде під гірку.
5. В час $t = 15.8$ підйом закінчується і починається спуск – починається гальмування двигуном, і завдяки цьому відбувається рекуперація енергії.
6. В час $t = 22.3$ спуск закінчується, і до $t = 25$ трактор рухається по рівній дорозі з номінальною швидкістю.
7. В період часу $t = 25 \div 27$ трактор гальмує до повної зупинки.

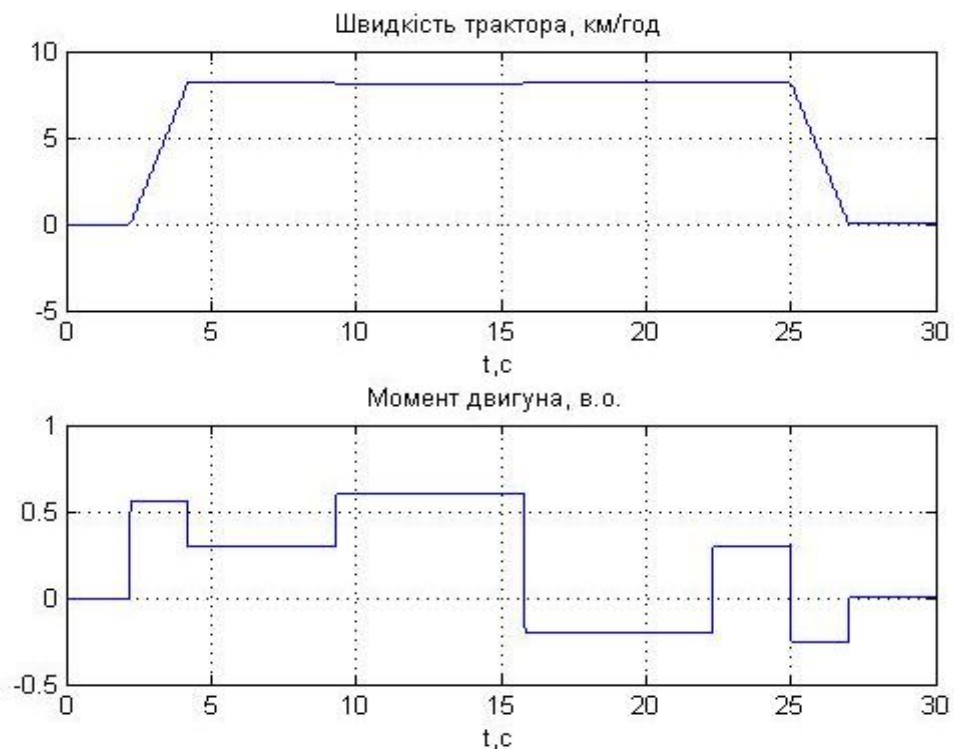


Рисунок 5.2 а) – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні моментом АД потужністю 18.5 кВт при переїзді трактором пагорба

