

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка»

на тему:

«Система автоматичного керування асинхронним двигуном безпілотного трактора»

Виконав: студент __2__ курсу, групи _____ ЕП-311мп _____

Стельмах Іван Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., доц. Приймак Богдан Іванович

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



(підпис)

Консультант _____

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

Рецензент проф., д.т.н., проф. Васьковський Юрій Миколайович

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

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Стельмах Іван Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система автоматичного керування асинхронним двигуном
безпілотного трактора _____

_____,
науковий керівник дисертації: Приймак Богдан Іванович, к.т.н., доц., _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: Асинхронний електропривод безпілотного трактора _____

4. Вихідні дані: Номінальна усталена швидкість 10 км/год, Момент інерції тягового АД 0,19 кгм², повна маса електротрактору 1770 кг.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Провести математичний опис об'єкта керування; 2. Розрахувати потужності двигуна, акумуляторної батареї та обрати силове обладнання; 3. Побудувати функціональну схему; 4. Розробити синтез регуляторів системи векторного керування АД безпілотного

трактора та проектування оптимізатора втрат потужності; 5. За отриманими рівняннями побудувати модель системи в середовищі MatLab/Simulink та дослідити статичні і динамічні режими САК АД безпілотного трактора; 6. Розробити стартап-проект.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Функціональна схема САК АД безпілотного трактора, модель САК АД безпілотного трактора, схема основних вузлів електротрактора, структурна схема системи стандартного прямого векторного керування АД, функціональна схема оптимізатора втрат, графіки перехідних процесів САК АД.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури за темою роботи	10.09.22	
2	Формування технічних вимог до системи автоматичного керування асинхронним двигуном (САК АД) безпілотного трактора	15.09. 22	
3	Математичний опис об'єкта керування. Розрахунок потужності двигуна, акумуляторної батареї та вибір силового обладнання	30.09. 22	
4	Побудова функціональної схеми САК АД безпілотного трактора	10.10. 22	
5	Синтез регуляторів системи векторного керування АД безпілотного трактора та проектування оптимізатора втрат потужності	25.10. 22	

6	Побудова моделі системи в середовищі MatLab/Simulink та дослідження статичних і динамічних режимів САК АД безпілотного трактора	10.11. 22	
7	Написання статті на університетську студентську конференцію	15.11. 22	
8	Підготовка стартап-проекту	25.11. 22	
9	Підготовка дисертації у чорновому варіанті та передача її на перевірку	03.12. 22	
10	Завершальне оформлення роботи та підготовка презентації і доповіді для захисту	10.12. 22	

Студент



 (підпис)

Іван СТЕЛЬМАХ

Науковий керівник дисертації



 (підпис)

Богдан ПРИЙМАК

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 100, рисунків – 32, таблиць – 29, графічна частина на 6 листах А1.

Метою даної роботи побудова та дослідження системи автоматичного керування асинхронним двигуном безпілотного трактора з оптимізацією втрат потужності.

В роботі проведено аналітичний огляд безпілотних тракторів, на базі якого поставлені вимоги до електроприводу. Надано математичний опис системи векторного керування. Розраховано тяговий двигун, до якого підібрано елементи живлення та перетворюючий пристрій. Було побудовано функціональну схему, яка йшла в основі моделі для системи в середовищі MATLAB/SIMULINK. Проведена симуляція роботи моделі в двох режимах трактора: оранки та фрезерування ґрунту. В результаті отримано працездатну модель САК АД безпілотним трактором з мінімізатором втрат потужності.

Розрахунок і реалізація дисертації дипломного проекту забезпечувались за допомогою використання наступних програмних середовищ: Microsoft Office Word 2010, Microsoft Office Visio 2013, Matlab R2020a.

*ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН,
БЕЗПІЛОТНИЙ ТРАКТОР, МІНІМІЗАТОР ВТРАТ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ.*

					141.0008.003.МД			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматичного керування асинхронним двигуном безпілотного трактора РЕФЕРАТ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Стельмах І.В.						
Перевір.		Приймак Б.І.					5	100
						НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»		
Н. Контр.						Каф. АЕМС-ЕП		
Затверд.		Ковбаса С. М.						

SUMMARY

The master's dissertation contains: pages - 100, figures - 32, tables - 29, graphic part on 6 sheets of A1.

The purpose of this work is to minimize power losses and study the system of automatic control of an asynchronous motor of an driverless tractor.

In the work, an analytical review of unmanned tractors was carried out, on the basis of which the requirements for the electric drive were set. A mathematical description of the vector control system is provided. A traction motor is calculated, to which power elements and a converting device are selected. A functional diagram was built, which was the basis of the model for the system in the MATLAB/SIMULINK environment. Simulation of model operation in two tractor modes: plowing and rototilling operation was carried out. As a result, a working model of SAC AM driverless tractor with a power loss minimizer was obtained.

The calculation and realization of the thesis of the diploma project was ensured by using the following software environments: Microsoft Office Word 2010, Microsoft Office Visio 2013, Matlab R2020a.

ELECTRIC TRACTION DRIVE, INDUCTION MOTOR, DRIVERLESS TRACTOR, LOSS MINIMIZER, VECTOR CONTROL.

					141.0008.003.МД			
	etter	№ of doc.	Sign.	Date	System of automatic control of an asynchronous motor of an driverless tractor SUMMARY	L.	Page	Pages
Devel.	I. Stelmah						5	100
Checked	B. Prvimak							
N. Contr.						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA		
Approved.	S Kovbasa							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	13
1.1 Загальні відомості про безпілотний трактор	13
1.2 Історія виникнення безпілотного трактору	15
1.3 Проблеми безпеки на рівні сприйняття	19
1.4 Основні конструктивні вузли трактора.....	24
1.5 Інтеграція безпіотної/інтелектуальної системи керування	26
1.6 Методи керування електроприводом АД.....	28
1.7 Формування технічних вимог до системи САК АД безпілотного трактора	31
Висновки до розділу 1:	34
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ	35
2.1 Математичний опис об'єкта керування	35
2.2 Модель втрат потужності	38
2.3 Розрахунок потужності двигуна.....	41
2.4 Перевірка правильності вибору двигуна	46
2.5 Розрахунок акумуляторної батареї.....	47
2.6 Розрахунок номінальних даних двигуна та параметрів схеми заміщення	49
2.7 Вибір перетворюючого пристрою	52
Висновки до розділу 2:	55

РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ, СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМІЗАТОРА ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ САК АД БЕЗПІЛОТНОГО ТРАКТОРА.....	57
3.1 Функціональна схема САК АД безпілотного трактора	57
3.2 Синтез регулятора струму I_d	59
3.3 Синтез регулятора струму I_q	61
3.4 Синтез регулятора потокозчеплення ротора Ψ_r	64
3.5 Синтез регулятора швидкості ЕП.....	66
3.6 Проектування оптимізатора втрат потужності.....	68
Висновки до розділу 3:	69
РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АД БЕЗПІЛОТНОГО ТРАКТОРА.....	70
4.1 Побудова моделі САК АД в середовищі MatLab/Simulink.....	70
4.2 Дослідження перехідних процесів моделювання САК АД	70
Висновки до розділу 4:	76
РОЗДІЛ 5 ПІДГОТОВКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	77
5.1 Маркетинговий план і маркетингова стратегія проекту	77
5.2 Технологічний аудит ідеї стартапу	78
5.3 Аналіз ринкових можливостей впровадження проекту	79
Висновки до розділу 5:	90
ВИСНОВОК.....	91
ЛІТЕРАТУРА	92
ДОДАТОК А ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	97

ВСТУП

Сучасне сільське господарство залежить від безлічі важких транспортних засобів і техніки, від звичайних невеликих машин до масивних тракторів і комбайнів, які можуть важити від кількох тон, а також інше навісне обладнання. Уся ця вага разом із навантаженням робочими днями від світанку до сутінків і кількома робочими місцями ускладнює електрифікацію. Завдяки цьому, питання розвитку електричних транспортних засобів сьогодні дуже актуальне. Вони мають більш просту конструкцію, що означає, що вони мають більшу надійність і тому їх легше підтримувати.

Є ряд переваг електротракторів над тракторами на дизельному пальному. Крім того, що електричний трактор чистіший і тихіший, він набагато ефективніший, оскільки вся енергія йде на роботу, тоді як у дизельному тракторі велика частина цього витрачається як тепло. також максимальний крутний момент доступний відразу, а не на номінальній швидкості двигуна. Так як джерело живлення має лише одну рухому частину, вони потребують дуже мало обслуговування.

Асинхронні короткозамкнуті електродвигуни дуже прості за конструкцією, вони мають високу надійність в експлуатації, низьку вартість виготовлення і ремонту, менші габаритна розміри і масу в порівнянні з електродвигунами постійного струму, не вимагають особливого догляду, крім нагляду за підшипниками, ізоляцією, контактними з'єднаннями, і мають задовільні тягові властивості.

Для досягнення максимальної ефективності необхідно правильно підібрати алгоритм керування. Для зменшення втрат, добре використовувати мінімізатор втрат потужності в двигуні.

Актуальність теми. Переглянувши літературу на тему енергоефективного керування асинхронним тяговим приводом електромобілів, електротракторів тощо, можна прийти до висновку, що ця тема досі не вивчена до кінця. В тяговому приводі при роботі можливі досить

великі температури двигуна, що призводитиме до зростання втрат потужності в ньому. Тому дане питання є досить актуальним для вивчення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі «Автоматизація електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» відповідно до одного з наукових напрямів робіт кафедри та погоджено з планом підготовки магістрів.

Мета роботи і задачі досліджень. Синтез та дослідження системи автоматичного керування асинхронним двигуном безпілотного трактора з мінімізатором втрат потужності двигуна.

Для досягнення поставленої мети в межах даної дисертації необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити математичний опис об'єкта керування.
2. Розрахувати потужності двигуна, акумуляторної батареї та обрати силове обладнання.
3. Побудувати функціональну схему.
4. Виконати синтез регуляторів системи векторного керування АД безпілотного трактора та спроектувати оптимізатор втрат потужності в АД.
5. За отриманими рівняннями побудувати модель системи в середовищі MatLab/Simulink та дослідити статичні і динамічні режими САК АД безпілотного трактора.
6. Розробити стартап-проект.

Об'єктом дослідження магістерської дисертації є процеси прямого векторного керування з мінімізацією втрат потужності у тяговому АД самохідного електротрактора.

Предметом дослідження є система векторного керування АЕП електротрактора з мінімізатором втрат потужності.

Методи досліджень. У роботі використані методи теорії електричних машин, теорії електроприводу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання, теорії оптимального керування двигунами.

Наукова новизна. Застосування алгоритму векторного керування в тягових асинхронних двигунах із підвищенням енергоефективності за рахунок використання мінімізатора втрат потужності.

Практична цінність матеріалів роботи. Алгоритми керування електроприводом з магістерської дисертації можуть бути впроваджені в енергоощадні САК АЕП машин та механізмів. Розроблені в дисертації моделі можуть бути застосовуватись у навчальному процесі кафедри АЕМС-ЕП.

Особистий внесок здобувача. Отримані результати, що наведені у даній магістерській роботі, отримані у співавторстві з науковим керівником.

Основні результати дослідження. Взявши за основу системи векторного керування АД та додавши контур мінімізації втрат в двигуні було розроблено енергоефективну САК АД для безпілотного трактора. Було зроблено синтез для контурів регулювання потокозчеплення, струму та швидкості електроприводу. Контур мінімізації втрат потужності служить для функціонування на навантаженнях нижчих від номінального. Було розроблено модель в середовищі MATLAB/SIMULINK. Отримано графіки перехідних процесів в режимах оранки та фрезерування з та без оптимізації. В результаті було підтверджено значну ефективність оптимізатора втрат.

Загальна структура та обсяг роботи. Магістерська дисертація містить: сторінок – 100, рисунків – 32, таблиць – 29, графічна частина на 6 листах А1.

Апробація результатів. Отримані результати досліджень доповідались на XVI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” грудень 2022 р., Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Публікації. За темою роботи опубліковано одна стаття [40].

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ω	— кутова швидкість обертання ротора;
M	— момент асинхронного двигуна;
M_c	— статичний момент навантаження;
M_e	— електромагнітний момент двигуна;
z_p	— кількість пар полюсів;
R_s, R_r	а-ктивні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора;
$ \hat{\psi} $	— оцінка модуля вектора потокозчеплення ротора;
ψ^*	— задане потокозчеплення ротора;
i_a, i_b	— струми статора в системі (a – b);
i_d, i_q	— струми статора в системі (d – q);
u_a, u_b	— напруги статора в системі (a – b);
u_d, u_q	— напруги статора в системі (d – q);
ψ_a, ψ_b	— потокозчеплення ротора в системі (a – b);
ψ_d, ψ_q	— потокозчеплення ротора в системі (d – q);
АД	— асинхронний двигун;
САК	— система автоматичного керування;
АКБ	— акумуляторна батарея;
АЕП	— асинхронний електропривід;
МВ	— мінімізатор втрат;
ОПР	— оцінювач потокозчеплення ротора;
ОВП	— обчислювач втрат потужності;
ПЧ	— перетворювач частоти;
БО	— блок обмеження;

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1.1 Загальні відомості про безпілотний трактор

Аграрне господарство є однією з основних галузей економіки України.

Сільськогосподарські угіддя становлять 42 млн. га, що становить 70% загального капіталу країни.

Станом на 2015 рік українські агровиробники постачали продукцію до 190 країн світу.

За даними уряду, станом на 2018 рік аграрний сектор становив майже 17% ВВП України та приніс майже 38% валютних надходжень (у 2010 році сільське господарство становило 8,2% ВВП України, а сільськогосподарська продукція – 14,5%) В аграрному секторі зайнято 15,8% усіх працівників) [1].

Головною причиною такого приросту аграрної промисловості можна пояснити збільшенням та появою нової сільськогосподарської техніки. Однією з таких є трактор.

Зростання світового населення та величезні ініціативи щодо урбанізації поставили важливий виклик для сталого сільського господарства. Щоб ефективно використовувати землю для отримання максимальної продукції, розумні системи моніторингу сільського господарства на основі Інтернету речей сьогодні є абсолютною необхідністю. Сенсорні та виконавчі модулі, розгорнуті як частина таких систем, відповідають за управління водними ресурсами, моніторинг якості ґрунту та, звичайно, прогнозування безпеки та якості продукції. Включення хмарних серверів і периферійних пристроїв у таку систему на основі Інтернету речей за допомогою трирівневої архітектури може забезпечити правильні прогнози та навіть моніторинг у реальному часі з меншим трафіком Інтернету. Вертикальне землеробство є ще одним важливим напрямком, де такі системи моніторингу можуть бути дуже корисними.

Щодня в світі з'являються нові розробки автоматизації, технологічний прогрес торкнувся всіх сфер життєдіяльності суспільства. Це також стосується і

сільськогосподарської промисловості. Так і виникла ідея нового виробу – безпілотного трактору

Трактор без водія — це автономний сільськогосподарський транспортний засіб, який забезпечує високу тягу (або крутний момент) на низьких швидкостях для ведення сільського господарства та інших сільськогосподарських завдань. Його вважають безпілотним, тому що він може працювати без людини на самому тракторі. Як і інші безпілотні наземні транспортні засоби, вони запрограмовані на автоматичний моніторинг свого положення, визначення швидкості та уникнення перешкод, таких як люди, тварини або об'єкти на полі під час своєї місії [2]. Вони працюють просто за допомогою наглядача, який спостерігає за ходом роботи на станції керування, або за допомогою керованого трактора.

Основні переваги безпілотного трактору:

- Підвищення точності в землеробстві;
- Надає достовірні дані для фермера;
- Сприяє більшій тривалості роботи на фермі;
- Сприяє ефективному управлінню землею, збору додаткової інформації;
- Захист від небезпеки фермера.

Типи тракторів.

Перед початком роботи над проектом необхідно визначитись з типом трактору який буде проектуватись.

На рисунку 1.1 зображено основні типи тракторів за їх призначенням, типом ходової частини, типом рами, та тяговим зусиллям.

В цьому проекті буде спроектовано безпілотний малогабаритний електротрактор загального призначення, з колісним типом ходової частини, малої потужності.

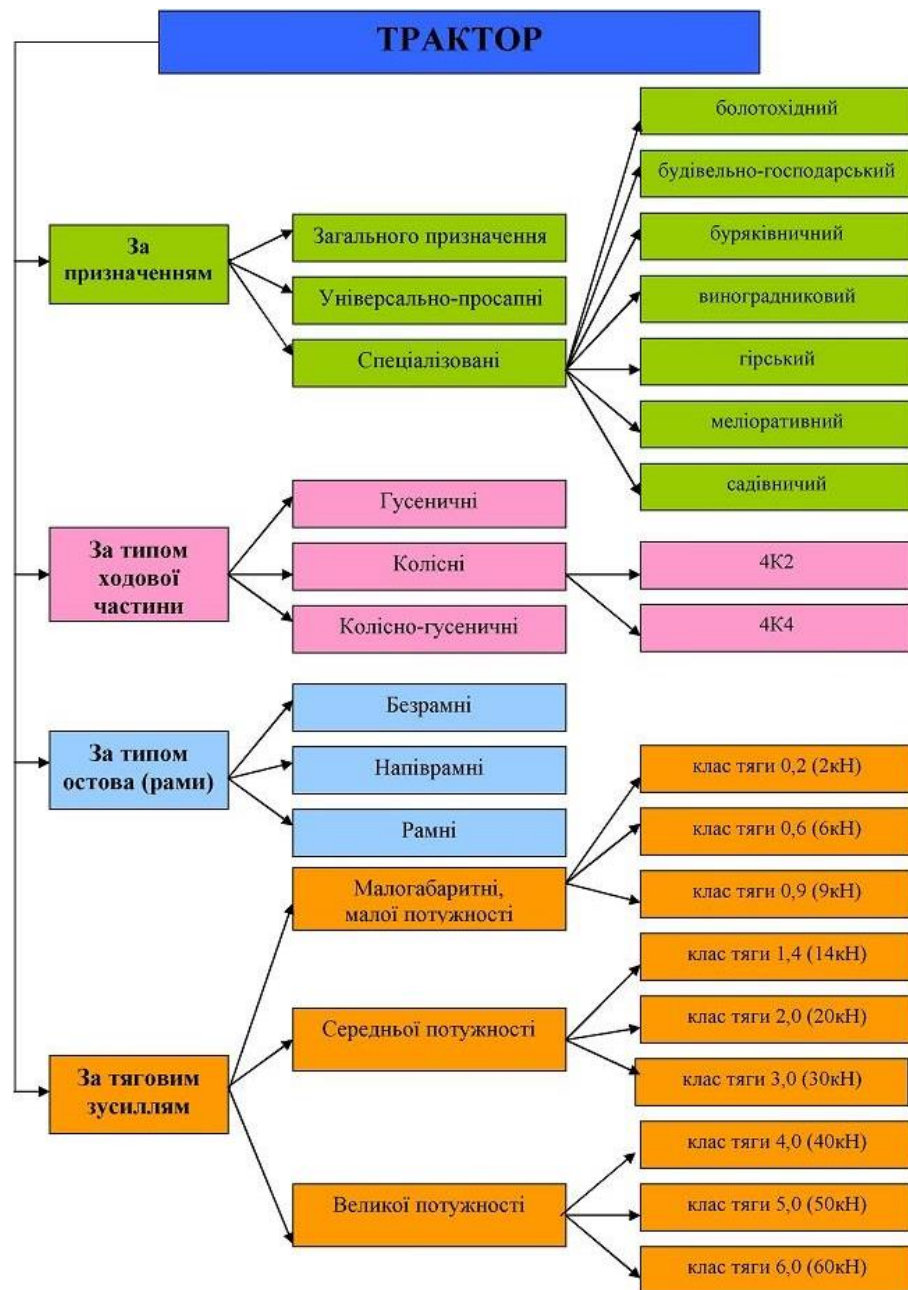


Рисунок 1.1 – Класифікація тракторів[33]

1.2 Історія виникнення безпілотного трактору

Ідея безпілотних тракторів виникла в 1940 році, коли Френк У. Ендрю винайшов власний трактор. Щоб керувати його безпілотним трактором, у центрі поля розміщували ківш або нерухоме колесо, а трос обмотували навколо рульового важеля в передній частині трактора [3]. У 1950-х роках Форд розробив безпілотний трактор, який вони назвали Sniffer, але він так і не був випущений, оскільки ним не можна було керувати бездротовим способом під землею. Значні досягнення в технології безпілотного трактора відбулися лише в

1994 році, коли інженери Інституту Силсо розробили систему аналізу зображень для керування невеликим безпілотним трактором, призначеним для вирощування овочів і коренеплодів. Цей новий трактор також може працювати з невеликими поворотами стрічки.

Сучасна технологія безпілотного трактора базується на останніх версіях безпілотних транспортних засобів і сільськогосподарських технологій. Трактор визначається як потужний механічний транспортний засіб з великими, важкими педалями, який використовується для буксування сільськогосподарської техніки та інших транспортних засобів [4]. Як правило, цей термін використовується для опису сільськогосподарських транспортних засобів, які забезпечують потужність і тягу для механізації сільськогосподарських завдань. Землеробство було великим технологічним зрушенням, яке відбулося у 1980-х роках. Результат – трактор, яким фермери керують за допомогою пристроїв GPS і бортового комп'ютера. Землеробство зосереджується на максимізації віддачі з мінімальним використанням ресурсів. За допомогою пристроїв GPS і комп'ютерів фермери можуть використовувати свої трактори ефективніше.

Інженери працювали над створенням автоматичних тракторів. Ці трактори були безпілотні, але водії повинні були запускати їх на кінці кожного ряду. У 2011 і 2012 роках була, ще одна ідея несанкціонованого трактора. Перший безпілотний трактор був розроблений для того, щоб слідувати за головним трактором. Це дозволяє одному водію виконувати ще дві роботи, використовуючи так звану технологію «слідуй за мною». Трактор без водія буде слідувати трактору між полями, як би виконував свою роботу. Зараз же технологія безпілотних тракторів, стала більш автономною або незалежною.