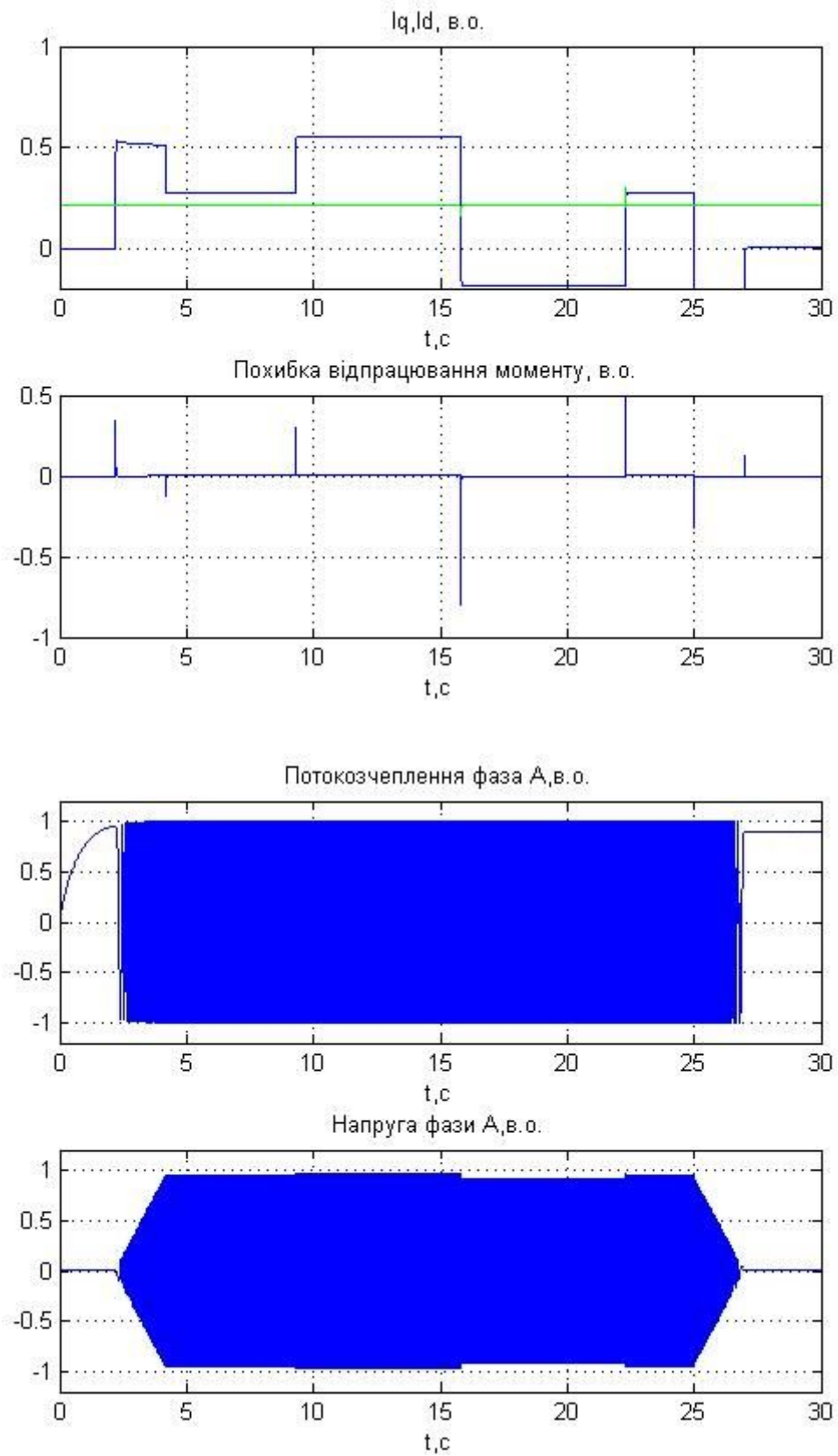


Рисунок 5.2 б) – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні моментом АД потужністю 18.5 кВт при переїзді трактором пагорба