Є кілька основних виробників, які активно прагнули виготовити придатний для продажу безпілотний трактор і досягли успіхів у створенні значних прототипів і масовому виробництві своєї продукції. Зараз провідними виробниками є Deere, Autonomous Tractor Corporation, Fendt і Case IH [5].

John Deere.

Компанія Deere справила значний вплив на розвиток автоматизованих сільськогосподарських технологій. На початку 2008 року компанія Deere and Company випустила свій продукт IТЕС Pro, автоматизовану систему, засновану на технології глобального позиціонування, яка автоматизує функції автомобіля, включаючи кінцеві повороти [6]. Deere наразі розробляє прототип. Замість використання лазерів, трактор використовує дві 6-дюймові купольні антени, які приймають сигнали від супутника глобального позиціонування. На основі цих супутникових сигналів трактор слідує за попередньо запрограмованим маршрутом через електронну карту. Ці антени також призначені для людей-операторів для керування трактором, якщо супутникові сигнали не можуть проникнути в будівлі або густу рослинність.

Автономна тракторна корпорація.

У січні 2012 року Террі Андерсон заснував компанію під назвою Autonomous Tractor Corporation (ATC), розташовану в Північній Дакоті. Безпілотний трактор SPIRIT є продуктом ATC. Андерсон вважав, що трактори стають більшими та дорожчими, але не покращують якість. Таким чином він вийшов із пенсії, щоб створити SPIRIT. Трактори, у створенні яких допомагав Андерсон, спочатку створювалися для основного трактора (з водієм), але тепер вони рухаються до незалежного функціонування. Андерсон випробував напівмасштабні моделі свого автоматизованого трактора у своєму другому будинку в Техасі. Він представив свою модель на Big Iron Farm Show у вересні 2012 року [5]. Андерсон заявив, що його мета — побудувати 25 одиниць свого автоматизованого трактора в 2013 році та продати їх за зниженою ціною для тестування фермерів [7].



Рисунок 1.2 – Автономний трактор SPTRIT компанії Autonomous Tractor Corporation

Fendt.

Компанія Fendt, що входить до складу корпорації AGCO, також працювала над безпілотним трактором. У 2011 році в Ганновері на виставці Agritechnica компанія Fendt представила свою модель безпілотного трактора під назвою GuideConnect. GuideConnect — це трактор, запрограмований на відображення рухів іншого трактора [8]. Трактор, керований оператором, маневрує полем або посівами, за ним слідує трактор без водія. Ведучий трактор, керований водієм, може уникати перешкод, а трактор без водія слідує за ним. Замість того, щоб зосереджуватися на абсолютно незалежній частині технології, Fendt створив GuideConnect для спільної роботи з машинами, керованими оператором. GuideConnect підключений за допомогою супутникової навігації та радіо до трактора, керованого оператором [8].

Case IH.

Case IH — це компанія, створена шляхом злиття JI Case Company та International Harvester. Тепер компанія працює під CNH Global, але трактори все ще мають марку Case IH. Безпілотні трактори, вироблені Case IH, називаються «автономними автомобілями під наглядом» [9]. За трактором, яким керує людина, слідує автономна техніка, яка копіює керування та швидкість колишнього трактора. Є початковий водій, але автономна технологія є в другому тракторі. Дві машини працюють за технологією V2V, яка є зв'язком

між автомобілями. У 2016 році Case представила свою останню автономну концепцію, безкабельний просапний трактор моделі Magnum, який може працювати автономно [10].

1.3 Проблеми безпеки на рівні сприйняття

Рівень сприйняття в основному стосується фізичних пристроїв, таких як датчики та виконавчі механізми. Фізичні пристрої можуть не працювати через випадкові або навмисні дії людини, віруси, зловмисне програмне забезпечення або кіберзлочинців [11]. Існує багато типів датчиків і технологій, які використовуються в додатках для розумного землеробства, і це різноманіття створює кілька загроз безпеці, а саме:

Випадкові збої датчика.

Це ненавмисна фізична модифікація пристрою сприйняття, яка відводить його від звичайної роботи. Розумні системи, розроблені для малих або великих ферм, можуть мати д, встановлені на відкритому повітрі. У багатьох випадках ці пристрої не мають коробок, захищених від несанкціонованого доступу, оскільки це буде дорогим. Відсутність коробок, захищених від несанкціонованого доступу, наражає пристрій на взаємодію із зовнішніми факторами, такими як люди, тварини чи сільськогосподарське обладнання. Працівник ферми або дика тварина можуть випадково зіткнутися з датчиком, перемістивши або забравши пристрій з початкового місця, порушивши цілісність системи. Сільськогосподарське обладнання, наприклад трактор, може вдаритися по пристрою, спричинивши тимчасове або постійне фізичне пошкодження, що призведе до пошкодження даних, їх недоступності або пошкодження пристрою. Однак це актуальне питання, оскільки воно може сильно вплинути на надійність рішення. У більшості випадків неможливо уникнути цієї загрози, хоча її необхідно ідентифікувати, щоб уникнути її наслідків.

Викрадення автономної системи.

Деякі сільськогосподарські види діяльності використовують автономні системи, такі як дрони та роботи. Дрони можуть розпорошувати пестициди та добрива, а роботи можуть виконувати прополку та виявляти хвороби. Якщо зловмисник захоплює автономну систему, він може дистанційно контролювати та керувати без авторизації. Цей тип атаки може мати кілька наслідків: від нездатності системи виконати завдання до її повного пошкодження або пошкодження врожаю.

Порушення роботи автономної системи.

Це навмисна модифікація ресурсів автономної системи. Автономні трактори, роботи та БПЛА (безпілотні літальні апарати) — це технології, які дедалі частіше застосовуються в точному землеробстві, особливо у великих фермах. Це обладнання має низку функцій, необхідних для їх роботи, наприклад датчики, камери, GPS, карти та системи дистанційного керування. Якщо опонент модифікує один або кілька компонентів, автономна система може працювати неналежним чином або постраждати/спричинити нещасні випадки. Несправності можуть призвести до серйозних втрат, спричинених неправильним доглядом за ґрунтом або посівами, пошкодженням посівів, будівель, обладнання та механізмів, включаючи сам автономний трактор.

Оптична деформація.

Деформація зображень з камер, встановлених у роботах або автономних пристроях. Деякі автономні системи мають камери для захоплення зображень. Камери зазвичай мають важливу функцію в системі, а зроблені зображення повинні мати мінімальну якість. Камери зазвичай дуже важливі для системи. Зображення мають відповідати мінімальним стандартам якості, щоб забезпечити безперебійну роботу всього процесу. Наведені нижче стандартні зображення можуть ввести в оману систему збору врожаю, щоб зібрати зіпсовані або незрілі фрукти або навіть пошкодити плодові дерева.

Нерегулярне вимірювання.

Воно складається з ненормальних вимірювань або показань, спричинених пошкодженням даних, виснаженням енергії, електромагнітними перешкодами, перехопленням змінного зв'язку, поганою погодою, поломками або помилковими уведеннями. У деяких регіонах, зазвичай на великих фермах, високовольтні мережі проходять над сільськогосподарськими площами та можуть створювати електромагнітне поле, спричиняючи спотворення або пошкодження даних. Вичерпання заряду пристроїв із живленням від батареї, змінне підключення або несправність деяких компонентів пристрою можуть спричинити нерегулярні зчитування, погіршуючи доступність або цілісність даних, що призводить до неточних даних. Неточні дані можуть бути небезпечними для прийняття рішень, призводячи до неправильного аналізу даних і знижуючи точність системи.

Ослаблення датчика.

Нормальна дегенерація датчиків через такі процеси, як корозія, окислення, накопичення пилу та насичення. Деякі датчики, які використовуються на розумних фермах, можуть поступово виходити з ладу під впливом умов навколишнього середовища та фізико-хімічних або кліматичних явищ. Наприклад, датчики швидкості вітру, встановлені в запиленому середовищі, можуть страждати від накопичення пилу, що поступово перешкоджає руху стрижнів. Датчики вологості може насититися під впливом високого рівня вологості. Датчики, виготовлені з міді, можуть окислюватися. Таким чином, датчики реєструють неправильні або нерегулярні вимірювання. Природна деградація датчиків вимагає їх періодичної заміни. Однак деякі події можуть передбачати погіршення роботи пристрою, що призведе до збоїв раніше, ніж очікувалося. Уникнути природної деградації сенсорів все одно неможливо. Однак необхідно виявити ослаблення датчика, щоб запобігти використанню системою неточних даних.

Традиційні мережеві атаки та атаки Інтернету речей можуть вплинути на безпеку додатків для розумного землеробства, наприклад:

Захоплення вузла.

Фізичне захоплення вузла або пристрою. Цю операцію можна виконати шляхом повної заміни пристрою або модифікації компонентів апаратного чи програмного забезпечення [12 , 13]. Захоплення вузла може не спричинити значного впливу, якщо воно виконується на одному вузлі, і може не викликати інші атаки. Однак після захоплення пристрою опонент може змінити апаратне чи програмне забезпечення, отримати доступ до системи або ввести неправдиві дані. Перехоплення вузла порушує цілісність системи та потенційно може перешкодити прийняттю рішень. Це також може завдати шкоди вирощуванню та спричинити фінансові збитки. Наприклад, ворожий виконавчий механізм в системі поливу ніколи не міг почати зрошення або затопити врожай. Незадоволений співробітник або комерційний конкурент, який має фізичний або логічний доступ до системи, може здійснити цю атаку з кількох причин.

Фальшивий вузол.

Зловмисник додає фальшиві або шкідливі вузли в систему, щоб порушити їхню роботу [14]. Захоплення вузла може спровокувати цю атаку та призвести до реплікації вузла. Цей тип атак зазвичай спрямований як на маніпулювання даними, так і на відключення служб і пристроїв. У системі з недостатнім або шахрайським контролем ідентифікації зловмисні датчики можуть надсилати неправильні дані, заважаючи прийняттю рішень, або вводити кілька пакетів у мережу, викликаючи відмову в обслуговуванні. Подібним чином приводи можуть діяти зловмисно, ворожі шлюзи можуть надсилати хибні команди законним приводам або діяти як чорні діри, щоб завдати шкоди.

Позбавлення сну.

Ця атака спрямована на розрядження батареї пристрою, доки вона не розрядиться. Датчики Smart Farming мають обмежене споживання електроенергії та зазвичай використовують батареї. Щоб зменшити енергоспоживання та продовжити термін служби батареї, вузли повинні

переходити в сплячий режим, коли вони не працюють [14]. Атака на депривацію сну надсилає набори вочевидь законних запитів, щоб пристрої залишалися активними якомога довше. Тому батарея пристрою розрядиться, і вузол вимкнеться. Після вимкнення датчиків дані більше не надсилаються, що погіршує процес прийняття рішень і ефективність системи.

Оскільки системи є відкритими полями, вони чутливі до умов навколишнього середовища, кліматичних коливань і дій людини. Слабкі заходи безпеки можуть вплинути на надійність і довіру системи, піддаючи її випадковому використанню пошкоджених даних, дистанційному керуванню та фізичному пошкодженню. Датчики не мають обчислювальних ресурсів, які б дозволили застосувати традиційні методи безпеки, такі як криптографія, що робить захист ще більш складним. Тому додавання інноваційних рішень безпеки до цього рівня настільки ж складне, наскільки це необхідно.

Високий рівень надійності та безпеки є необхідним і може бути досягнутий за допомогою нових розробок у автоматизованому сприйнятті, діагностиці та прийнятті рішень і відмово стійкій роботі. Для досягнення цих цілей необхідно додати додаткові функції, щоб машина працювала безпечно та ефективним способом при безпілотній експлуатації. Система машини та умови експлуатації були оцінені консультантом з техніки безпеки, щоб перевірити відповідність існуючим вимогам законодавства. На основі юридичних консультацій з безпеки та аналізу режимів і наслідків відмови було завершено перепроєктування системи машини. Машина працюватиме без екіпажу, але не без нагляду. Оператор готує, перевіряє та запускає машину в робочій зоні. Під час роботи машини оператор знаходиться поруч і повинен виконувати інші робочі завдання. Додаткова стереокамера та лазерний сканер наддадуть більше інформації про оточення машини, щоб уникнути зіткнення з перешкодами. Вони також покращують машинну навігацію та сприятимуть зменшенню залежності від інформації GNSS. Програмне забезпечення для моніторингу сигналів було розроблено для досягнення вищих рівнів надійного та стійкого до

збоїв керування. Додаткова схема безпеки, включаючи перемикачі бампера, дозволяє машині зупинитися, коли інші датчики зіткнення виходять з ладу.

Апаратним результатом дослідницького проекту є резервна схема безпеки. Схема відповідає стандарту DS/EN ISO 13849-1 щодо безпеки машин. Схема безпеки припиняє впорскування палива в двигун, якщо натиснуто одну з аварійних кнопок або активовано перемикачі RFID переднього бампера. Крім того, бездротовий аварійний вимикач, керований оператором машини, може зупинити машину в радіусі 100 м під час роботи. Коли трактор не працює в автономному режимі, ним можна керувати за допомогою дротового пульта дистанційного керування. Оператор використовує його для переміщення машини з метою транспортування.

1.4 Основні конструктивні вузли трактора

Трактор складається із взаємозв'язаних механізмів, які за призначенням поділяються на такі групи (або агрегати): двигун, силова передача, ходова частина, органи керування, робоче, допоміжне і електричне обладнання.

Двигун – це енергетичний пристрій, енергія якого використовується для привода трактора та виконання корисної роботи. На сучасних тракторах енергетичним пристроєм є поршневий двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). ДВЗ перетворює теплову енергію палива, що згоряє в його циліндрах, у механічну роботу - обертальний рух колінчастого валу.

Силовa передача (трансмiсія) призначена для передачі обертального руху та крутного моменту від двигуна до ходової частини та зміни їх за величиною та напрямом. Складається силова передача з муфти зчеплення, проміжного з'єднання, або карданної передачі, коробки передач, головної передачі, диференціала (колісні трактори) або планетарного механізму чи муфти керування (гусеничні трактори), а також кінцевої передачі.

Ходова частина підтримує та перетворює обертальний рух коліс або зірочок у поступальний рух трактора та пом'якшує удари від нерівностей поля чи дороги.

У колісних тракторів ходова частина складається з рами, задніх ведучих й передніх напрямних коліс та елементів, що з'єднують колеса з остовом. У гусеничних тракторів ходова частина складається з рами, опорних котків і підтримуючих роликів, ведучих зірочок, натяжних коліс й гусениць.

Органи керування призначені для керування трактором, встановленими на ньому агрегатами та робочим обладнанням.

До органів керування належать: рульове колесо або важелі муфт поворотів чи планетарного механізму, педалі й важелі гальм, важелі переключення передач й діапазонів, педалі муфт зчеплення, важелі розподільників гідравлічних систем та інші.

Робоче обладнання трактора призначене для використання потужності його двигуна, а також приведення в дію механізмів навісних, напівнавісних, причіпних і стаціонарних машин, для приєднання машин, причепів та напівпричепів, для накачування шин.

До робочого обладнання належать: гідравлічна система з механізмом навішування, виносними циліндрами і донавантажувачем ведучих коліс, причіпний пристрій, гідрофікований гак, вали відбору потужності (ВВП), шків та компресор.

Допоміжне обладнання забезпечує трактористу комфортні умови роботи. До нього відноситься кабіна з пристроями опалення і вентиляції, м'яким сидінням, приладами освітлення та сигналізації, змивачами скла, склоочисника, контрольними приладами, кондиціонером то що [15].

Електричне обладнання призначене для пуску двигуна, освітлення і сигналізації.

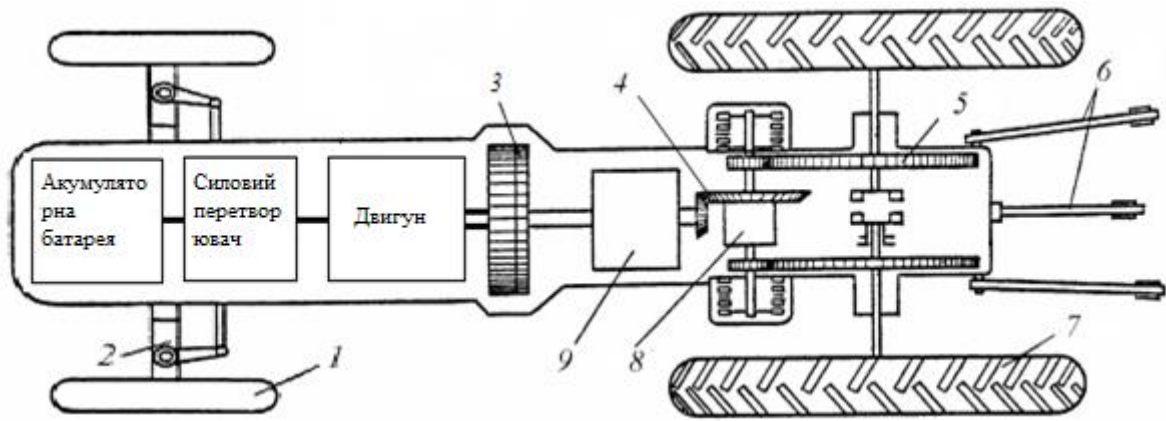


Рисунок 1.3 – Основні вузли трактора

На рисунку зображено:

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

1.5 Інтеграція безпілотної/інтелектуальної системи керування

Існує багато досліджень щодо автономного водіння [12,13], але розробок інтелектуальних електромобілів для безпілотного водіння в сільському господарстві дуже мало. Система безпілотного водіння використовує камери, оптичні радари, ультразвукові датчики та інше обладнання на транспортному засобі, щоб забезпечити автономне водіння по полю для досягнення фіксованих точок або слідування запланованими маршрутами для сільськогосподарських та інших завдань. Систему безпілотного водіння можна розділити на три частини: збір інформації, електронний блок керування (ECU) і блок виконання. Частина збору інформації відноситься до сенсорних компонентів. Різні датчики збирають інформацію для різних систем. Інформація, зібрана датчиками, буде

передана в ECU для аналізу та обробки, а команди подаються на основі результатів, обчислених ECU для виконавчого блоку.

У системі позиціонування бажано використовувати два GPS-трекера. Обидва мають бути вирівняні паралельно, так щоб один був встановлений у центрі ваги транспортного засобу, а інший – у задній частині автомобіля. Два GPS-трекери збирають різницю між поточним кутом курсу та кутом напрямку до цільової точки.

ПД-контролер отримає помилку кута від GPS-трекера, визначає, чи слід транспортному засобу їхати, обертатися чи зупинитися, і відстежує цільову точку за допомогою GPS-трекера, розташованого в центрі ваги, для досягнення автономного водіння. Для уникнення перешкод і допомоги в навігації потрібно застосовувати технологію оптичного отримання та обробки інформації. Роторний плуг, який несе трактор, небезпечний. Дана технологія скануватиме на 360 градусів навколо трактора, щоб зупинити трактор, коли об'єкт потрапляє в небезпечну зону, яку було перевизначено, і запобігти потраплянню чогось у роторний плуг. Щоб допомогти автономному транспортному засобу торкатися землі під час надмірних підйомів і спусків, на додаток до існуючого GPS-трекера необхідно додано три оптичні радары. Два з трьох оптичних радарів розміщені на передній лівій і правій сторонах транспортного засобу, щоб виявляти обидві сторони транспортного засобу та калібрувати поперечну точність автомобіля. Інший оптичний радар має бути встановлений у передній частині автомобіля для виявлення перешкод. Коли на певній відстані перед автомобілем буде виявлено перешкоду, рух транспортного засобу буде зупинено. Транспортний засіб також обладнаний блоком обробки зображень, щоб утримувати автомобіль стабільним. Після того, як камера зробить зображення, обробляються потрібні цілі в області інтересу. Потім зображення перетворюється на відтінки сірого та перетворюється на бінарій. Потім система відстежує краї об'єктів і виконує обробку розширення, та переносити краї, щоб обчислити осьову лінію дороги як траєкторію руху

1.6 Методи керування електроприводом АД

Різні методи регулювання швидкості асинхронного двигуна, що застосовуються в сучасну епоху, поділяються на три наступні класифікації:

Скалярне керування (v/f Control).

Найбільш часто використовуваною схемою регулювання швидкості асинхронного двигуна є зміна частоти живлення. Ця схема забезпечує результати з широким діапазоном швидкостей і пусковими характеристиками. У цьому типі управління для генерації змінних частот використовується інвертор з ШІМ-регулюванням. Головний двигун живиться цими частотами. Щоб отримати постійний крутний момент для плавної роботи, співвідношення v/f залишається постійним [16]. В результаті потік двигуна залишається постійним, а крутний момент не залежить від подаваних частот. Оскільки потік підтримується постійним, крутний момент залежить лише від швидкості ковзання. Цей тип керування також відомий як скалярне керування. V/f метод відкритого циклу широко використовується в промисловості через його низьку вартість, легкість реалізації та стійкість до сигналів помилок зворотного зв'язку.

Метод регулювання V/F із замкнутим циклом забезпечує більш точний результат для керування швидкістю та крутним моментом. Щоб отримати бажаний крутний момент, контур керування ковзанням використовується в методі замкнутого циклу, оскільки ковзання пропорційне крутному моменту асинхронного двигуна [16-17]. Різниця зменшується до нуля ПІ-контролером, щоб двигун досяг бажаної швидкості. Основним недоліком цієї системи є неконтрольований магнітний потік [19].

Класичне векторне керування АД (Field Oriented Control).

Керування, орієнтоване на потік, забезпечує хороший рівень динамічних характеристик, а моторний привід із замкнутим контуром керування забезпечує тривалу стабільність системи. Він також визначається як «керування потоком» або «непряме керування крутним моментом». Цей тип системи керування буває трьох видів, таких як керування, орієнтоване на магнітний потік, керування,

орієнтоване на потоки статора, керування потоком ротора. Асинхронні двигуни широко використовуються в різних складних комерційних і технологічних програмах, які вимагають високої продуктивності [18]. Щоб досягти такої високої продуктивності, швидкість двигуна повинна підтримувати певну еталонну траєкторію незалежно від будь-яких змін параметрів, незбалансованого навантаження та невизначеності моделі.

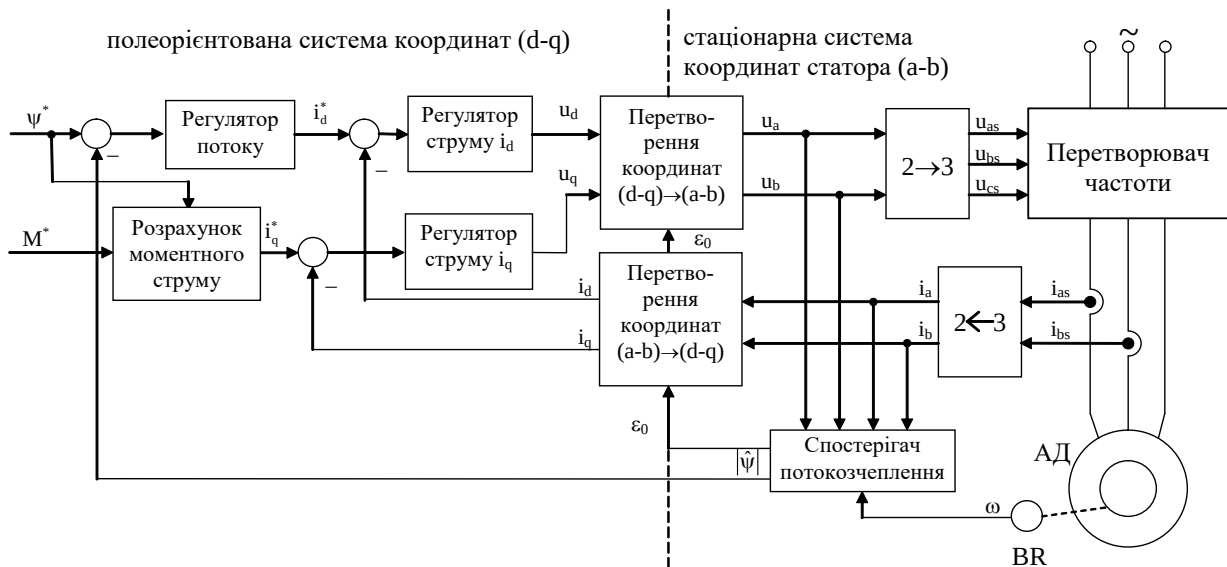


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи стандартного прямого векторного керування АД

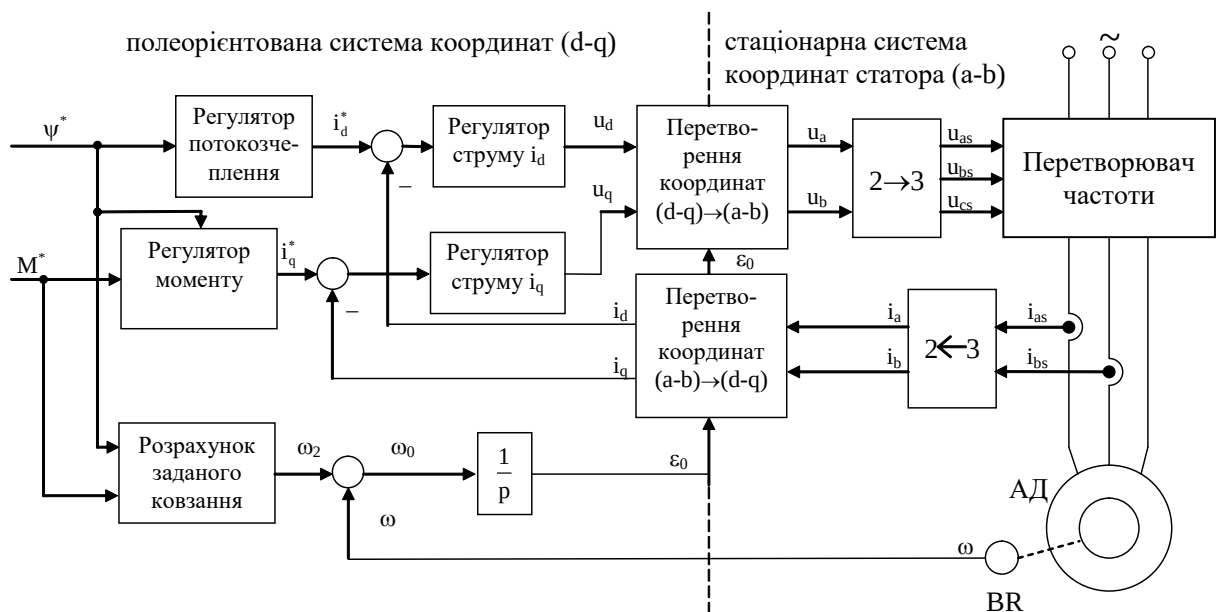


Рисунок 1.5 – Структурна схема системи стандартного непрямого векторного керування АД

Прямий векторний метод керування пов'язаний з одиничним вектором, що виникає від потоку статора. Ці векторні сигнали обчислюються безпосередньо або на основі сигналів напруги та струму статора. Компоненти статорного потоку розраховуються з величин статора. Для отримання інформації про кут поля ротора в цій схемі не потрібна швидкість ротора [18-20]. Процес вимірювання потоку також збільшує вартість додаткового обладнання, і вимірювання є неточним. Тому техніка векторного керування не дуже хороша техніка для регулювання швидкості. Непрямий векторний метод контролю є найпоширенішим і більш надійним, ніж прямий.

Пряме керування моментом DTC (Direct Torque Control).

Метод DTC виходить з основного факту помилки між фактичними контрольними значеннями та оціненими значеннями крутного моменту та потоку. Стани інвертора можна безпосередньо контролювати в межах попередньо встановленого діапазону, щоб зменшити похибки крутного моменту та потоку [17-19]. Цей метод керування є новою технікою для покращення швидкості асинхронного двигуна за допомогою регульованого перетворювача частоти. Необхідною умовою цього методу контролю є різні параметри, такі як взаємна індуктивність, опір статора та ін.

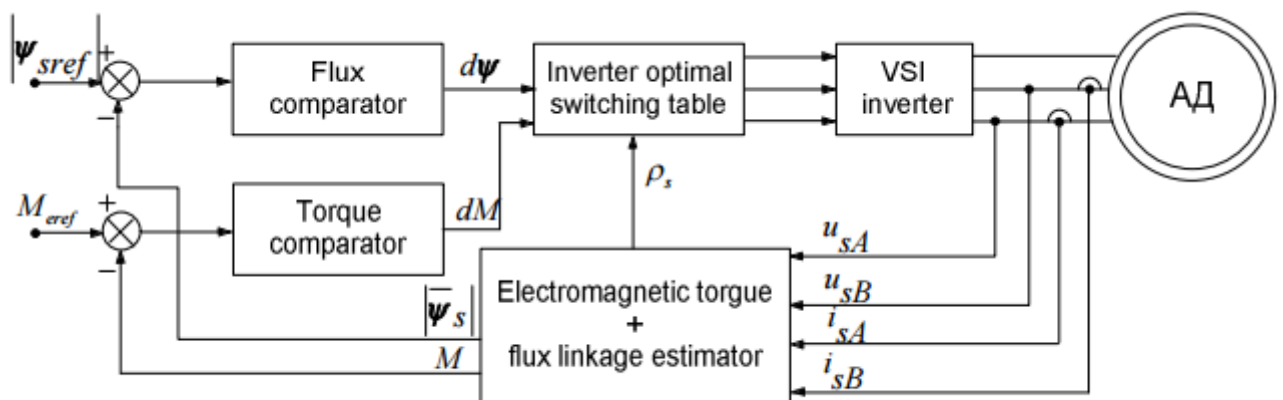


Рисунок 1.6 – Схема привода з DTC при орієнтації по вектору потоку статора

Орієнтація поля отримується без швидкості, якщо зворотний зв'язок ротора або положення використовує розроблену гіпотезу двигуна для

обчислення крутного моменту двигуна без використання модуляції. Крутний момент двигуна та потік намагнічування є основними керуючими змінними в цій техніці, тому її називають методом прямого керування крутним моментом. Швидкий час відгуку, викорінення пристроїв зворотного зв'язку, зменшення механічної помилки є основними перевагами методу DTC [20]. Також є багато недоліків, таких як вищий крутний момент, пульсаційний потік, гістерезис компаратора. На рисунку 1.6 показана основна конструкція методу прямого керування моментом. У методі DTC статорний потік регулюється таким чином, щоб отримати необхідний крутний момент. Це досягається шляхом вибору комбінації інверсного перемикача, який керує вектором статора. Відповідна модифікація полягає в тому, що правильна напруга подається безпосередньо на обмотки.

1.7 Формування технічних вимог до системи САК АД безпілотного трактора

Автономний транспорт, який працює в напівприродних середовищах, таких як поля, сади або плантації, повинен справлятися з високим ступенем структурної різноманітності. Крім того, внутрішні несправності машини можуть призвести до небажаної поведінки машини та навіть призвести до небезпечного стану продуктивності машини. Тому машина повинна «усвідомлювати» своє близьке оточення, щоб ефективно виконувати операції, а також уникати зіткнень з іншими об'єктами, які можуть пошкодити машину та інші об'єкти (інфраструктуру, рослини, людей і тварин). Для досягнення цих цілей продуктивності потрібні автоматизовані можливості сприйняття, і робот повинен швидко й належним чином реагувати, коли виявляються несподівані об'єкти або коли виникають несправності різної серйозності. Основним напрямком дослідження робототехніки на відкритому повітрі є розробка архітектури, придатної для безпілотних [21].

У зв'язку з різними умовами експлуатації та розподілом навантаження на трактор існують також різні вимоги до продуктивності трактора. Систему

живлення електротрактора необхідно проектувати з урахуванням розподілу навантаження в різних режимах експлуатації.

Трактор повинен відповідати вимогам жорсткості, безпеки, міцності, стійкості до втоми. Крім того, трактори потребують широкого діапазону зміни сил, особливо при роботі під великими навантаженнями, що вимагає більшого вихідного крутного моменту. Таким чином, редуктор повинен використовуватися для уповільнення та збільшення крутного моменту, щоб реагувати на різні умови.

Виходячи з проаналізованого матеріалу сформуємо технічні вимоги, що до тягового електроприводу безпілотного трактора:

1. Стабілізація швидкості руху в маневрених режимах, для забезпечення надійності;
2. Можливість точно реалізувати заданий процес;
3. Здатність двигуна витримувати значні навантаження;
4. Високий ККД в широкому діапазоні моменту та швидкості;
5. Енергетична ефективність;
6. Можливість керування в II зоні;
7. Швидке відпрацювання моменту;
8. Високе значення моменту при низьких швидкостях при русі в гору та старті;
9. Можливість рекуперації енергії.

Висновки до розділу 1:

1. Обґрунтовано важливість та актуальність використання ІОТ в аграрній промисловості.

2. Надано історію виникнення безпілотних тракторів.

3. Описано основну конструкцію та проблематику транспорту.

4. Оглянуто методи керування електроприводом АД.

5. Сформовано список вимог до тягового електроприводу.

Отже для виконання поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичний опис об'єкта керування.

2. Розрахувати потужності двигуна, акумуляторної батареї та обрати силове обладнання.

3. Побудувати функціональну схему.

4. Виконати синтез регуляторів системи векторного керування АД безпілотного трактора та спроектувати оптимізатор втрат потужності в АД.

5. За отриманими рівняннями побудувати модель системи в середовищі MatLab/Simulink та дослідити статичні і динамічні режими САК АД безпілотного трактора.

6. Розробити стартап-проект.

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

Основна ідея векторного управління полягає в управлінні не тільки амплітудою і частотою напруги живлення, але і фазою.

Векторне управління дозволяє самостійно і практично без інерційно регулювати швидкість і крутний момент на валу двигуна. Векторне керування має вищу продуктивність, ніж скалярне керування. Векторне керування усуває майже всі недоліки скалярного керування [22].

Переваги векторного керування:

- Висока точність регулювання швидкості;
- Двигун запускається і плавно обертається у всьому діапазоні частот;
- Швидка реакція на зміну навантаження: швидкість майже не змінюється при зміні навантаження;
- Збільшити діапазон регулювання і точність регулювання;
- Зменшуються втрати на нагрівання та намагнічування, а ККД двигуна підвищується.

Недоліки векторного контролю включають:

- Потрібно встановити параметри мотора;
- Обчислювальна складність висока.

2.1 Математичний опис об'єкта керування

Модель асинхронного двигуна змінного струму задана просторово-векторною формою рівнянь напруги. Рівняння напруги моделі двигуна в загальній системі відліку можна виразити за допомогою перетворень величин двигуна з однієї системи відліку до введеної загальної системи відліку. Модель асинхронного двигуна змінного струму часто використовується в алгоритмах векторного керування.

Метою векторного керування є реалізація схем керування, які забезпечують високу динамічну продуктивність і подібні до тих, що використовуються для керування машинами постійного струму. Щоб досягти

цього, системи відліку можуть бути вирівняні з просторовим вектором потокозчеплення статора, просторовим вектором потокозчеплення ротора або просторовим вектором намагнічування. Найпопулярнішою системою відліку є система відліку, приєднана до просторового вектору зв'язку потоку ротора з прямою віссю (d) і квадратурною віссю (q). Після перетворення в координати d-q модель двигуна виглядає так [23]:

$$\frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_0 \Psi_{sq} + R_s I_{sd} = U_{sd}; \quad (2.1)$$

$$\frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_0 \Psi_{sd} + R_s I_{sq} = U_{sq}; \quad (2.2)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \Psi_{rq} + R_r I_{rd} = 0; \quad (2.3)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \Psi_{rd} + R_r I_{rq} = 0; \quad (2.4)$$

$$\Psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \Psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad (2.5)$$

$$\Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad \Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \quad (2.6)$$

$$\Psi_{md} = L_m I_{md}; \quad \Psi_{mq} = L_m I_{mq}; \quad (2.7)$$

$$I_{md} = I_{sd} + I_{rd}; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq}; \quad (2.8)$$

$$M_E = \frac{3z_p}{2} K_r (\Psi_{rd} I_{sq} - \Psi_{rq} I_{sd}); \quad (2.9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_e - M_L) \frac{1}{J}, \quad (2.10)$$

де d,q – проекції на координатні осі d і q відповідно;

$\bar{U}_s = [U_{sq}, U_{sd}]^T$ – узагальнені вектори напруги статора;

$\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$ – струм статора;

$\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$ – струм ротора;

$\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$ – струм намагнічування;

$\bar{\Psi}_s = [\Psi_{sd}, \Psi_{sq}]^T$ – потокозчеплення статора;

$\bar{\Psi}_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T$ – потокозчеплення ротора;

$\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$ – основне потокозчеплення;

M_e – електромагнітний момент двигуна;

z_p – кількість пар полюсів;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

P_2 – вихідна потужність двигуна;

R_s, R_r – активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора;

L_m – індуктивність намагнічування між статором та ротором;

$L_s = L_m + L_{s\sigma}, L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз між статором та ротором;

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно;

$$K_r = L_m / L_r.$$

У випадку асинхронних машин керування зазвичай здійснюється в системі відліку (d-q), приєднаній до просторового вектору потоку ротора. Тому для реалізації векторного керування потрібна інформація про модуль і просторовий кут (положення) просторового вектору потоку ротора. Струми статора асинхронної машини розділені на компоненти, що створюють потік і крутний момент, за допомогою перетворення в систему координат d-q, пряма вісь якої (d) вирівняна з просторовим вектором потоку ротора. Це означає, що компонент осі q просторового вектору потоку ротора завжди дорівнює нулю:

$$\Psi_{rq} = 0; \quad \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0; \quad \Psi_{rd} = \Psi_r = |\bar{\Psi}_r|, \quad (2.11)$$

Перепишемо математичну модель у вигляді (2.12) – (2.15)

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = -\frac{\Psi_r}{T_r} + \frac{I_d L_m}{T_r}; \quad (2.12)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{I_d R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sd}}{L'_s} + \frac{(\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r / T_r)}{L'_s}; \quad (2.13)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\frac{I_q R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sq}}{L'_s} - \frac{(\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega)}{L'_s}; \quad (2.14)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_H) \frac{1}{J} \quad (2.15)$$

Де $I_q \equiv I_{sq}$, $I_d \equiv I_{sd}$, $\Psi_r = |\bar{\Psi}_r|$ – потокові і моментні компоненти вектору

струму та компоненти вектору напруги статора.

$T_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора;

$L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$.

Електромагнітний момент АД і швидкість обертання $\bar{\Psi}_r$ обчислюються за формулами (2.16):

$$\omega_0 = z_p \omega + \frac{K_r R_r I_q}{\Psi_r}; \quad M_e = \frac{3}{2} z_p K_r I_q \Psi_r, \quad (2.16)$$

Рівняння (2.11 - 2.16) описують традиційне векторне керування асинхронним двигуном, де в широкому діапазоні змінюється швидкість ротора, а потокозчеплення ротора стабілізується.

2.2 Модель втрат потужності

Ефективність машин залежить від втрат в електричних машинах.

Втрати в двигунах змінного струму в основному класифікуються на два типи:

Постійні втрати: втрати, які постійно залишаються в машині, називаються постійними втратами. Ці втрати далі поділяються на:

- Втрати в осерді: втрати, які виникли через постійну щільність потоку в осерді. Ці втрати є доповненням до втрат на гістерезис і вихрові струми.
- Механічні втрати: втрати, які виникли через обертові частини. Ці втрати змінюються залежно від швидкості двигуна.

Змінні втрати: ці втрати також називаються втратами міді. Це пов'язано з проходженням струму через обмотки статора і ротора. Випробування блокованого ротора проводиться, щоб дізнатися втрати міді двигуна. Ці втрати класифікуються як втрати міді статора та втрати міді ротора. Такі втрати міді будуть змінюватися зі зміною струму.

Найбільшими з них є втрати у міді статора та ротора, магнітні втрати у залізі статора. Опишемо їх рівняннями. Щоб оцінити втрати потужності, необхідно розробити модель втрат. Рівняння втрат потужності включає як постійні втрати потужності в усталеному режимі роботи машини, так і перехідні втрати потужності і втрати в залізі з урахуванням основного ефекту насичення індуктивності в безперервному часі [23].

Враховуючи втрати міді двигуна від магнітного поля ротора в системі координат АД, модуль вектору струму ротора дорівнюватиме $I_r = K_r I_q$, що можна записати як:

$$P_{cu} = 1.5[(I_d^2 + I_q^2)R_s + I_q^2 K_r^2 R_r]. \quad (2.17)$$

Втрати у сталі статора АД обчислюються за формулою:

$$P_{fe,s} = 1.5\psi_m^2 (K_h |\omega_0| + K_e \omega_0^2), \quad (2.18)$$

де K_h – коефіцієнт втрат від гістерезису;

ψ_m - модуль вектору потокозчеплення у повітряному зазорі АД;

K_e - коефіцієнт втрат від вихрових струмів.

Магнітні втрати в роторі в основному подібні до магнітних втрат у статорі, але це функція частоти струму в роторі. Дані втрати, згідно обчислюються за формулою:

$$P_{fe,r} = 1.5\psi_m^2 (K_h |\omega_s| + K_e \omega_s^2) \quad (2.19)$$

Додаткові втрати потужності в АД складаються з додаткових втрат у статорі та роторі АМ. Сумарні додаткові втрати потужності в АД можна приблизно вважати пропорційним квадрату струму та квадрату швидкості обертання ротора двигуна:

$$P_a = 1.5 K_a \omega^2 K_r^2 I_q^2, \quad (2.20)$$

де K_a – коефіцієнт втрат в АМ.

Механічні втрати обчислюються за формулою:

$$P_\omega = K_\omega \omega^2, \quad (2.21)$$

де K_ω – коефіцієнт механічних втрат.

В системі координат за Ψ_r , $\psi_m^2 = \psi_r^2 + I_q^2 K_r^2 L_{rs}^2$. Так як, L_{rs} має мале значення, а $K_r < 1$, то можна вважати $\Psi_m \cong \Psi_r$. Отримуємо формулу для розрахунку магнітних втрат:

$$P_{fe} = 1.5 \psi_r^2 (K_h (\omega_0 + \omega_s) + K_e (\omega_0^2 + \omega_s^2)). \quad (2.22)$$

Сумарні втрати будуть дорівнювати:

$$P_M = P_{cu} + P_{fe} + P_a + P_\omega. \quad (2.23)$$

З рівнянь (3.11) – (3.16) отримаємо, що $M_E = \text{const}$, $\omega = \text{const}$

$$I_d = \Psi_r / L_m, \quad I_q = M_E / (K_M \Psi_r), \quad \omega_s = K_r R_r M_E / (K_M \Psi_r^2). \quad (2.24)$$

Після підстановки всіх рівнянь, отримаємо:

$$P_M = \frac{3}{2} \left((R_s + L_m^2 (K_h (\omega_0 + \omega_s) + K_e (\omega_0^2 + \omega_s^2))) I_d^2 + (R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)) I_q^2 + \frac{2}{3} K_\omega \omega^2 \right) \quad (2.25)$$

Таким чином, отримано модель втрат потужності (2.25) в АД. В рамках цієї роботи застосуємо модель (2.25) для вирішення задачі оптимізації в статичному режимі, хоча зрозуміло, що вона також може бути використана для оптимізації споживання енергії в динамічному режимі роботи.

Сумарні втрати потужності у двигуні можуть бути записані у вигляді

$$P = P_d + P_q + P_{dq} \quad (2.26)$$

, де складники P_d , P_q є пропорційними відповідно I_d^2 та I_q^2 і за умови рівності яких сумарні втрати будуть мінімальними.