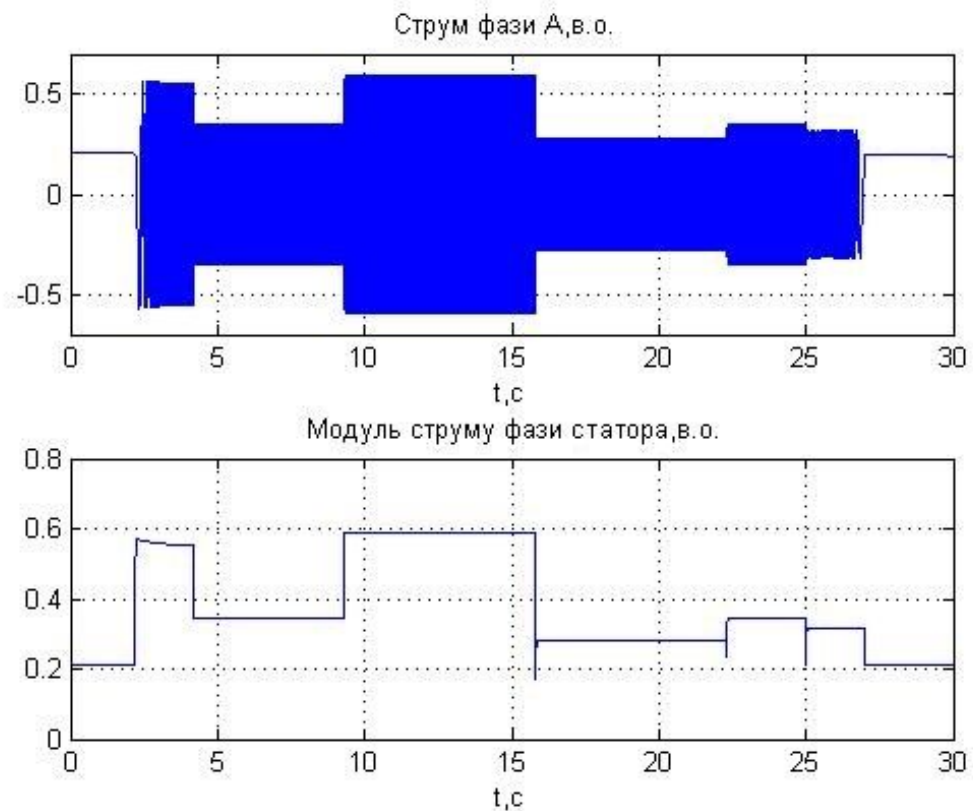


Рисунок 5.2 в) – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні моментом АД потужністю 18.5 кВт при переїзді трактором пагорба

На рис 5.1-5.2 зображені графіки перехідних процесів, таких як швидкість, момент двигуна та похибка моменту, потік, струми та напруга.

З графіків помітно, що момент та потік відпрацьовуються практично без похибок, це свідчить про те, що відбувається асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій.

Висновки до розділу

1. Розраховано номінальні дані двигуна, що дозволило визначити наступні параметри схеми заміщення: індуктивності та активні опори статора і ротора, які в свою чергу необхідні для проведення математичного моделювання в MatLab/Simulink алгоритму, синтезованого в четвертому розділі.

2. Завдяки математичному моделюванню було встановлено, що при відпрацюванні заданої траєкторії моменту алгоритм прямого векторного керування моментом асимптотично відпрацьовує момент, при цьому в системі відбувається полеорієнтування.

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проєкті було розроблено та досліджено тяговий векторно-керований асинхронний електропривід садового міні-трактора. Проведено виконано аналітичний огляд за темою роботи та сформульовані вимоги до системи. Об'єктом дослідження була система прямого векторного керування асинхронним електроприводом міні-трактора. У підсумку було отримано такі висновки та результати.

1. Розглянуто існуючі системи керування моментом і на основі цього були сформовані технічні вимоги до тягового приводу трактора. Як прототип було обрано садовий міні-трактор Hocht-5114. Була розрахована потужність двигуна на основі навантажувальної діаграми методом еквівалентного моменту та обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 4A160M2Y3, а також була розрахована акумуляторна батарея ємністю 98 А·год.

2. Проведено розроблення функціональної схеми силової частини АЕП трактора, також було детально розглянуто основні елементи цієї схеми.

3. Синтезовано алгоритм прямого векторного керування моментом тягового асинхронного двигуна садового міні-трактора.

4. Використовуючи програмне забезпечення Matlab, було досліджено алгоритм керування моментом при відпрацюванні заданої траєкторії моменту (навантажувальної діаграми), в результаті чого встановлено, що цей алгоритм забезпечує відпрацювання моменту з допустимими похибками.

5. Для забезпечення можливості практично реалізувати систему векторного керування, за спрощеною методикою було розраховано перетворювач, а також розраховано та обрано елементи силової частини, а саме модуль IGBT-транзисторів, конденсатори фільтра, давачі струму та напруги.

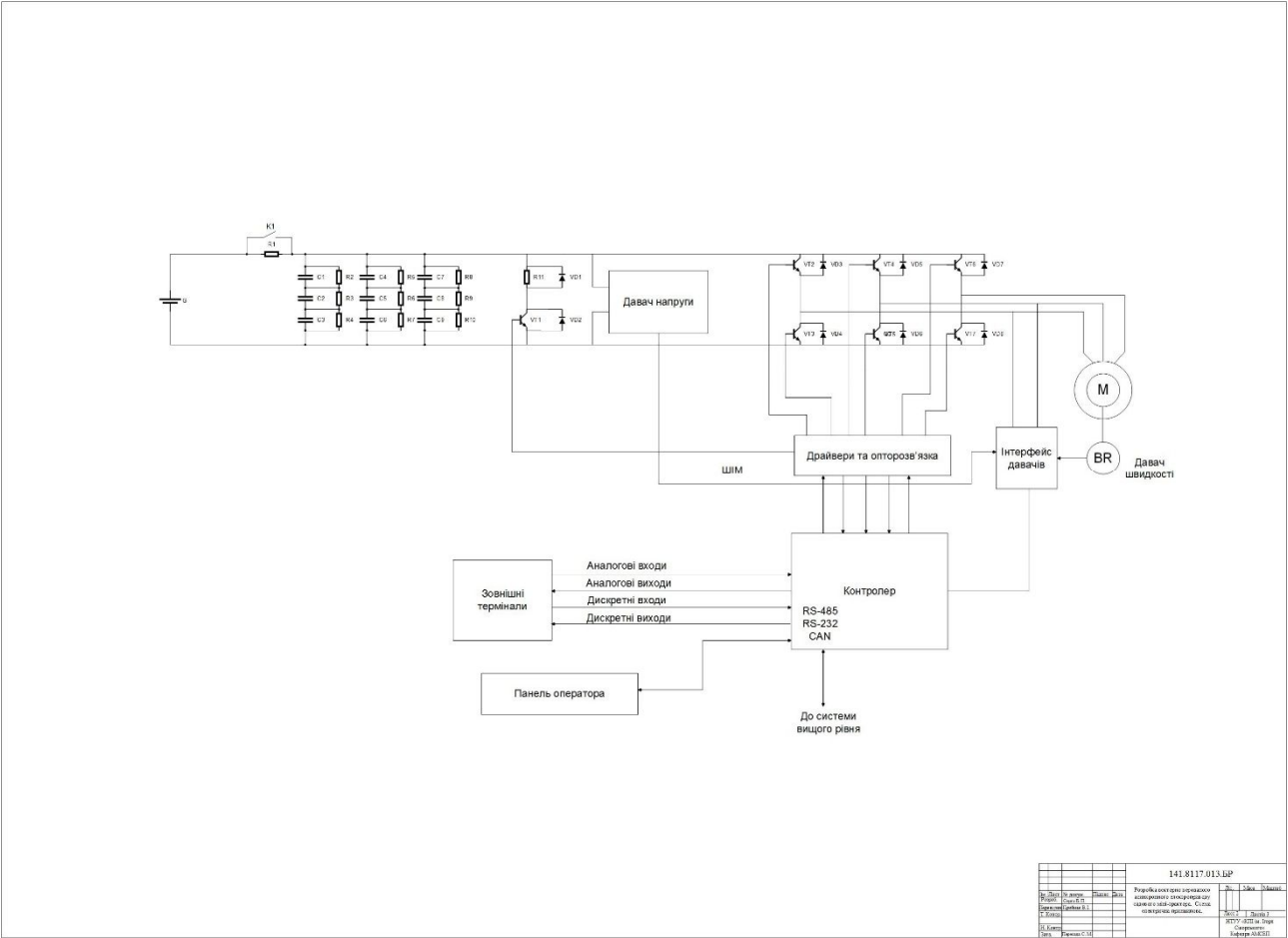
6. Встановлено, що розроблений тяговий асинхронний електропривід забезпечує роботу садового міні-трактора із необхідними показниками якості як у найважчому технологічному режимі – косіння з мульчуванням, так і в режимі простого переїзду.