Підставимо рівняння (2.24) у (2.23) з урахуванням (2.17) та (2.18) матимемо рівняння потужності втрат у функції модуля потоку ротора. Взявши похідну та прирівнявши її до нуля $dP/d\Psi_r = 0$, зробивши зворотні до виразів (2.24) підстановки, отримаємо складники потужності втрат в (2.26) у вигляді

$$P_d = 1.5I_d^2 \left[R_s + L_m^2 \left(K_h z_p |\omega| + K_e (z_p \omega)^2 \right) \right], \quad (2.27)$$

$$P_q = 1.5I_q^2 \left[R_s + K_r^2 R_r + K_e K_r^2 R_r^2 + K_r^2 L_{rs}^2 \left(K_h (z_p |\omega| + 2g\omega_s) + K_e (\omega_0^2 + 2\omega_0 \omega_s) \right) \right] \quad (2.28)$$

, де $g = \text{sign}(\omega)$.

2.3 Розрахунок потужності двигуна

Для визначення потужності асинхронного двигуна необхідно обрати прототип трактору. Для цього було обрано трактор українського заводу ДТЗ 5404, з двигуном CF 4B40T. Основні характеристики для обчислення двигуна на базі обраного трактору наведені в таблиці 2.1 [24].

Таблиця 2.1 – Вихідні дані електроприводу на базі трактора ДТЗ 5404

Повна маса електротрактору m , кг	1770
Радіус більшого колеса R_k , м	0.6
Радіус меншого колеса r_k , м	0.4
Маса більшого колеса m_{k1} , кг	42.9
Маса меншого колеса m_{k2} , кг	16
Передатне відношення редуктора i_p	8.5
Максимальна усталена швидкість V_m , км/год (м/с)	39 (10.8)
Номінальна усталена швидкість V_n , км/год (м/с)	10(2.7)
Момент інерції тягового АД J_δ , кгм ²	0.19
Максимальне прискорення/сповільнення $a_m = b_m$, м ² /с	0.5

Рівняння руху електроприводу механічної частини електротрактора, представлена єдиною схемою розрахунку маси у вигляді:

$$J \dot{\omega} = M_\delta, \quad (2.29)$$

де J – сумарний приведений момент інерції,

M_o – динамічний момент,

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

Розрахувати приведений момент інерції можна за формулою:

$$J = J_m + J_o + J_k = m \cdot \frac{R_k^2}{i^2} + J_o + \frac{2 \cdot m_{k1} \cdot R_k^2 + 2 \cdot m_{k2} \cdot r_k^2}{2 \cdot i^2} \quad (2.30)$$

де J_m – приведений момент інерції ТЗ,

J_o – момент інерції тягового АД,

J_k – сумарний момент коліс трактора.

В розрахунках буде використано траєкторію оранки трактора. Така траєкторія буде відпрацьовуватись на першій передачі, тому до передатного числа редуктора, буде додано передатне число з коробки передач – 3.91.

Спочатку потрібно розрахувати момент інерції другої передачі, потім з додавання числа з коробки передач для першої передачі рівняння (2.31).

Підставимо значення з табл.4.1:

$$\begin{aligned} J &= J_m + J_o + J_k = 1770 \cdot \frac{0,6^2}{(8,5)^2} + \\ &+ 0,19 + \frac{2 \cdot 43,9 \cdot 0,36 + 2 \cdot 16 \cdot 0,16}{2 \cdot (8,5)^2} = 9,25 \text{ кг} / \text{м}^2 \\ J &= J_m + J_o + J_k = 1770 \cdot \frac{0,6^2}{(8,5 \cdot 3,91)^2} + \\ &+ 0,19 + \frac{2 \cdot 43,9 \cdot 0,36 + 2 \cdot 16 \cdot 0,16}{2 \cdot (8,5 \cdot 3,91)^2} = 0,782 \text{ кг} / \text{м}^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Визначення потужності двигуна проводитиметься за траєкторією зміни швидкості трактора. Траєкторія приблизно описує функцію оранки. Траєкторія зміни зображена на рисунку 2.2.

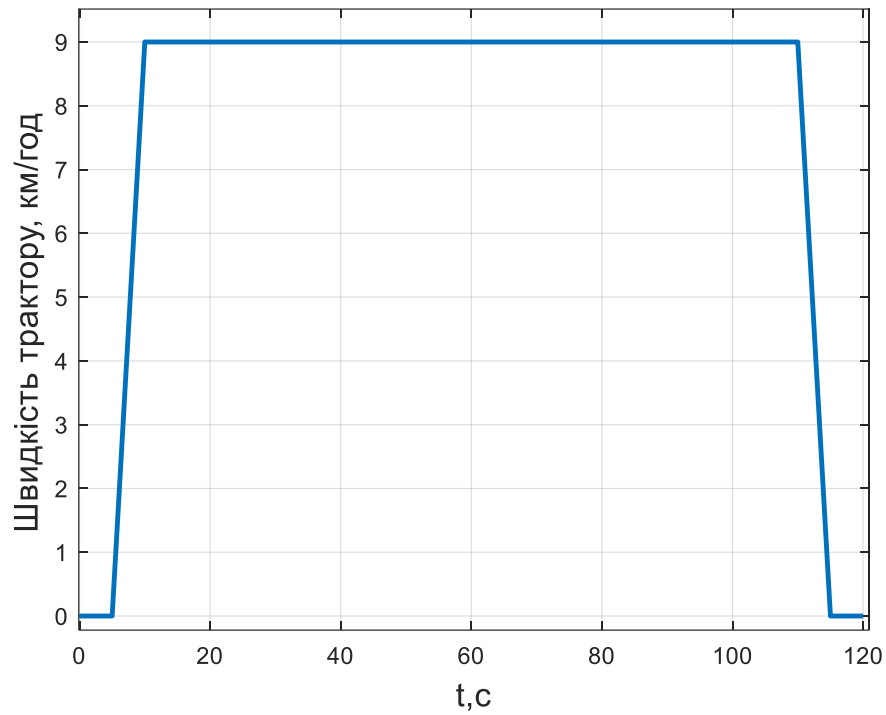


Рисунок 2.2 – Траєкторія зміни швидкості трактора

Траєкторію зміни прискорення трактора отримаємо, взявши похідну за часом від траєкторії зміни швидкості. Результат показано на рисунку 2.3.

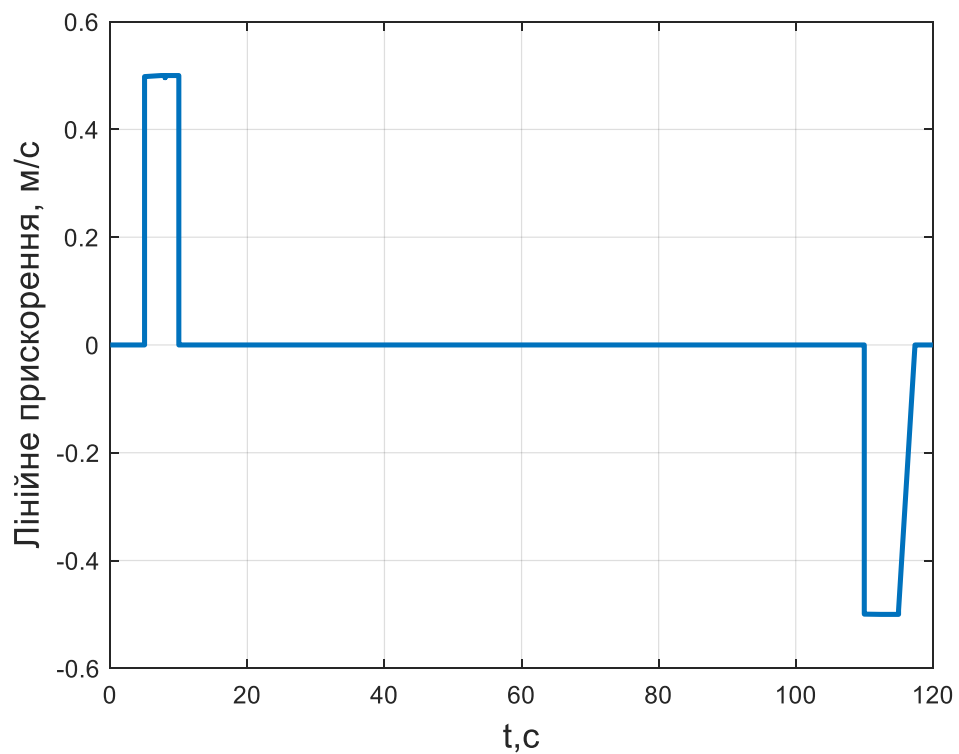


Рисунок 2.3 – Траєкторія зміни прискорення/сповільнення трактора

Коли в роботі електроприводу, кутова швидкість лишається незмінною, то момент двигуна рівний статичному. Коли ж відбувається зміна кутової швидкості, виникає динамічний момент. За рівнянням $M_d = J \frac{a_m \cdot i}{R_k}$ отримаємо навантажувальну діаграму електродвигуна.

На рисунку 2.4 наведено момент двигуна, суму динамічного і статичного моментів. Загальний опір трактора в русі визначається як сума складових опор руху, яка поділяється на основний опір і додатковий опір. В основному він включає всі сили, що діють на прямолінійний рух трактора, а саме: внутрішній опір руху трактора (спричинений тертям зчеплених елементів конструкції);

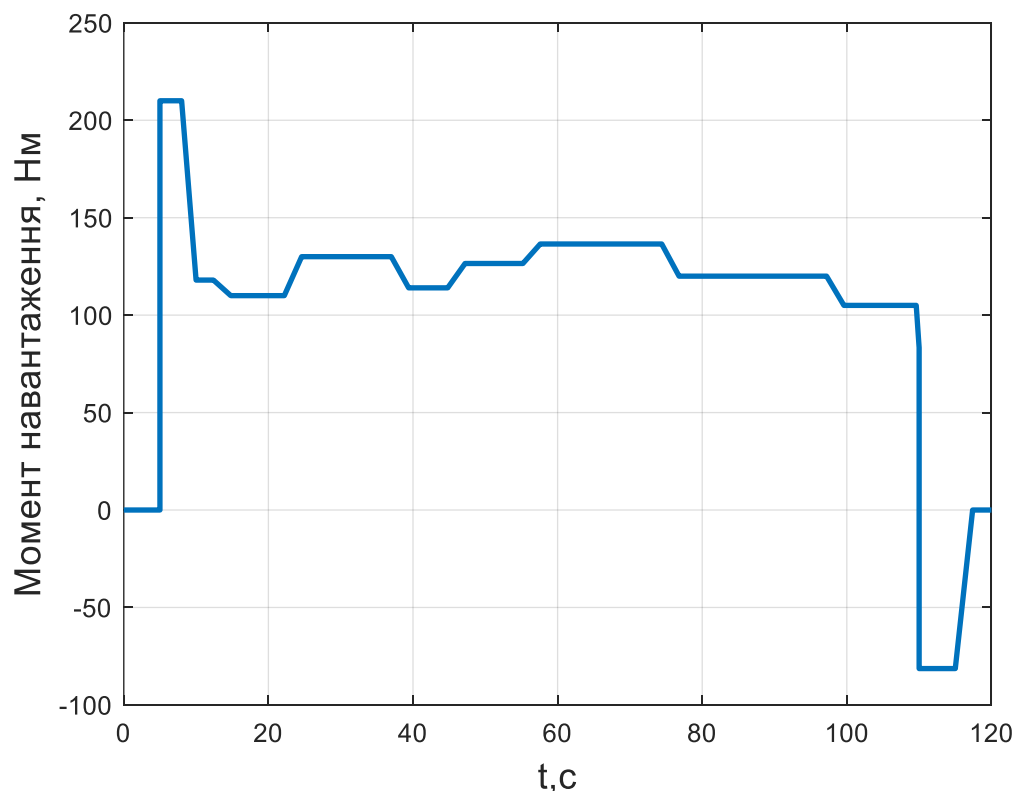


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма електродвигуна

Опір, обумовлений взаємодією коліс трактора з дорожнім покриттям; опір повітря і опір, викликаний навісним обладнанням. Трактори відчують додатковий опір при спусках, підйомах і поворотах. Для спрощення аналізу приймемо, що опір, спричинений взаємодією колеса трактора з дорожнім

покриттям, як і внутрішній опір руху, постійний і не змінюється з часом. Величина опору повітря незначна, оскільки трактор працює на відносно низькій швидкості. Виходячи з наведених вище припущень, статичний крутний момент на валу приводного двигуна визначається наступним чином. $M_c = M_{ct} + M_{cz}$
Зробимо значення статичних моментів рівними $M_c = 0.8M_n = 120 \text{ Нм}$.

Визначаємо еквівалентний крутний момент двигуна чисельним інтегруванням карти навантаження, яка задається загальною формулою:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} M^2(t) dt} = 121.5 \text{ Нм} \quad (2.32)$$

де M - момент двигуна на навантажувальній діаграмі,

T_u - час циклу.

Визначимо номінальну потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = k_z \cdot M_e \cdot \omega_n = 1.1 \cdot 121.5 \cdot 157 = 20.98 \text{ кВт} \quad (2.33)$$

де $k_z = 1.1 \div 1.3$ – коефіцієнт запасу,

ω_n – номінальна швидкість обертання валу двигуна.

За розрахованими даними було обрано двигун 4A180S4Y3 з каталогу [26] параметри якого наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна 4A180S4Y3

Номінальна потужність двигуна	$P_{2n} = 22 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції двигуна	$J_d = 0.19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
ККД двигуна	$\eta = 0.9$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.9$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.5$
Номінальне ковзання	$S_n = 0.019$

Продовження таблиці 2.2 – Параметри двигуна 4A180S4Y3

Критичне ковзання	$S_{\kappa} = 0.14$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1^{\perp} = 0.08$
Активний опір статора	$\bar{R}_1^{\perp} = 0.041$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2^{\parallel} = 0.12$
Приведений індуктивний опір ротора	$\bar{R}_2^{\parallel} = 0.021$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_{\mu} = 4$

2.4 Перевірка правильності вибору двигуна

Після вибору потужності двигуна на підставі методу еквівалентного струму необхідно перевірити двигун на перевантажувальну здатність.

Скориставшись даними таблиці 4.2, можна розрахувати номінальний момент двигуна.

Номінальний момент двигуна розраховується за такою формулою:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\omega_{xx}(1 - S_n)} = \frac{22000}{157.07(1 - 0.019)} = 142,7777 \text{ Нм}, \quad (2.34)$$

$$\text{де } \omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{2\pi f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157.07 \text{ рад/с} \quad - \quad \text{кутова швидкість}$$

ідеального холостого ходу.

Підставивши чисельні значення, отримаємо:

Максимальний момент виконавчого механізму розраховується за такою формулою:

$$M_{max} = \lambda \cdot M_n = 2.5 \cdot 142.77 = 356,9443 \text{ Нм} \quad (2.35)$$

Умовою перевірки двигуна на перевантажувальну здатність є:

$$M_{max} > M_1, \quad (2.36)$$

де M_1 - максимальний момент на навантажувальній діаграмі,

$M_{max} = \lambda M_n$ - максимальний момент обраного двигуна.

Підставивши чисельні значення, отримаємо:

$$M_{max} > M_1 = 356,9443 \text{ Нм} > 210 \text{ Нм} \quad (2.37)$$

Також перевіримо двигун по нагріву, для цього необхідне виконання наступної умови:

$$M_n > M_{екв} \quad (2.38)$$

$$M_n > M_{екв} = 142,7777 > 121,5.$$

Ця перевірка також виконується.

2.5 Розрахунок акумуляторної батареї

Всі акумулятори відрізняються хімічним складом, ємністю і вихідною напругою. Вибираючи тип батареї, варто оцінити середовище використання, де буде встановлено пристрій. Маленькі електромобілі використовують батареї на 6, 12, 24, 36 і 48 В. Максимальна швидкість, яку може досягти транспортний засіб, залежить від напруги, оскільки чим вища напруга живлення, тим більшу ЕРС двигуна може компенсувати.

Проведемо розрахунок батареї для вище розрахованого електротрактора [27].

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики трактора

Експлуатаційна маса, кг	1770
Довжина, мм	3600
Ширина, мм	1400
Висота, мм	2070
Щільність повітряного потоку ξ	1.225
Фронтальна площа A_f , м ²	2.55
Аеродинамічний коефіцієнт C_w	0.7

До енергії, що розсіюється при русі трактора, відносяться втрати при перетворенні електричної енергії в кінетичну (і навпаки), а також втрати на

тертя і аеродинамічний опір. Повна енергія акумуляторної батареї розраховуватиметься за формулою:

$$W_{\text{акум.бат}} = W_{\text{тертя}} + W_{\text{ел}} \quad (2.39)$$

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

$W_{\text{ел}}$ – втрати в електричному обладнанні та трансмісії.

Розрахуємо енергію втрат:

$$W_{\text{тертя}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(mgf_r + \frac{1}{2} \xi C_w A_f V^2 \right) \cdot V dt, \quad (2.40)$$

де $T = 500$ с — кінцевий час маршрутного циклу;

$g = 9.81$ – прискорення вільного падіння.

Далі необхідно перетворити електричну енергію в кінетичну.

Розрахуємо сумарний ККД

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}} = 0,97 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 0,84$$

ККД інвертора $\eta_{\text{інв}} = 0,97$,

ККД двигуна $\eta_{\text{дв}} = 0,91$,

ККД редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0,98$.

Енергія, що втрачається при перетворенні з електричної в кінетичну:

$$W_{\text{ел}} = (1 - \eta_{\Sigma}) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T m \frac{dV}{dt} dt \quad (2.41)$$

Підставивши коефіцієнти та розраховавши інтеграли (2.40) та (2.41), знайдемо запас енергії акумуляторної батареї на 2.6 км.

$$W_{\text{АКБ}} = 8.95 \text{ МДж} \quad (2.42)$$

Знайдемо заряд, для подолання маршруту в 50 км, постійна напруга акумуляторної батареї при цьому становитиме $U_{dc} = 540$ В:

$$W_{50} = \frac{W_{\text{АКБ}} \cdot 50}{S} = 172.11 \text{ МДж} \quad (2.43)$$

де $S = 2.6$ км

$$I_h = \frac{W_{50}}{3600 \cdot U_{dc}} = \frac{172.11 \cdot 10^6}{3600 \cdot 540} = 88.53 \text{ A} \cdot \text{год} \quad (2.44)$$

Для електротрактору було обрано літій-іонні акумулятори типу INR18650, характеристики яких наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри акумулятора типу INR18650

Виробник	Samsung
Вага, кг	0.023
Номінальна ємність (C), А×год	1.3
Номінальна напруга, В	3,6
Висота, мм	65.3
Діаметр, мм	18.5
Вартість батареї, \$	2.4

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	130
Кількість послідовно з'єднаних елементів	150
Кількість паралельно з'єднаних елементів	45
Сумарна кількість елементів	6750
Вага, кг	155,25
Вартість, \$	16200

2.6 Розрахунок номінальних даних двигуна та параметрів схеми заміщення

Вихідні дані для розрахунку параметрів наведені в таблиці 2.2.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад/с.} \quad (2.45)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.16}{2} = 157.08 \text{ рад/с.} \quad (2.46)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_n) = 157.08 \cdot (1 - 0.019) = 154.09 \text{ рад/с.} \quad (2.47)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{22 \cdot 10^3}{154.09} = 142.7737 \text{ Нм.} \quad (2.48)$$

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

$$M_k = M_n \cdot \lambda = 356.9443 \text{ Нм.} \quad (2.49)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В,} \quad (2.50)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.9} = 41.15226 \text{ А.} \quad (2.51)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$\begin{aligned} U_{na} &= \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В} \\ I_{na} &= \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 41.15 = 58.1980 \text{ А} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Номінальний повний опір:

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{220}{41.15} = 5.346 \text{ Ом} \quad (2.53)$$

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

$$\Psi_a = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314.16} = 0.987 \text{ Вб.} \quad (2.54)$$

В середовищі MATLAB Simulink математична модель асинхронного двигуна отримана для Т-подібної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 2.5

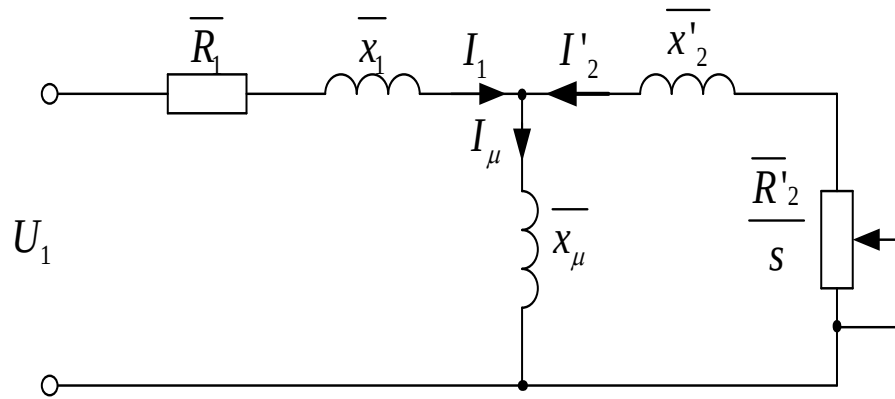


Рисунок 2.5 – Т-подібна схема заміщення АД

Параметри двигуна в таблиці 2.2 наведені для Г-подібної схеми заміщення, що зображена на рисунку 2.6

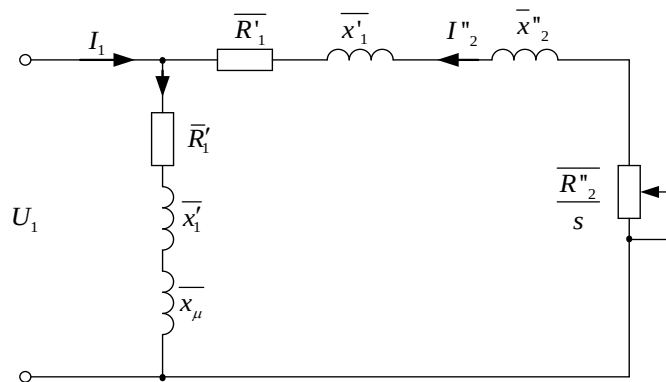


Рисунок 2.6 – Г-подібна схема заміщення АД

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

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{(\bar{x}_\mu)^2 + 4 \cdot \bar{x}_1' \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{4 + \sqrt{4^2 + 4 \cdot 0.08 \cdot 4}}{2 \cdot 4} = 1.16 \quad (2.55)$$

Активні та індуктивні опори статора і ротора:

$$X_1 = \frac{\bar{X}_1'}{c_1} Z_n = \frac{0.08}{1.16} \cdot 5.346 = 0.368 \quad , \quad (2.56)$$

$$X_2^l = \frac{\bar{X}_2^{\parallel}}{c_1^2} Z_n = \frac{0.12}{1.16^2} \cdot 5.346 = 0.476, \quad (2.57)$$

$$R_1 = \frac{\bar{R}_1^{\parallel}}{c_1} Z_n = \frac{0.041}{1.16} \cdot 5.346 = 0.188, \quad (2.58)$$

$$R_2^l = \frac{\bar{R}_2^{\parallel}}{c_1^2} Z_n = \frac{0.021}{1.16^2} \cdot 5.346 = 0.0834. \quad (2.59)$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_{\mu} = \bar{X}_{\mu} Z_n = 21.384 \text{ Ом.} \quad (2.60)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.368}{157.08} = 0.00235 \text{ Гн,} \quad (2.61)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2^l}{\omega_0} = \frac{0.476}{157.08} = 0.00304 \text{ Гн.} \quad (2.62)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{\omega_0} = \frac{21.384}{157.08} = 0.136 \text{ Гн.} \quad (2.63)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.13849 \text{ Гн,} \quad (2.64)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.13918 \text{ Гн.} \quad (2.65)$$

2.7 Вибір перетворюючого пристрою

Для вибору перетворювача необхідно використати вище розраховані номінальний струм і потужність. Промисловий перетворювач ABB ACS580 потужністю 22 кВт і номінальним струмом 46А відповідно розрахункам. Перетворювачі ABB ACS580-01-046А призначені для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів [37].



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд приводу ABB ACS580

Перетворювач частоти ACS580 надійний в експлуатації. Приводи механізмів загального призначення ACS580 є частиною сімейства універсальних приводів виробництва компанії АББ. Частотні перетворювач дозволяють скоротити витрати енергії в технологічному процесі, не знижуючи продуктивність системи.

Перетворювач частоти ABB ACS580 має наступні основні функції, перелічені нижче:

Основні переваги

- зручне налаштування;
- інтерфейс Modbus RTU;
- функція безпечного відключення;
- дросель з змінною індуктивністю;
- зручний інтерфейс;
- підвищення ефективності роботи;
- оптимізатор енергоспоживання та лічильники;
- програма для вводу в експлуатацію;

- сумісність з основними промисловими протоколами;
- модулі розширення входів та виходів;
- віддалений моніторинг.

Таблиця 2.6 – Характеристики перетворювача ACS580-01-046A-4

Бренд	ABB
Найменування	ACS580-01-046A-4
Потужність	30 кВт
Робота з невеликим навантаженням	22 кВт, 42.8 А
Робота у важкому режимі	18.5 кВт, 37.7 А
Число фаз/напруги на вході	3-ф/380 (трифазне 380) В
Число фаз/напруги на виході	3-ф/380 В
Коефіцієнт потужності	98%
Струм номінальний	46.00 А
Максимальний вихідний струм	64 А
Частота	50 Гц
Способи керування	Частотне та векторне
Максимальна вихідна частота	500 Гц
Регулювання моменту	<10 мс при номінальному моменті
Регулювання швидкості	Статична помилка: 20% від номінального ковзання двигуна Динамічна помилка: 1% секунд при 100% етапі наростання моменту
Ступінь захисту	IP21 у стандартній комплектації, IP55 як опція
ЕМС фільтр	Є

Висота	600 мм
Ширина	203 мм
Глибина	258 мм
Гальмівний модуль	Є
Вбудований регулятор	ПІД
Векторний режим керування с енкодером	MTAC-01
Лінійний закон керування U/f	Присутній
Квадратичний закон керування U/f^2	Присутній
Тепловіддача	1153 Вт
Витрата повітря	280 м ³ /год
Макс. рівень шуму	62 Дб
Запобіжники ІЕС	100 А
Запобіжники UL	90 А

Висновки до розділу 2:

1. Представлена модель асинхронного двигуна змінного струму в системі відліку (d-q).

2. З рівнянь математичної моделі АД виведено традиційне векторне керування асинхронним двигуном, що описано в рівняннях (2.11 - 2.16) .

3. Дано основні види втрат потужності в АД та їх рівняння.

4. Отримано загальну модель втрат потужності $(2.25)A_d$, та окремо для P_d та P_q .
5. Розраховано потужність двигуна по циклу руху, та обрано АД потужністю 22кВт.
6. Перевірено даний двигун на перевантажувальну здатність та по нагріву.
7. Розраховано акумуляторну батарею на ємність 130 А*год.
8. Розраховано номінальні значення двигуна та перераховано параметри з Г-подібної схеми в Т-подібну.
9. Обрано перетворювальний пристрій фірми АВВ з номінальним струмом в 46А.

- силовій частини (АД, інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією);
- оцінювача потокозчеплення ротора;

Тут відбувається визначення модуль Ψ_r вектору $\bar{\Psi}_r$ та Θ_0 , де Θ_0 є кутом повороту вектору потокозчеплення, вони визначаються за рівняннями (2.11), (2.12) а також нелінійною залежністю $L_m(\Psi_m^2)$.

$$\Psi_{md} = \Psi_r + L_{ro} R_r^{-1} d\Psi_r / dt; \quad \Psi_{mq} = L_{ro} K_r I_q. \quad (3.1)$$

- частини регулювання;
- блоків векторних перетворень (перетворювачі фаз ПФ1, ПФ2, перетворювачі координат ПК1, ПК2, блок компенсації зв'язків БКЗ та підсистема оцінювання вектору потокозчеплення ротора АД.);

У блоці (a,b,c) > (d,q) рис.3.1 відбувається вимірювання значень струмів фаз статора I_A, I_B , далі вже виміряні сигнали перетворюються у сигнали I_α, I_β двофазної системи α, β згідно за співвідношеннями:

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B) / \sqrt{3} \quad (3.2)$$

Далі струми I_α, I_β перетворюються у струми координат d,q - I_d, I_q відповідно:

$$I_d = I_\alpha \cos \Theta_0 + I_\beta \sin \Theta_0; \quad I_q = I_\beta \cos \Theta_0 - I_\alpha \sin \Theta_0, \quad (3.3)$$

У блоці (d,q) > (a,b,c) рис.3.1 сигнали системи координат d,q перетворюються до сигналів системи координат α, β згідно із виразами:

$$u_\alpha = u_{d\Sigma} \cos \Theta_0 - u_{q\Sigma} \sin \Theta_0, \quad u_\beta = u_{d\Sigma} \sin \Theta_0 + u_{q\Sigma} \cos \Theta_0. \quad (3.4)$$

Далі отримані сигнали напруг u_α, u_β перетворюються у сигнали завдання напруг u_A, u_B, u_C трифазної системи A,B,C, відповідно:

$$u_A = u_\alpha, \quad u_B = (-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta) / 2, \quad u_C = (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta) / 2. \quad (3.5)$$

- та вище вказаної доданої частини мінімізації втрат потужності (мінімізатор втрат потужності МВП). Цей блок детально описано в подальшому розділі 3.6. даної дисертації. Вхідними сигналами блоку є струми

I_d, I_q та кутова швидкість, вихідним сигналом цього блоку є величина завдання потокозчеплення ротору.

3.2 Синтез регулятора струму I_d

При розрахунку каналу регулювання струму статора, величиною розсіювання двигуна можна знехтувати. Це дозволяє реалізовувати ПІ-регулятор струму. Контур регулювання вектору струму I_d зображено на рисунку 3.2 [35].

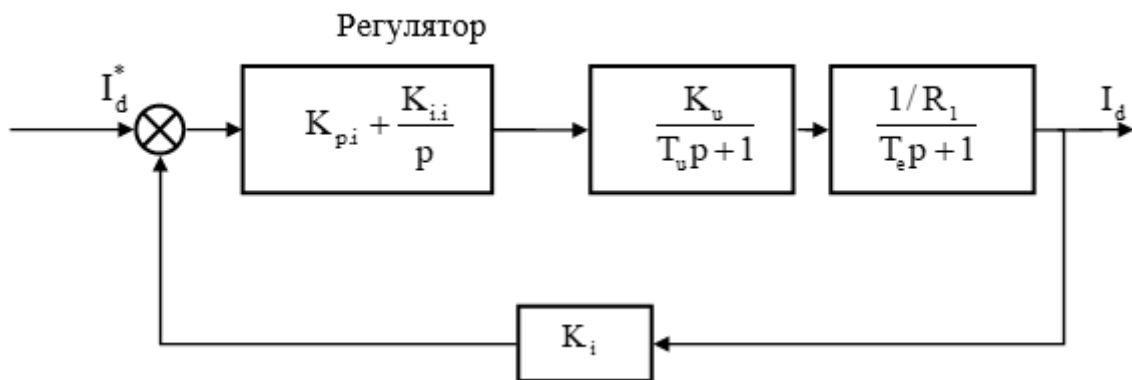


Рисунок 3.2 – Контур регулювання струму I_d

В такому випадку передаточна функція даного об'єкту розімкненої системи матиме вигляд :

$$W_{\text{оп.с}}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (3.6)$$

Передаточна функція регулятора струму при налаштуванні на модульний оптимум матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.і}}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2 T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i p} \quad (3.7)$$

ПІ-регулятор струму:

$$W_{\text{рег.і}}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}, \quad (3.8)$$

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

$$\text{де } R_1 = R_s + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r;$$

$$R_1 = 0.2687 \text{ Ом};$$

$$K_u = 311 \text{ В};$$

$$T_e = \frac{L_s \sigma + \frac{L_m}{L_r} L_r \sigma}{R_1}; \quad (3.9)$$

$$T_e = \frac{0.0023 + 0.0029}{0.2687} = 0.019 \text{ с}. \quad (3.10)$$

Стала часу T_u буде визначатись, як сума сталих часу аперіодичної ланки T_k , яка описує інвертор напруги сталої часу T_f .

$$T_u = T_k + T_f = 0.0002 + 0.0008 = 0.001 \text{ с} \quad (3.11)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку K_i прийmemo за 1.

Підставимо значення в рівняння R_1, K_u, T_u, T_e, K_i (3.7), коефіцієнти ПІ-отримаємо :

$$K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} = \frac{0.019 \cdot 0.268}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.0085; \quad (3.12)$$

$$K_{i.i} = \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i} = \frac{0.268}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.432. \quad (3.13)$$

При врахуванні регулятора передаточної функції розімкнutoї системи, система матиме вигляд:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2 T_u p (T_u p + 1)}. \quad (3.14)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2 T_u p (T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{0.5 \cdot 10^{-6} p^2 + 0.001 p + 1}.$$

$T_u^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$ – знехтуємо цією частиною, так як її величина мала.

В результаті, передатна функція замкненої системи матиме вигляд:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1} \quad (3.15)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0.002p + 1} \quad (3.16)$$

Графік перехідного процесу зображено на рисунку 3.3

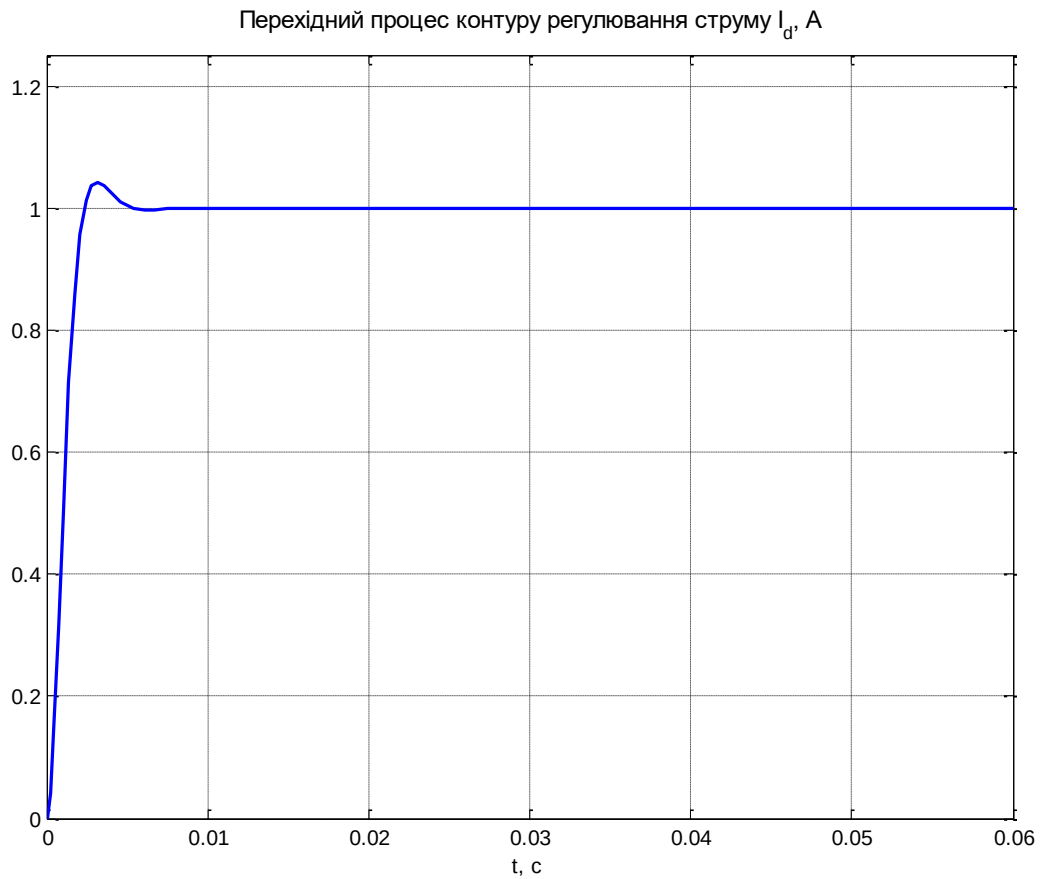


Рисунок. 3.3 – Графік перехідного процесу контуру регулювання струму I_d

3.3 Синтез регулятора струму I_q .

Оскільки контури регулювання струму статора I_q і I_d (рис.3.4) є однаковими, то алгоритм синтезу має таку саму методику.

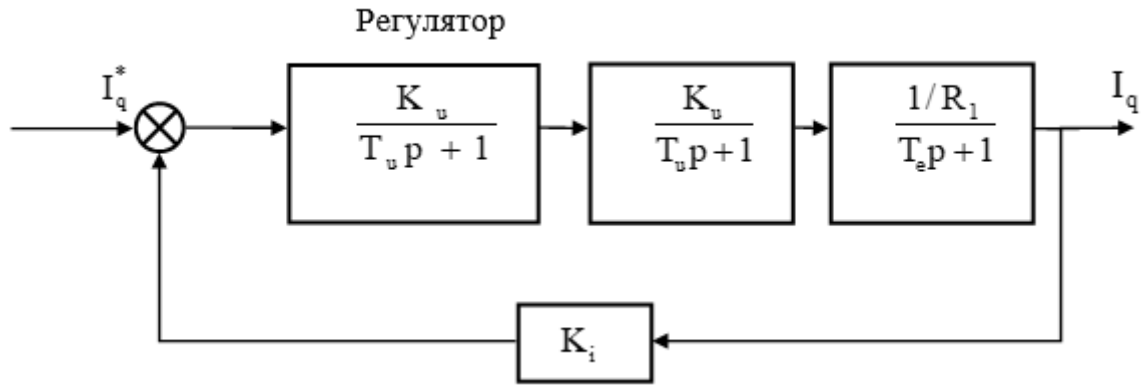


Рисунок 3.4 – Контур регулювання струму I_q

Передаточна функція даного об'єкту регулювання:

$$W_{op.c}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (3.17)$$

Передаточна функція регулятора при налаштуванні контуру струму на модульний оптимум:

$$W_{рег.i}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2T_u K_u K_i p} \quad (3.18)$$

ПІ-регулятор струму:

$$W_{рег.i}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}, \quad (3.19)$$

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

$$R_1 = 0.2687; K_u = 311 \text{ В};$$

$$T_u = 0.001 \text{ с}; T_e = 0.019 \text{ с};$$

Для моделювання візьмем коефіцієнт зворотного зв'язку K_i рівним 1.

Коефіцієнти ПІ-регулятора струму:

$$K_{p.i} = 0.0085; K_{i.i} = 0.432.$$

При врахуванні регулятора передаточної функції розімкненої системи, система матиме вигляд:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)} \quad (3.20)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1} \quad (3.21)$$

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{0,002p + 1} \quad (3.22)$$

Графік перехідного процесу зображено на рисунку 3.5.

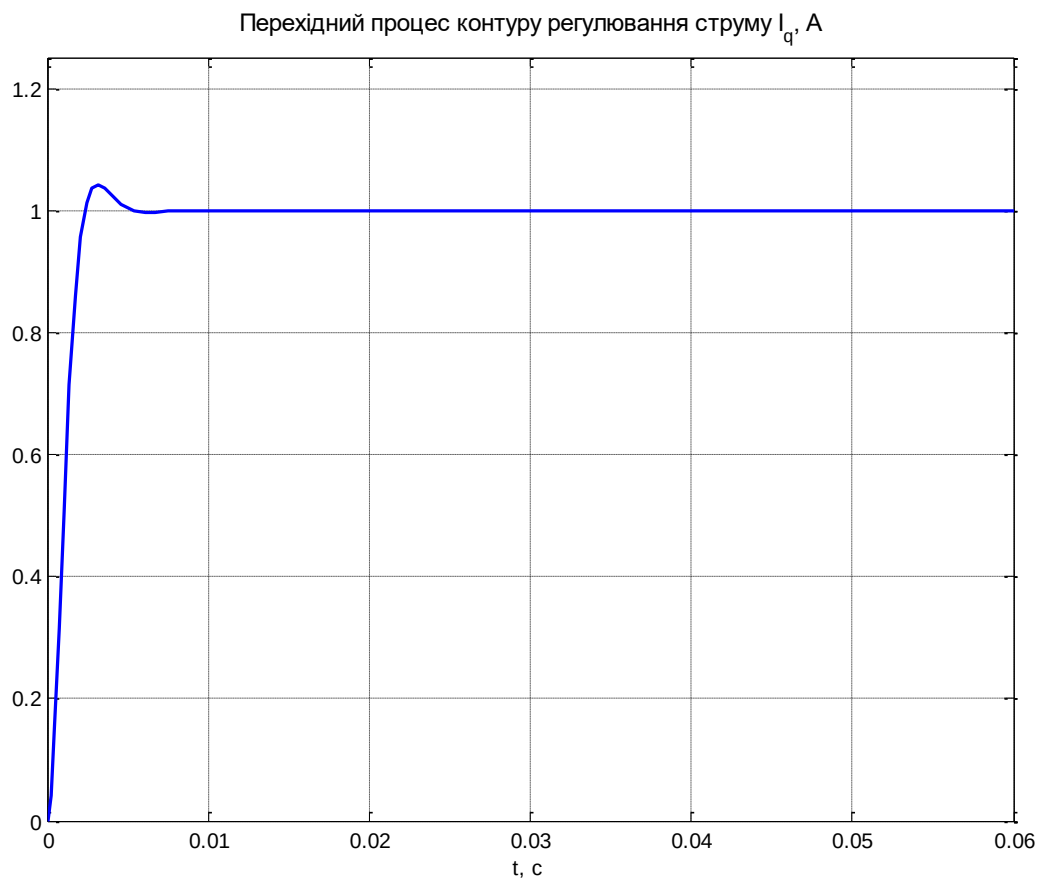


Рисунок. 3.5 – Графік перехідного процесу контуру регулювання струму

I_q

3.4 Синтез регулятора потокозчеплення ротора Ψ_r

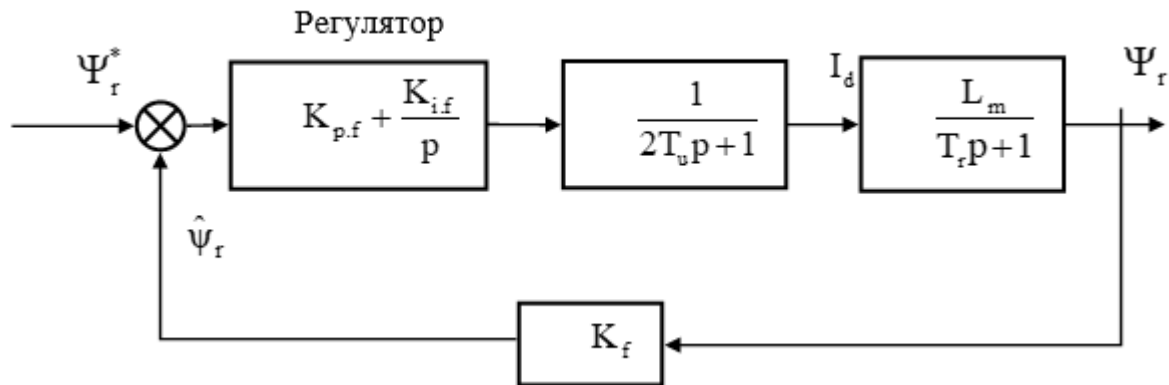


Рисунок 3.6– Контур регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r

Передаточна функція даного об'єкту регулювання:

$$W_{\text{ор.п}}(p) = \frac{L_m K_f}{(2T_u p + 1)(T_r p + 1)} \quad (3.23)$$

Передаточна функція регулятора при налаштуванні контуру потокозчеплення ротора на модульний оптимум:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = \frac{T_r p + 1}{4T_u L_m K_f p} = \frac{T_r}{4T_u L_m K_f} + \frac{1}{4T_u L_m K_f p} \quad (3.24)$$

ПІ-регулятор потокозчеплення ротора:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p}, \quad (3.25)$$

$$\text{де } K_{p.f} = \frac{T_r}{4T_u L_m K_f}; \quad K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_m K_f};$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = 1.668 \text{ с}; \quad L_m = 0.136 \text{ Гн.}$$

Для моделювання візьмем коефіцієнт зворотного зв'язку K_i рівним 1. Підставимо значення в рівняння T_u, T_r, L_m, K_f (3.23), коефіцієнти ПІ-регулятора потокозчеплення матимуть вигляд:

$$K_{p.f} = \frac{T_r}{4T_u L_m K_f} = 3063.26; \quad (3.26)$$

$$K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_m K_f} = 1836.3 \quad (3.27)$$

При врахуванні регулятора передаточної функції розімкненої системи, система матиме вигляд:

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1)} \quad (3.28)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{\text{зам.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-6} p^2 + 0,004p + 1} \quad (3.29)$$

Графік перехідного процесу зображено на рисунку 3.7.