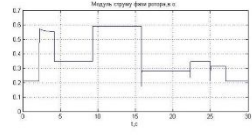
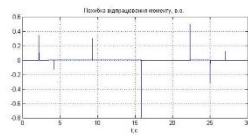
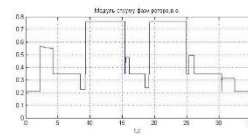
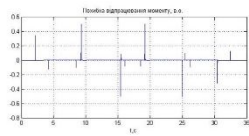
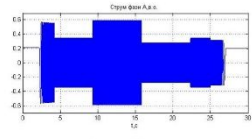
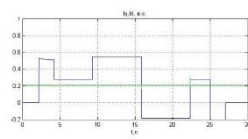
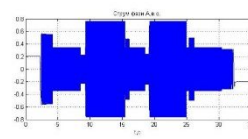
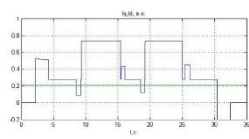
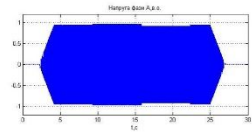
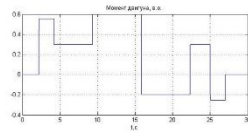
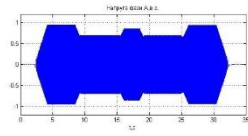
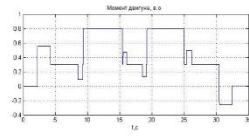
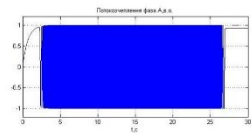
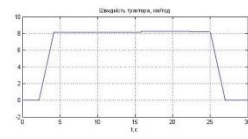
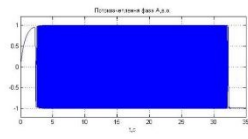
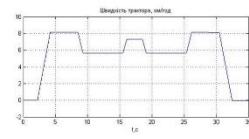
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%A2%D0%97-12>
2. Устройство тракторов/ В.М. Шарипов, К.И. Городецкий, А.П. Маринкин и др.; Под общ. ред. В.М. Шарипова . – М.: МГТУ “МАМИ”, 2007. – 320 с.
3. Брызгалова Д.А. Статья по материалам дипломной работы «Электроснабжение электромобиля» – Тольятти – 2010г.
4. Krause P.C. Analysis of Electric Machinery / P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. – New York: Wiley-IEEE Press, 1995. – 580 p.
5. Luenberger D.G. An introduction to observers / D.G. Luenberger // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1971. – Vol. 16. – № 6. – P. 596-602.
6. Bose B.K. Power electronics and ac drives / B.K. Bose. – Prentice-Hall, 1986. – 422 p.
7. Leonhard W. Control of Electrical Drives / W. Leonhard. – Springer, 2001. – 484 p.
8. Димко С. С. Векторне керування з максимізацією співвідношення момент – струм статора: дис. канд. техн. наук : 05.09.03 / Димко Сергій Сергійович – Київ, 2015. – 184 с.
9. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» денної та заочної форм навчання/ Уклад. Пересада С.М., Пушкар М.В. – К.: НТУУ ”КПІ”, 2014.
10. Larminie J. Electric Vehicle Technology Explained / J. Larminie, J. Lowry. – Chichester: Copyright, 2003. – 296 с.
11. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.

12. А. Э. Кравчик Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504с.
13. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.
14. Peresada S. and Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // *Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. –2000. –Vol. 14. –P. 177–200.
15. C. N. Patil, K.S. Shashishekar, A. K. Balasubramanian, and S. V. Subbaramaiah, "Aerodynamic Study and Drag Coefficient Optimization of Passenger Vehicle", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 1, Issue 7, September-2012.
15. M. Eshani, Y. Gao, and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, 2009.
16. Функціональна схема та спрощений розрахунок перетворювача електропривода змінного струму. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702 – “Електромеханіка” спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2013 р. –22 с.
17. IGBT модуль [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.semikron.com/de/produkte/produktklassen/igbtmodule/detail/semix15-1gd12e4s-27890200.html>
18. Конденсатори [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://en.tdk.eu/tdk-en/529316/products/product-catalog/aluminum-electrolytic-capacitors/capacitors-with-screw-terminals>
19. Датчик сструму [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.lem.com/docs/products/ho-np-0100%50series.pdf>.

20. Датчик напруги [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-1200.pdf>.
21. Novotny D. W., Lipo T. A. Vector control and dynamics of AC drives. Oxford: Clarendon press, 2005. 440 p.
22. Vas P. Vector Control of Alternating Current Machines. Oxford University Press, 1990. 332 p.
23. Соколовський Г. Г. Електроприводи переменного тока с частотным регулированием : учеб. Москва : 2006. 265 с.
24. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов : учебник. Москва : Машиностроение, 1990. 304 с.
25. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ: Либідь, 2007. 656с.
26. Автоматизація електромеханічних систем. Курсовий проект. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ "КПІ", 2014 р. 43 с.
27. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Прямое векторное управление асинхронным двигателем со свойством глобальной экспоненциальной устойчивости // *Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки"*. –2002. –Ч. 2. –С. 36–42.
28. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. –96 с.





141.8117.013.BP			
№ документа	Дата	Исполнитель	Проверка
141.8117.013.BP	2017.01.10	И.И.И.	И.И.И.
141.8117.013.BP	2017.01.10	И.И.И.	И.И.И.
141.8117.013.BP	2017.01.10	И.И.И.	И.И.И.
141.8117.013.BP	2017.01.10	И.И.И.	И.И.И.