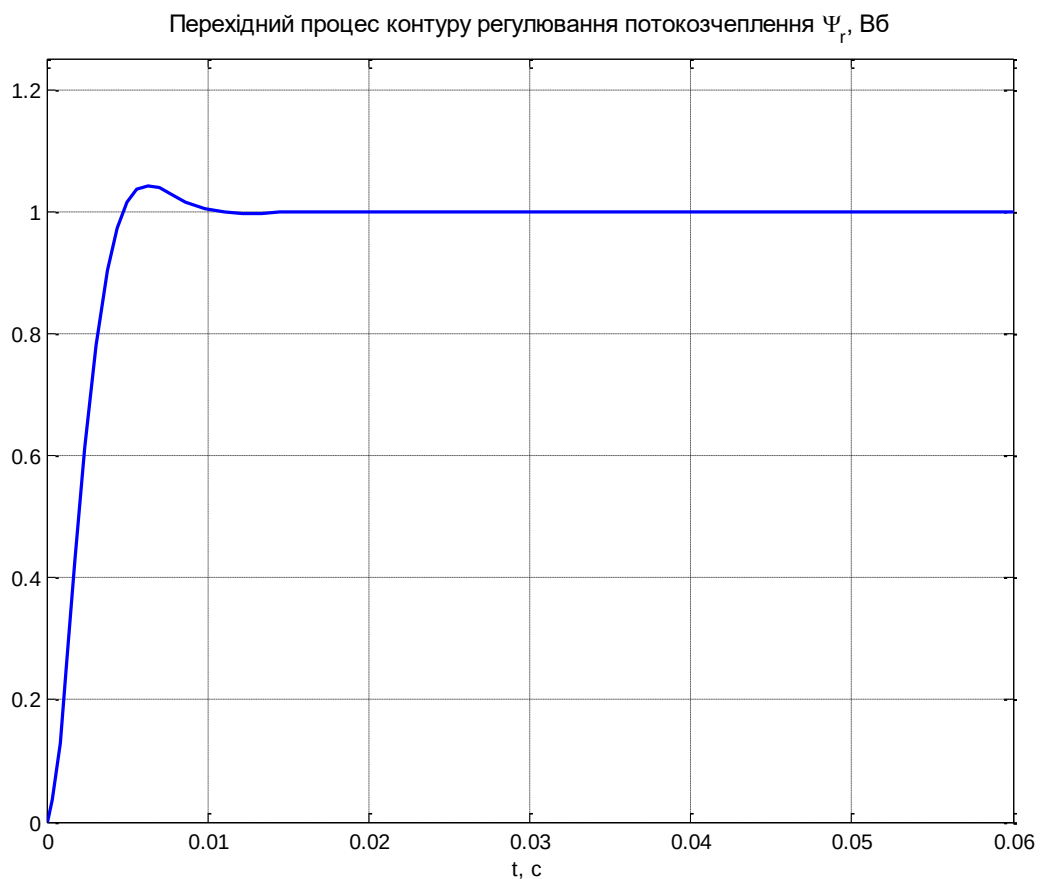


Рисунок. 3.7 – Графік перехідного процесу контуру регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r

3.5 Синтез регулятора швидкості ЕП

Формування завдання по активній складовій струму статора виконується в замкнутому контурі регулювання швидкості. Стандартні налаштування регулятора швидкості на технічний чи симетричний оптимум при постійному потокозчепленні ротора можливі у випадку структурної лінеаризації контуру швидкості. Так як для приводу необхідні особливі потреби по динаміці, налаштування швидкості відбувається на симетричний оптимум [35].

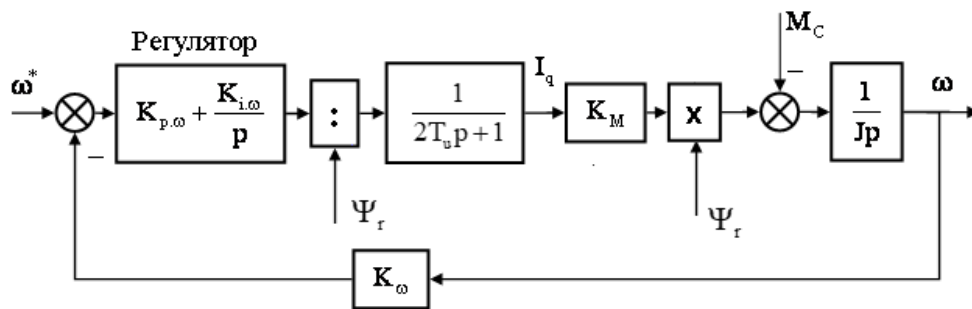


Рисунок 3.8 – Контур регулювання швидкості ω

Передаточна функція об'єкту регулювання контуру швидкості

$$W_{\text{оп.ш}}(p) = \frac{K_M K_\omega}{(2T_u p + 1) J p} \quad (3.30)$$

При налаштуванні контуру на симетричний оптимум передатна функція матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = \frac{J(8T_u p + 1)}{32T_u^2 K_M K_\omega p} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega} + \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega p} \quad (3.31)$$

ПІ-регулятор швидкості ротора:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = K_{p.\omega} + \frac{K_{i.\omega}}{p}, \quad (3.32)$$

$$\text{де } K_{p.\omega} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega}; \quad K_{i.\omega} = \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega}, \quad K_M = \frac{3z_p L_m}{2L_r} = 2.93,$$

де $J = 10.56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції ;

Для моделювання візьмем коефіцієнт зворотного зв'язку K_i рівним 1. Підставимо значення в рівняння T_u, K_M, K_ω, J (3.30). Коефіцієнти П-регулятора швидкості:

$$K_{p.\omega} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega} = \frac{0.19}{4 \cdot 0,001 \cdot 2.93 \cdot 1} = 16.21; \quad (3.33)$$

$$K_{i.\omega} = \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega} = \frac{0,19}{32 \cdot 0,001 \cdot 2,93 \cdot 1} = 2026.45. \quad (3.34)$$

При врахуванні регулятора передаточної функції розімкнутої системи, система матиме вигляд:

$$W_{\text{роз.ш}}(p) = \frac{8T_u p + 1}{8T_u p} \cdot \frac{1}{4T_u p (2T_u p + 1)} \quad (3.35)$$

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{\text{зам.ш}}(p) = \frac{8T_u p + 1}{64T_u^3 p^3 + 32T_u^2 p^2 + 8T_u p + 1} = \frac{0.008p + 1}{0.064p^3 + 0.032p^2 + 0.008p + 1}. \quad (3.36)$$

Графік перехідного процесу показано на рис. 3.9.

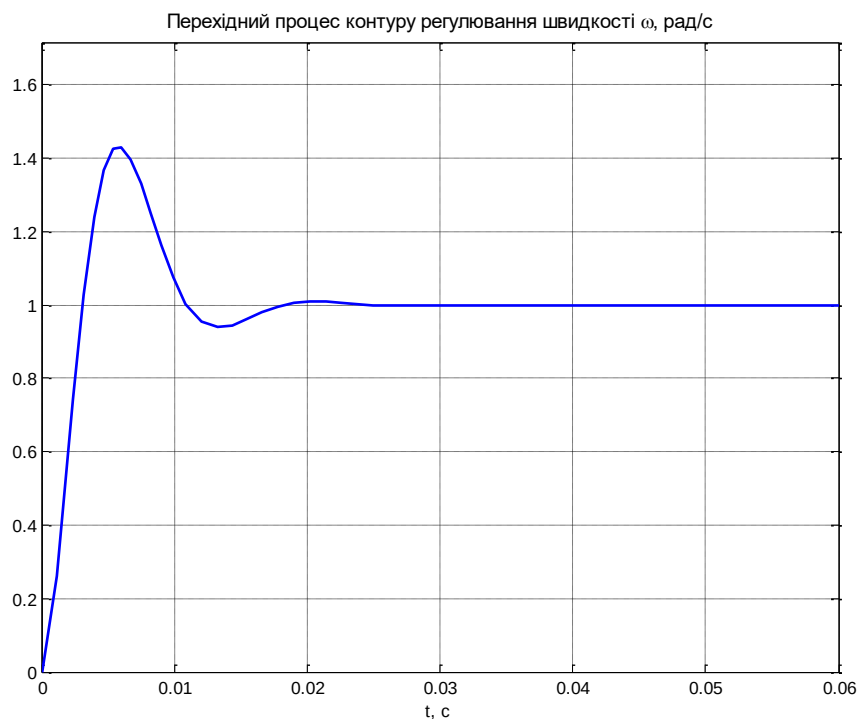


Рисунок 3.9 – Графік перехідного процесу контуру регулювання швидкості

3.6 Проектування оптимізатора втрат потужності

Мінімізатор втрат (МВ) потужності в АД, складається з обчислювача втрат P_d та P_q , блока обмеження (БО) виходу регулятора, ПІ-алгоритма регулювання.

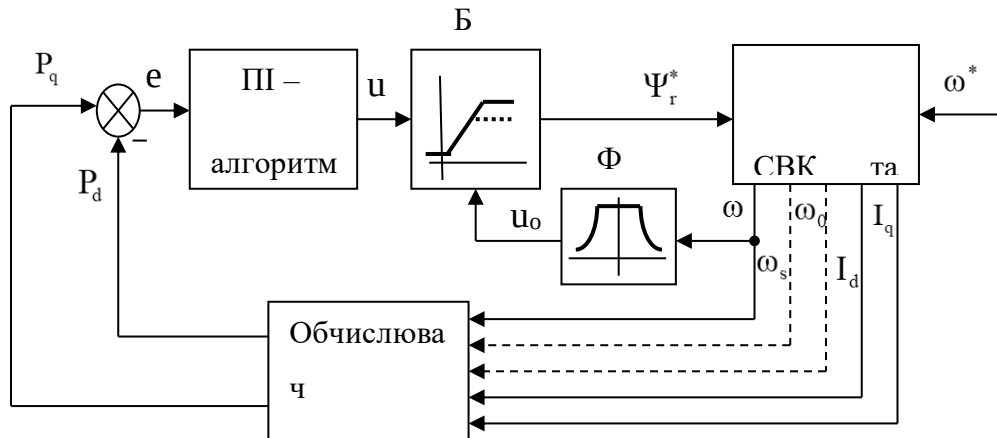


Рисунок 3.10 – Функціональна схема оптимізатора втрат

Також до замкненого контуру МВ, входять СВК та АД, звідки I_d , I_q , ω , ω_s , ω_0 поступають на обчислювач втрат, ω_s , ω_0 не будуть потрібними і тому позначені пунктирною лінією. Значення втрат P_q згідно з (2.27) є завданням для МВ, а відшукане згідно з (2.28) значення P_d є для МВ регульований значенням, за яким замикається коло зворотного зв'язку.

У мінімізаторі втрат застосовано ПІ-алгоритм регулювання:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3.37)$$

де $e(t)$ та $u(t)$ – вхід та вихід регулятора;

K_p та K_i – коефіцієнти передачі пропорційної та інтегральної частин регулятора.

У практичній реалізації алгоритму необхідно забезпечити його успішну роботу з обмеженнями вихідного сигналу або без них у БО. Важлива успішна робота МВ під дією БО залежить від того, що цей режим роботи буде не короткочасним, лише під час перехідних процесів, а тривалим, за умови, що навантаження і частота обертання двигуна знаходяться в його верхньому

діапазоні. Враховуючи це, отримано дискретний аналог ПІ-алгоритму МВ, структурна схема якого наведена на рис. 3.10. Де T_0 — такт квантування, $k=0, 1, 2, \dots$ — кількість тактів квантування, z^{-1} — затримка сигналу протягом одного такту.

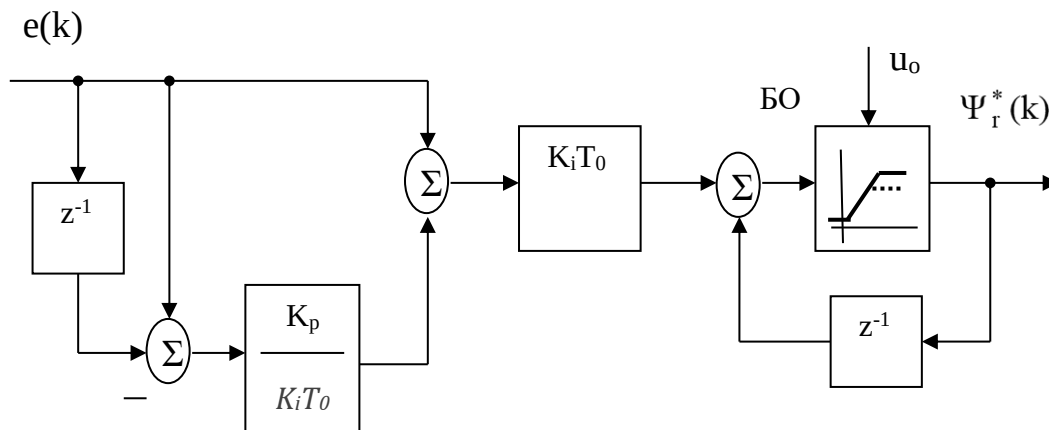


Рисунок 3.11 – Структурна схема ПІ регулятора для мінімізації втрат

Висновки до розділу 3:

1. Представлена функціональна схема САК АД безпілотного трактора з мінімізатором втрат потужності в АД.
2. Представлено складові частини функціональної схеми з їх описом.
3. Представлено розрахунки контурів регулювання струму статора I_q і I_d .
4. Описано синтез регулятора потокозчеплення ротора Ψ_r .
5. Описано синтез регулятора швидкості ЕП.
6. Спроектовано оптимізатор втрат потужності для АД.

РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АД БЕЗПІЛОТНОГО ТРАКТОРА

4.1 Побудова моделі САК АД в середовищі MatLab/Simulink

Для моделювання і симуляції роботи САК АД використовується середовище розробки MATLAB/SIMULINK. Модель побудована на базі функціональної схеми описаної в підрозділі 3.1. Модель (додаток 1) складається з окремих блоків, кожен з яких відтворює відповідний елемент схеми на рис.3.1

Основним блоком є **MA_(a,b)** – схема двофазної моделі асинхронного двигуна в системі координат a-b. В блоках **d_reg_Iq**, **d_reg_Id**, **d_reg_flux**, **d_reg_torque** реалізовані регулятори струмів, потокозчеплення та моменту відповідно. Перетворення векторів описане в рівняннях (3.2-3.5), відтворюється в блоках **transvec1**, **transvec2**. В розділі 3.6 було спроектовано мінімізатор втрат потужності, який реалізовано в блоці **BLM** на в додатку 1. Вихідним сигналом блоку є задане потокозчеплення.

Користуючись літературою[38], було створено траєкторії швидкостей і моментів навантаження, роботи трактора, задані спеціальними блоками Signal середовища SIMULINK: w1, w2, M1, M2 відповідно.

4.2 Дослідження перехідних процесів моделювання САК АД

Для дослідження перехідних процесів було промодельовано два режими роботи. Для цього в моделі є три перемикача, за допомогою яких можна змінювати задану швидкість трактору в км/год, моменти навантаження та потокозчеплення з блоку мінімізації чи номінальне значення.

Режим оранки

Для реалізації режиму оранки, було використано першу передачу двигуна, з номінальною швидкістю в 10 км/год. Момент інерції для такого режиму було розраховано в формулі (2.31).

В час 0 с. було накинута завдання потокозчеплення ротора. В 5 с. почалося наростання швидкості двигуна до 9 км/год та накид моменту навантаження. На графіку моменту навантаження, видно, що під час подачі, максимальний момент сягав близько 1.6 від номінального, що є в нормі, так як перевантажувальна здатність двигуна складає 2.5. На графіку моменту навантаження, показано моменти, що симулюють навантаження при режимі оранки трактора, але приблизно знаходиться в межах 95-75% від номінального моменту. В проміжку часу 110-115 с. відбувається скидання швидкості та навантаження до 0.

У результаті моделювання отримано перехідні процеси рис.4.2 фазних напруги, струму та потокозчеплення U_a , I_a , Ψ_a , струми статора I_d та I_q , напруги, струму двигуна U_s , I_s , а також графіки активної та електромеханічної потужності P_a , P_{em} . Так як швидкість сягала 90% від номінальної, потужності також не перевищували номінальну. Графіки було подані у відносних одиницях.

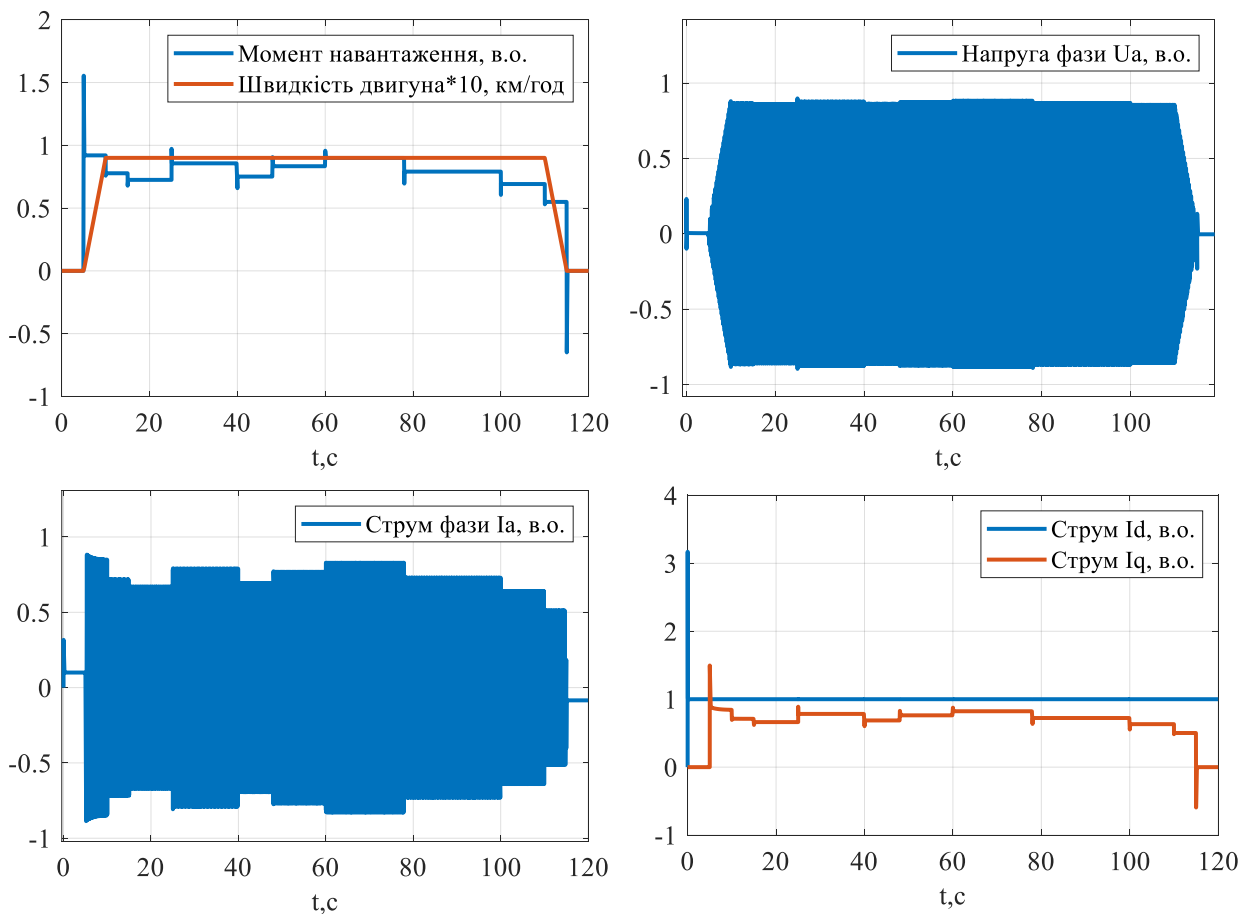


Рисунок 4.1 – Графіки перехідних процесів САК АД отримані в результаті симуляції режиму оранки трактора

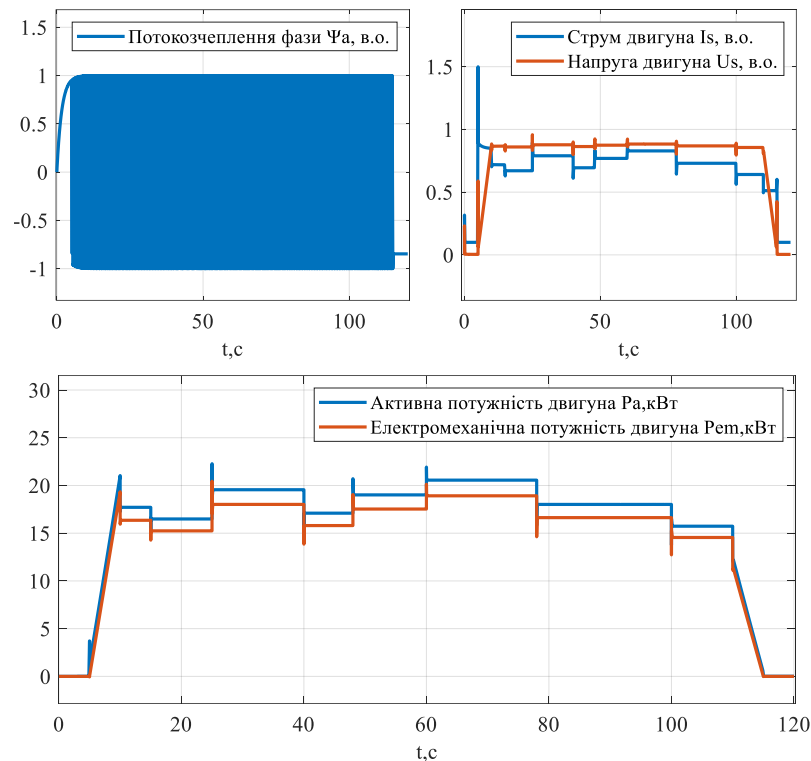


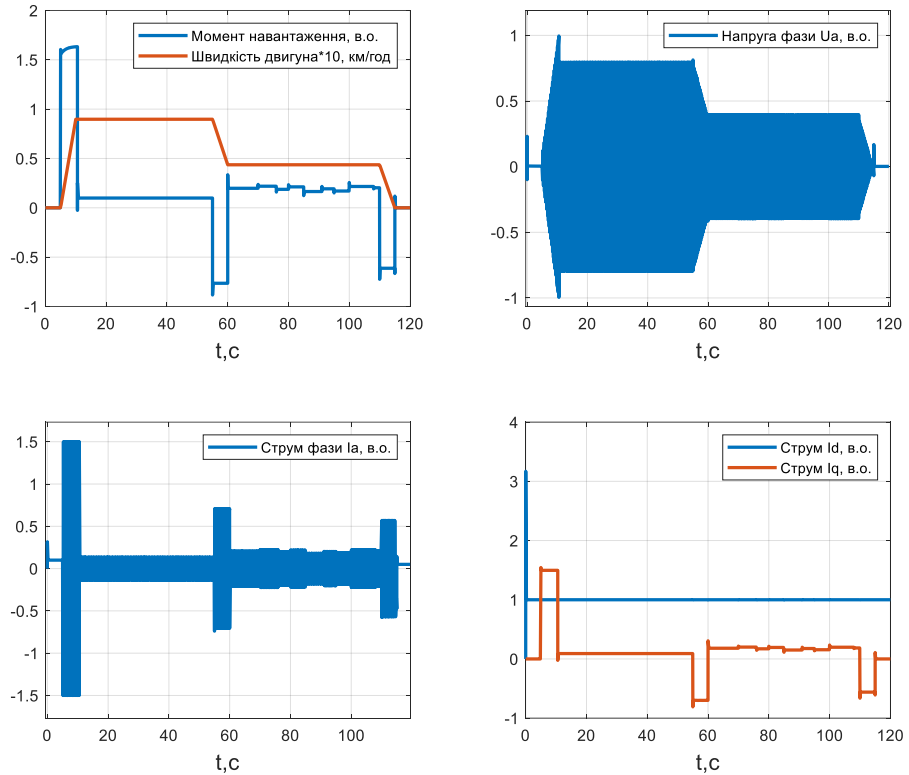
Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів САК АД отримані в результаті симуляції режиму оранки трактора

Режим фрезерування без оптимізації

Фрезерування ґрунту – це один із основних способів обробки полів, що проводиться за допомогою спеціальних фрез. Вони забезпечують інтенсивне розпушування та подальше перемішування родючого шару. Для симуляції режиму, спочатку імітується розгін трактору на шосе, де він набирає 90% максимальної швидкості, далі трактор скидає швидкість для заїзду на поле і початку операції фрезерування відповідно графікам з літератури [38]. Максимальна швидкість двигуна досягає 39 км/год.

В час 0 с. було накинута завдання потокозчеплення ротора. З 5 до 15 с. швидкість трактора досягає 90% максимальної швидкості. В цей же момент подається навантаження близько 10% від номінального, з подальшим відхиленням в 5% під час їзди по шосе. В проміжку часу від 45 до 60 с. швидкість трактору знижується до 5 км/год, перед тим як заїхати на поле і

почати режим фрезерування. Під час даного режиму швидкість коливається в межах 10-50% від максимального значення. З 80 с. момент навантаження на ВВП збільшується від 10% до 30 % від номінального, максимальне значення досягає в 110 с. В час 110 с. починається скидання швидкості та навантаження. Результати моделювання обробки показані на рисунках 4.3.- 4.4.



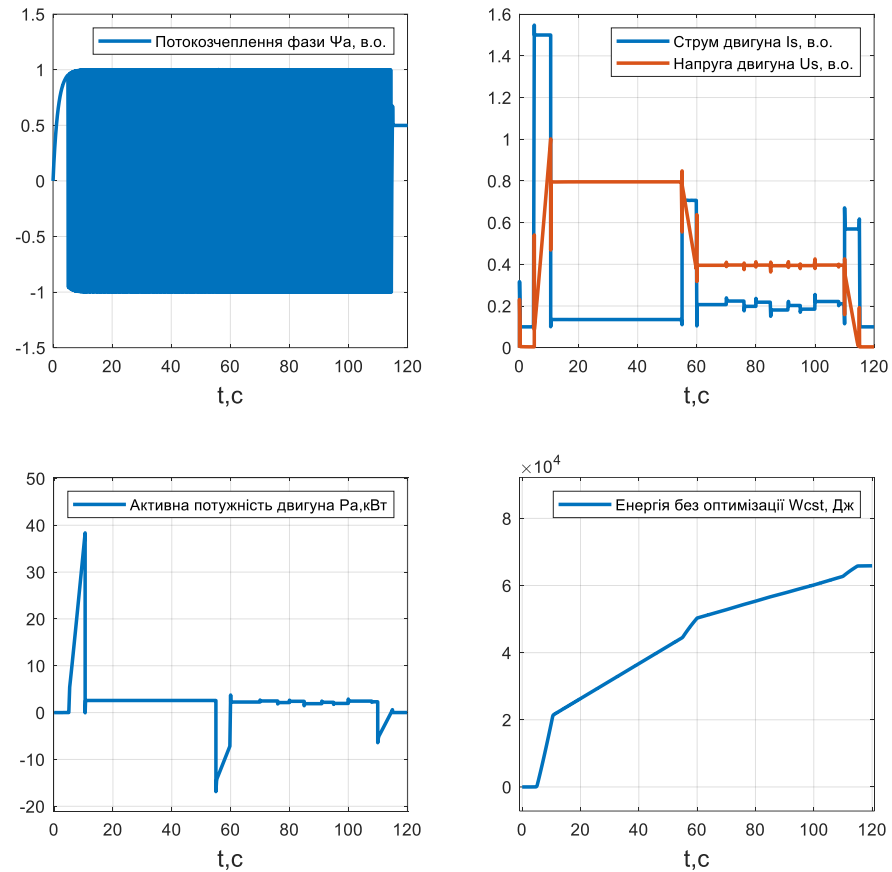


Рисунок 4.3 – Графіки перехідних процесів САК АД отримані в результаті симуляції режиму фрезерування трактора без оптимізації

Режим фрезерування з оптимізацією

Для дослідження мінімізації втрат потужності, послідовність вище буде виконано двічі, з оптимізацією та без.

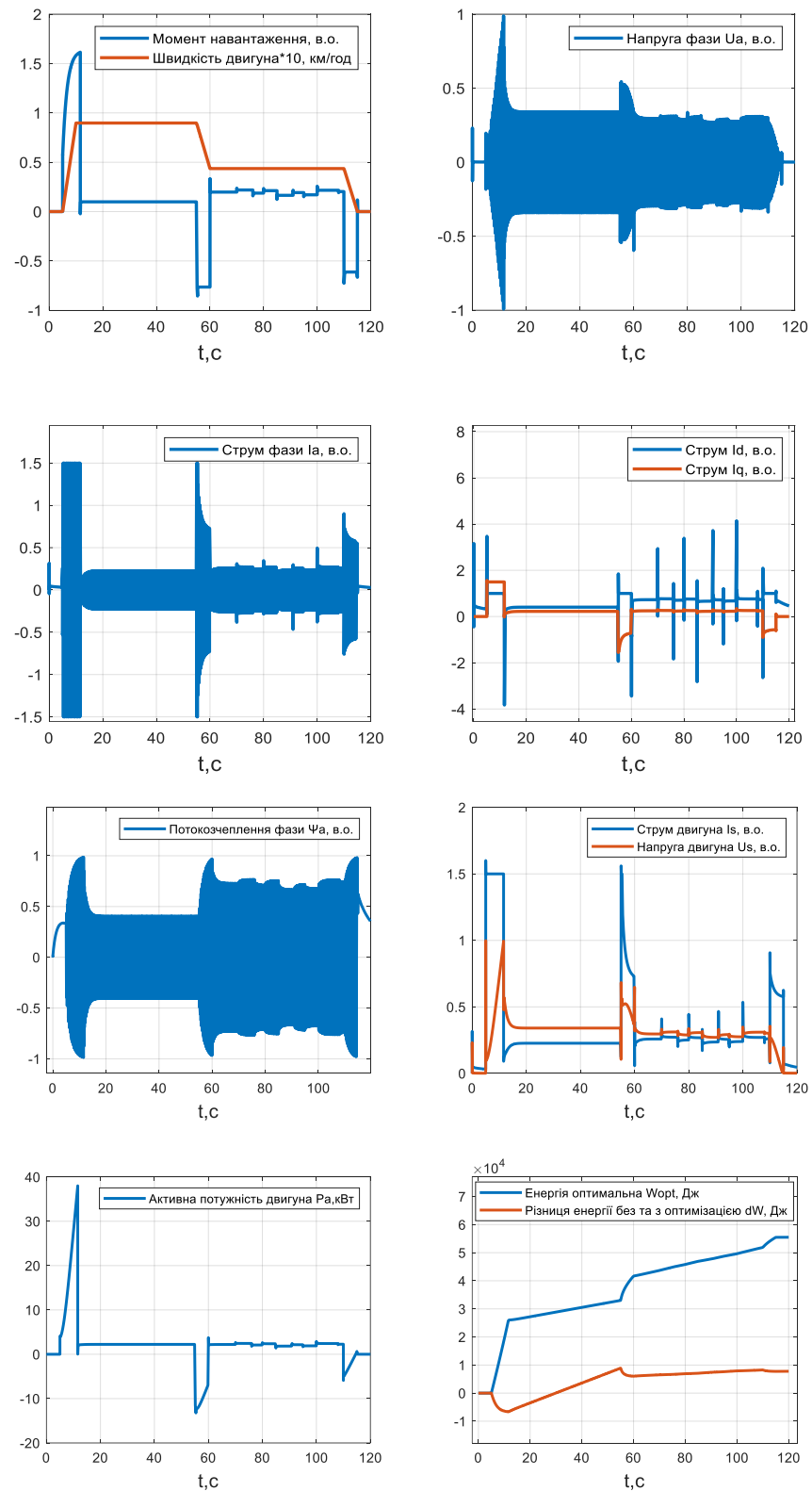


Рисунок 4.4 – Графіки перехідних процесів САК АД отримані в результаті симуляції режиму фрезерування трактора з оптимізацією

Після моделювання режиму фрезерування трактора отримано графіки перехідних процесів рис.4.3-4.4 фазних напруги, струму та потокозчеплення U_a , I_a , Ψ_a , струми статора I_d та I_q , напруги, струму двигуна U_s , I_s , активної та електромеханічної потужності P_a , P_{em} , а також графіки енергії. Графіки було подані у відносних одиницях.

В моментах розгону та гальмування трактору момент навантаження не перевищує 1.3 від номінальної, що є в нормі. В режимі без оптимізації рис 4.3, на графіку енергії, видно, що втрати більші, ніж на графіках енергії з оптимізацією рис. 4.4. Також на рис.4.4 додатково було виведено різницю енергії з та без оптимізації. З чого можна зробити висновок, що оптимізація втрат значно покращує характеристики САК АД.

Висновки до розділу 4:

1. Побудовано модель САК АД трактора в середовищі MATLAB/SIMULINK на базі функціональної схеми на рис.3.1.
2. В представленій моделі на рис.4.1 промодельовані два режими роботи трактору: режим оранки та фрезерування землі. Без та з оптимізацією втрат потужності в АД.
3. В результаті отриманих графіків перехідних процесів, видно, що після зміни швидкості та навантаження процеси в системі досить швидко затухають. А значення навантаження двигуна не перевищує 1.6 від номінального навантаження, що значно менше від перевантажувальної здатності 2.5.

РОЗДІЛ 5 ПІДГОТОВКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Маркетинговий план і маркетингова стратегія проекту

Метою даного розділу є впровадження безпілотного електротрактора в сільськогосподарській промисловості. Для цього буде проведено детальний аналіз стартап проекту, щоб визначити його принципові перспективності на ринку[39].

Спершу необхідно описати саму ідею стартапу:

Таблиця 5.1 – Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення безпілотних електротракторів	Аграрна промисловість	•Підвищення точності в землеробстві. •Надає достовірні дані для фермера •Сприяє більшій тривалості роботи на фермі •Сприяє ефективному управлінню землею, збору додаткової інформації •Захист від небезпеки фермера

Далі проведемо аналіз потенційних економічних та технічних переваг стартапу. Для цього:

- Визначимо перелік техніко-економічних властивостей;
- Визначимо основних конкурентів або товарів;
- Порівняємо показники.

Таблиця 5.2 – Визначення слабких, нейтральних та сильних сторін проекту

№ п/п	Технічно- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторон а)	N (нейтра льна сторон а)	S (сильна сторон а)
		Мій проект	Case IH	Fendt	John Deere			
1.	Форма виконання	Безпіл отний електр отракт ор	Тракто р з систем ою Guide Conne ct	Тракто р з систем ою Guide Conne ct	Тракто р з глобал ьним позиці онуван ням			+
2.	Собівартіс ть	Серед ня	Висок а	Висок а	Висок а	+		
2.	Можливіст ь придбати на ринку	Так	Ні	Ні	Ні			+

Даний список слабкий сильних та нейтральних сторін дає краще зрозуміти конкурентоспроможність продукту.

5.2 Технологічний аудит ідеї стартапу

Необхідно провести аудит технології для реалізації ідеї.

Для цього визначимо:

- технологію виготовлення товару;
- індивідуальність технології;
- доступність технології.

Таблиця 5.3 – Технологічне виконання ідеї проекту

№ п/п	Ідея стартапу	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Створення товару безпілотного електротрактору на асинхронному двигуні з векторним керуванням	Створення алгоритму управління системою	Наявна	Доступна
	3	Виготовлення виробу	Наявна	Доступна
		Додавання системи для безпілотного керування	Наявна	Доступна
Обрана технологія виготовлення продукту є успішною, так як всі технології є наявними і доступними на ринку.				

5.3 Аналіз ринкових можливостей впровадження проекту

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість основних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продажу, грн/ум.од	1 200 000
3	Динаміка наявного ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Необхідні особливі дозволи для використання технології
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Так
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	50%

Для даного аналізу необхідно визначити ринкові можливості, що використовується для початку стартапу. Також важливо зазначити загрози, що можуть перешкоджати реалізації проекту.

Останній показник прирівнюється до відсотку на банківське вкладення. Даний ринок є привабливим для вкладень, так як має хорошу рентабельність та показники динаміки ринку.

Далі визначаються потенційні покупці виробу.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба ринку	Цільова аудиторія ринку	Відмінності у поведінці різних груп клієнтів	Вимоги споживачів до виробу
1	Ефективність роботи трактора, з мінімальним втручанням робітників	Агрофірми та звичайні фермери	Різниця в доступності для різних ферм.	Надійність, доступність, технічна підтримка.

Так як аудиторія ринку вже визначена, необхідно провести аналіз ринку.

Таблиця 5.6 – Фактори можливості стартапу

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на безпілотна трактори	З настанням продовольчої кризи необхідна більш енергоефективна техніка.	Збільшення продажів
2	Більш конкурентна доступність в порівнянні з іншими виробниками	Так, як всі інші конкуренти знаходяться в інших країнах і старту продажів виробу ще не було, є можливість стати головним конкурентом на ринку.	Збільшення продажів і модернізація винаходу, щоб не втратити лідерство на ринку.

Таблиця 5.7 – Фактори загроз стартапу

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Заборона безпілотних виробів в агропромисловості	В деяких країнах є заборона в використанні безпілотних транспортів, так як це є небезпечним	Впровадження інших технологій, для модернізації електротрактора
2	Конкурентоспромо жність	Поява нових конкурентів	Впровадження інших технологій, щоб зробити винахід більш унікальним
3	Некоректна робота безпілотного трактора	Деякі датчики виходять з ладу	Додаткове випробовування
4	Нещасні випадки	Даний транспорт потребує багато часу на тестування, так як іноді система може виходити з ладу і можуть бути тяжкі наслідки	Додаткове випробовування

Далі необхідно буде визначити основні риси конкуренції на ринку
табл.5.8:

- тип;
- рівень конкурентної боротьби;
- галузеву ознаку;
- конкуренцію за видами товарів;
- інтенсивність ринку.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкурентів на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1.Тип-олігополія	Домінує мала кількість конкурентів	Врахувати технології і ціни конкурентів
2.Рівень конкурентної боротьби - міжнародний	Існуючі компанії не в межах країни	Лідер на ринку країни
2. Галузева ознака - внутрішньогалузева	Даний транспортний засіб є вузько направленим.	Участь в галузевих конференціях і виставках, організація аудитів до потенційних клієнтів.
4.Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Види виробів схожі	Врахувати досвід конкурентів, та випустити більш якісний продукт на ринок
5.Характер конкурентних переваг - нецінова	Так як такого трактору досі немає на ринку, для того щоб бути конкурентоспроможним необхідно пришвидшити створення та тестування виробу	Пришвидшити створення та тестування виробу
6.Інтенсивність-марочна	Є великі лідери на ринку	Організувати більш доступну вартість і транспортування виробу

Таблиця 5.9 – Аналіз конкурентів в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники в галузі	Клієнти	Подібні товари
Складові	Надати перелік конкурентів	Бар'єри входу на ринок тракторів	Фактори сили постачальників	Фактори сили споживачів	Фактори загроз у замінників
Висновки:	Case IH Fendt John Deere	Є реальні можливості входу на ринок, так як даного продукту ще немає у виробництві	Постачальники дуже впливають на ціну, так як ринок зараз не є стабільним	Кінцевий виріб залежить від того, які вимоги споживачів необхідно задовільнити	Використати більш нові технології, оснастити додатковими датчиками

Можна зробити висновок, що є можливість стати лідером з продажів безпілотних тракторів на ринку, тільки для цього необхідно пришвидшити створення і тестування транспорту. Трактор має бути досить надійним і не викликати сумнівів у споживачів.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор	Обґрунтування (наведення чинників, які роблять фактор конкурентних проектів значущим)
1	Розробка проекту в короткий термін	Це дозволить скоріше за конкурентів представити вже готовий продукт та стати лідером в продажі на ринку
2	Надійність продукту	Необхідно, щоб продажі були вдалими, скоротити ризики експлуатації

Таблиця 5.11 –Порівняння сильних та слабких сторін безпілотного трактору

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з іншими конкурентами						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність виробу	18				+			
2	Швидкий вихід на ринок	20							+
3	Повністю безпілотна технологія	20						+	

Перелік ринкових можливостей і загроз є основою аналізу факторів загроз і можливостей ринкового середовища. На відміну від ринкових загроз і ринкових можливостей, які є наслідками факторних впливів, вони ще не реалізовані на ринку з певною ймовірністю реалізації. Наприклад: зменшення доходу потенційного споживача є фактором загрози, згідно з яким можна передбачити, що важливість цінового фактору у виборі продукту зросте, що призведе до цінової конкуренції.

Таблиця 5.12 –SWOT- аналіз проекту

Сильні сторони: Низька вартість, скоріший вихід на ринок, більш нові і точні технології	Слабкі сторони: відомі бренди, яким споживачі більше довіряють
Можливості: Ще немає в продажі безпілотного трактору	Загрози: конкуренція, невідповідність прибутку

Для любого стартапу необхідно мати альтернативні ідеї для впровадження продукту, щоб мати варіації розвитку при збільшенні виробництва чи невдалих продажах. Дані альтернативи представленні в таблиці 5.13. Проаналізувавши таблиця 5.13, більш доцільно буде розробити лінійку виробу з різними габаритами то потужністю. Далі необхідно описати цільову групу.

Таблиця 5.13 –Альтернативи ринкового впровадження стартапу

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Імовірність отримання ресурсів	Строки реалізації виробу
1	Створення нової технології безпроводного обладнання	80%	24 місяці
2	Створення виробу різної потужності	75%	12 місяців

Таблиця 5.14 –Вибір цільової групи потенційних споживачів

№ п/п	Опис цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти виріб	Орієнтовний попит в межах цільового сегменту	Інтенсивність конкуренції в групі	Простота входу в ринок тракторів
1	Великі агропідприємства	Так, як ідею винаходу було представлено ще в 19XX роках, даний винахід давно цікавить потенційних споживачів.	Актуальність впровадження енергоефективного обладнання в агропромисловість, збільшення виробленої продукції і мінімізація робочих на полі.	Існують 3 основних лідера на ринку.	Так як галузь ще вільна, увійти до ринку досить просто.
2	Фермери	Більш скептично відносяться до таких виробів. Ціна є менш доступною чим в звичайних тракторів.			
Які цільові групи обрано: Великі агропідприємства					

Таблиця 5.15 –Визначення основної стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернативна стратегія розвитку проекту	Стратегія охоплення маркетингу	Основні конкурентоспро можні позиції відповідно до альтернативи	Основна стратегія розвитку
1	Стратегія спеціалізації, продукт використовуєть ся тільки в вузьких сферах.	Стратегія лідерства.	Продукт повністю відповідає заявленим вимогам.	Проект може конкурувати з іншими лідерами, за рахунок своєї технології та швидкого виходу на ринок агропромисловості.

Таблиця 5.16 –Визначення базової стратегії конкурентоспроможної поведінки

№ п/п	Чи є стартап «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде проект шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати характеристи ки товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Існують вже такі винаходи, та вони ще на етапі тестування	Пошук нових споживачів можливий якщо проводити аудити на агропромисловостях	Ні	Для досягнення успіху стартап- проекту обрана стратегія лідера

Таблиця 5.17 –Вибір стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільових споживачів	Базова стратегія розвитку	Основні конкурентоспромож ні позиції цього проекту	Вибір асоціацій, що мають сформувати цілісну позицію власного проекту
1	Виріб повинен відповідати заявленим вимогам.	Стратегія наслідуван ня лідера,	Необхідно швидше випустити продукт на ринок. Необхідно сформувати доступну ціну	Безпека, енергоефективність, якість.

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для початку необхідно сформулювати основну концепцію стартап-проекту.

Таблиця 5.18 –Вибір основних переваг концепції товару

№ п/п	Потреба	Вигода	Ключові переваги перед іншими виробниками
1	Створення енергоефективн ого безпілотного трактору	Даний товар зменшить кількість робочих на полі, забезпечить більшу кількість виробленої продукції	Ціна Першопрохідність Мінімізовані втрати

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Безпілотний трактор дозволить фермерам обробляти більшу кількість землі в скоріші терміни і з меншою кількістю залучених людей		
II. Товар за реалізацією у виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Асинхронний двигун	-	-
	2. Пряме векторне керування		
	2. Мінімізатор втрат потужності		
	Якість: все відповідає поставленим вимогам до електроприводу		
	Пакування не потрібне		
	Марка: логотип компанії		
III. Товар за підкріпленням	До продажу Гарантія на товар		
	Після продажу Технічне обслуговування		
За рахунок програм захисту на авторське право потенційний продукт буде захищено від копіювання. Також всі співробітники підписуватимуть відповідний документ про нерозголошення даних проекту, в результаті невиконання з подальшою компенсацією.			

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення вартості

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін товарів-аналоги	Рівень доходів споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	40000\$	30000\$	-	25000-30000\$

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Особливості закупівельної поведінки цільових споживачів	Можливості збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту виробу
1	Закупівля виробу, використання, у разі необхідності користування технічною підтримкою	Продаж Модернізація Підтримка Гарантія	Робота з великими агро-промисловостями	Створення власного відділу продажів з залученням маркетологів

Таблиця 5.22 – Концепція ринкових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових споживачів	Канали комунікацій, для цільових клієнтів	Ключові позиції, для позиціонування	Завдання реклами	Концепція рекламного звернення
1	Купівля на пряму в компанії виробнику	Створення веб-сторінок та соціальних мереж для комунікації з клієнтами	Енергоефективність, автономність, актуальність	Створити список потенційних клієнтів і фірм	Створення презентацій та роликів.

Висновки до розділу 5:

1. В даному розділі описано основну ідею стартап-проекту, в порівнянні з іншими конкурентами.
2. Оцінено ринок входу для безпілотного трактору. Він є привабливим, так як вирішує багато сьогоденних проблем.
3. Описано основні ризики і можливості проекту, його сильні сторони в порівнянні з конкурентами. Сильною стороною цієї ідеї є мінімізація втрат потужності.
4. Розроблено маркетингову стратегію, за основу взято такі позиції, як енергоефективність, автономність, актуальність.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертації було зроблено синтез та досліджено систему автоматичного керування асинхронним двигуном безпілотного трактора з мінімізатором втрат потужності двигуна. Під час виконання дисертації було отримано наступні висновки та результати:

1. Проведено аналітичний огляд існуючих тягових систем безпілотних тракторів, пояснена актуальність використання ІОТ в аграрній промисловості. Поставлено вимога до електроприводу;

2. Наведено математичний опис об'єкта керування. Розраховано та підібрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 4A180S4Y3, а також акумуляторна батарея та перетворювач частоти до нього.

3. Побудовано функціональну схему САК АД з мінімізатором втрат потужності, зроблено синтез регуляторів струму, потокозчеплення ротора та швидкості.

4. За отриманими рівняннями побудована модель системи в середовищі MatLab/Simulink та досліджено статичні і динамічні режими САК АД безпілотного трактора в двох режимах роботи трактора: режиму оранки без мінімізації втрат та режиму фрезерування землі з мінімізатором втрат потужності. За результатами керування видно, що на навантаженнях менше половини від номіналу, мінімізатор ефективно зменшує втрати в двигуні.

5. В завершенні магістерської роботи було розроблено стартап-проект, після аналізу ринку пояснена перспективність і переваги ідеї безпілотного трактору.

Проаналізувавши результати роботи можна прийти до висновку, що всі поставлені задачі було успішно виконано.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ефективне використання землі України. Національний Промисловий Портал. URL: <https://uprom.info/news/agro/pri-bilsh-efektivnomu-vikoristannnyu-zemli-ukrayina-mozhe-progoduvati-shostu-chastinu-naselennya-planeti/> (дата звернення: 23.10.2022).
2. Staff W. Autonomous tractor is outstanding in its field. WIRED. URL: <https://www.wired.com/2011/09/autonomous-tractor-is-outstanding-in-its-field/> (date of access: 23.10.2022).
3. Driverless tractor. Popular mechanics. 1940. Т. 74, № 1. С. 40. URL: https://books.google.com.ua/books?id=cdkDAAAAMBAJ&q=driverless+tractor&pg=PA7&redir_esc=y#v=snippet&q=driverless%20tractor&f=false (дата звернення: 24.10.2022).
4. Definition of tractor | dictionary.com. www.dictionary.com. URL: <https://www.dictionary.com/browse/tractor> (дата звернення: 23.10.2022).
5. Revolutionary Driverless Tractor Designed To Replace Big 4-WDs. FARM SHOW Magazine - Farming, Ranching & Agriculture News URL: https://www.farmshow.com/view_articles.php?a_id=1458t (дата звернення: 24.10.2022).
6. Murray C. Deere Takes Next Step Toward Driverless Tractor. designnews.com. URL: <https://www.designnews.com/automotive/deere-takes-next-step-toward-driverless-tractor> (дата звернення: 26.10.2022).
7. Pates M. Driverless tractor. Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20130312082355/http://www.agweek.com/event/article/id/19649/> (дата звернення: 27.10.2022).
8. Fendt Guideconnect: Two Tractors, One Driver | Farms.com. Farms.com – Latest agriculture information, farming news, commentary, weather, auctions, markets & new products portal. URL: <https://www.farms.com/news/fendt-guideconnect-two-tractors-one-driver-64275.aspx> (дата звернення: 28.10.2022).

9. Hest D. New driverless tractor, grain cart systems coming this year. Farm Progress. URL: <https://www.farmprogress.com/precision-guidance/new-driverless-tractor-grain-cart-systems-coming-year> (дата звернення: 26.10.2022).

10. Case IH premieres concept vehicle at farm progress show. www.caseih.com. URL: <https://www.caseih.com/apac/en-in/news/pages/2016-case-ih-premieres-concept-vehicle-at-farm-progress-show.aspx> (дата звернення: 27.10.2022).

11. Rettore de Araujo Zanella A., da Silva E., Pessoa Albini L. C. Security challenges to smart agriculture: current state, key issues, and future directions. Array. 2020. Т. 8. С. 100048. URL: <https://doi.org/10.1016/j.array.2020.100048> (дата звернення: 27.10.2022).

12. Zhao K., Ge L. A survey on the internet of things security. 2013 ninth international conference on computational intelligence and security. 2013. С. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6746513> (дата звернення: 28.10.2022).

13. Agrawal M., Das L. Detection of node capture attack in wireless sensor networks. IEEE systems journal. 2017. Т. 13, № 1. С. 238–247. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8444374> (дата звернення: 28.10.2022).

14. Lin J., Yu W., Zhang N. Zhao A survey on internet of things: architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications. IEEE internet of things journal. 2018. Т. 4, № 5. С. 1125–1142. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7879243> (дата звернення: 28.10.2022).

15. Шарипов В., Городецкий К., Маринкин А. Устройство тракторов. МГТУ “МАМИ”, 2007. 320 с. URL: <https://staff.tiame.uz/storage/users/291/books/hnDqTaMC8EJEhebFnX1HQflfTiFoqnBBJhomg9Lt.pdf> (дата звернення: 28.10.2022).

16. Wildi T. Electrical machines, drives, and power systems. 2-ге вид. Englewood Cliffs, N.J : Prentice Hall, 1991. 727 с. URL: https://www.academia.edu/84155446/Electrical_Machines_Drives_and_Power_Systems_T_Wildi (дата звернення: 28.10.2022).

17. Rashidi, F. Sensorless speed control of induction motor derives using robust and adaptive neuro-fuzzy based intelligent controller. African journal of pharmacy and pharmacology. 2012. Т. 6, № 29. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1490145> (дата звернення: 28.10.2022).

18. Negm M. Torque optimized speed control of a 3-phase induction motor. CrossRef listing of deleted dois. 2000. Т. 1. С. 67–72. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/900033> (дата звернення: 29.10.2022).

19. Ali S, Rahul B.-t., Wei K. Single phase induction motor drives for low power applications. I-manager's journal on electrical engineering. 2012. Т. 5, № 3. С. 23–30. URL: https://www.researchgate.net/publication/224072390_Single_phase_induction_motor_drives_-_A_literature_survey (дата звернення: 31.10.2022).

20. Alagarsamy S. Microcontroller based speed control of induction motor using wireless technology. academia.edu. 2013. С. 1–5. URL: https://www.academia.edu/7941277/Microcontroller_Based_Speed_Control_of_Induction_Motor_using_Wireless_Technology (дата звернення: 01.11.2022).

21. Kester C., Griepentrog H. W., Hörner R. A survey of future farm automation. Automation (MED 2008), м. Lerida, Spain, 1–2 черв. 2013 р. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/257269168_A_survey_of_future_farm_automation_-_A_descriptive_analysis_of_survey_responses (дата звернення: 02.11.2022).

22. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. Oxford : Oxford University Press, 1998. 729 с. URL: <https://global.oup.com/academic/product/sensorless-vector-and-direct-torque-control-9780198564652?cc=ua&lang=en&>; (дата звернення: 01.11.2022).

23. Pryymak B. I. Improvement of energy indicators of vector-controlled stand-alone induction generator. Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalanoi

akademii nauk Ukraini. 2020. Т. 2020, № 55. С. 78–84. URL: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.078> (дата звернення: 01.11.2022).

24. Мінітрактор ДТЗ 5404 4х4 40 к.с. ДТЗ. URL: <https://dtz.ua/tractors/dtz/dtz-5404> (дата звернення: 02.11.2022).

25. Мельник О., Пересада С. Визначення потужності тягового асинхронного електропривода міського електробуса. jour.fea. С. 263. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/download/96138/91527> (дата звернення: 06.11.2022).

26. Кравчик А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 1982. 504 с. URL: <https://djuv.online/file/zqoJCwuu5KO8I> (дата звернення: 07.11.2022).

27. M. Eshani, Y. Gao, A. Emadi. Fundamentals, Theory, and Design. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 2009. С. 433–458. URL: <https://doi.org/10.1201/9781420054002.ch14> (дата звернення: 08.11.2022).

28. EPA Nonregulatory Nonroad Duty Cycles | US EPA. US EPA. URL: <https://www.epa.gov/moves/epa-nonregulatory-nonroad-duty-cycles> (дата звернення: 14.11.2022).

29. Розрахунок та вибір основних елементів перетворювача. lektsii.org. URL: <https://lektsii.org/14-78491.html> (дата звернення: 15.11.2022).

30. Vishay Semiconductors VS-HFA08TB120SR-M3. eu.mouser.com. URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Vishay-Semiconductors/VS-HFA08TB120SR-M3?qs=MLItCLRbWsxidIvcJvJcQg==> (дата звернення: 15.11.2022).

31. Приводы АББ для механизмов общего назначения. abb.com. URL: https://library.e.abb.com/public/91e2a6f06bbd4ebe89be5d1752b30b7e/ACS580_katalogi%20RU_REVJ_3AUA0000173666.pdf (дата звернення: 21.11.2022).

32. Транзистор IRGP4066D-EPBF. <https://voron.ua/>. URL: https://voron.ua/uk/catalog/031631--tranzistor_irgp4066d-epbf_ir_international_rectifier_to247_to247 (дата звернення: 15.11.2022).

33. Класифікація тракторів. budova-traktoriv. URL: https://budova-traktoriv.com.ua/Klasyfikaciia_traktoriv.html (дата звернення: 23.11.2022).

34. Pryimak B. I. Vector Control of Induction Generator with Increased Efficiency. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. 2021. T. 154, № 1. С. 49–56. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-49-56> (дата звернення: 23.11.2022).

35. Kvashnin, V.V, Babash, A.V. Control of an Electrical Vector Drive of a Mechanical Variable Masses' System. Problemele Energeticii Regionale:. 2019. T. 1, № 42. С. 13–25. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239202> (дата звернення: 18.11.2022).

36. Pryymak B., Moreno-Eguilaz J. M., Peracaula J. Neural network flux optimization using a model of losses in induction motor drives. Mathematics and Computers in Simulation. 2006. T. 71, № 4-6. С. 290–298. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.02.015> (дата звернення: 25.11.2022).

37. ACS580-01-073A-4|ABB. SmartLinks. URL: <https://new.abb.com/products/ru/3AUA0000080499/acs580-01-073a-4> (дата звернення: 30.11.2022).

38. Motor Torque Distribution Strategy for Different Tillage Modes of Agricultural Electric Tractors / Y. Yu та ін. Agriculture. 2022. T. 12, № 9. С. 1373. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091373> (дата звернення: 08.12.2022).

39. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

40. Стельмах І.В., Приймак Б.І. Безпілотні електротрактори стають сьогодні фермерських господарств [Електронний ресурс] // Міжнар. н.-т. журн. “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики”. – 2022. 3 с. У друці.

ДОДАТОК А ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

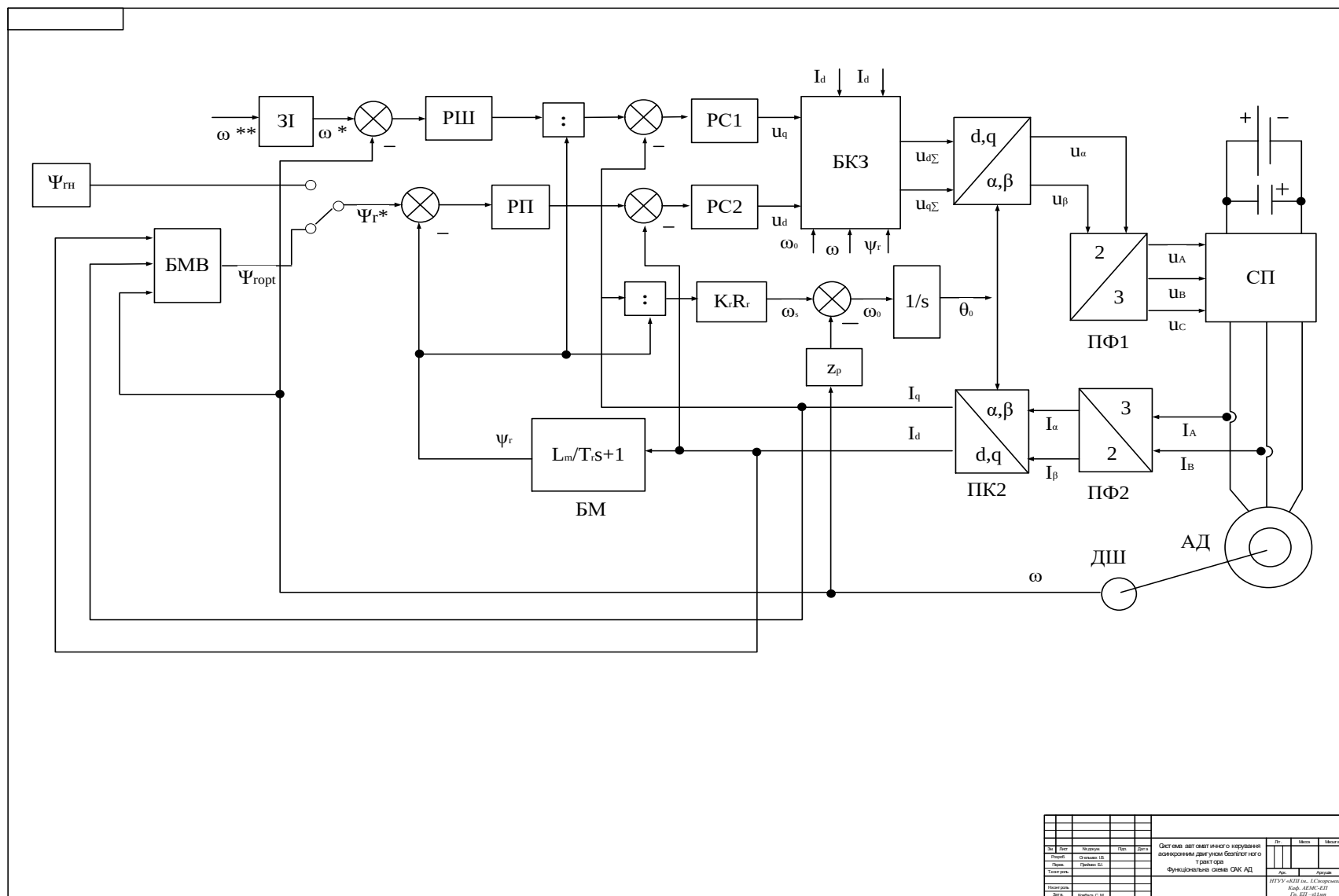


Рисунок 6.1 – Функціональна схема САК АД безпілотного трактора

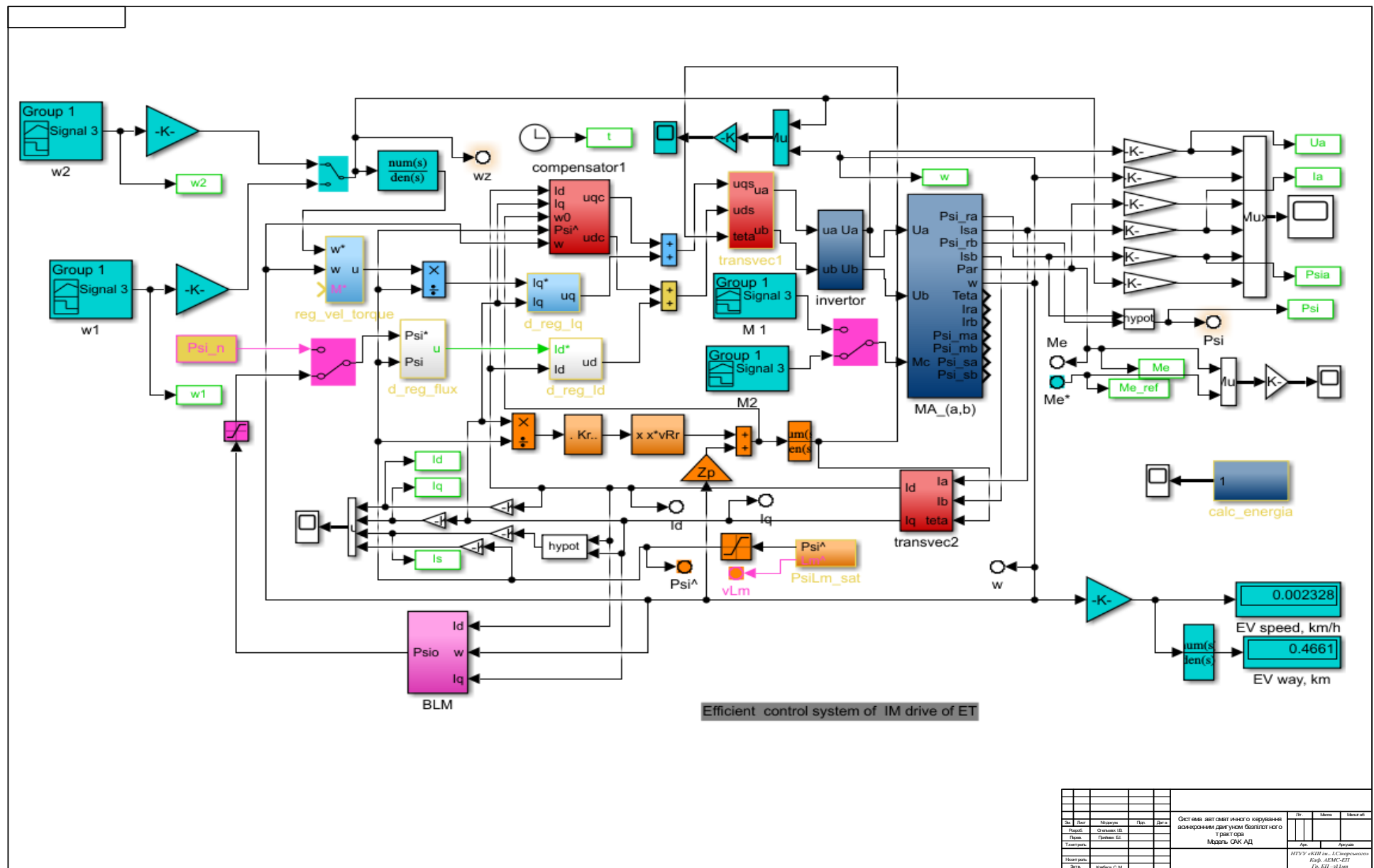


Рисунок 6.2 – Модель САК АД беспилотного трактора

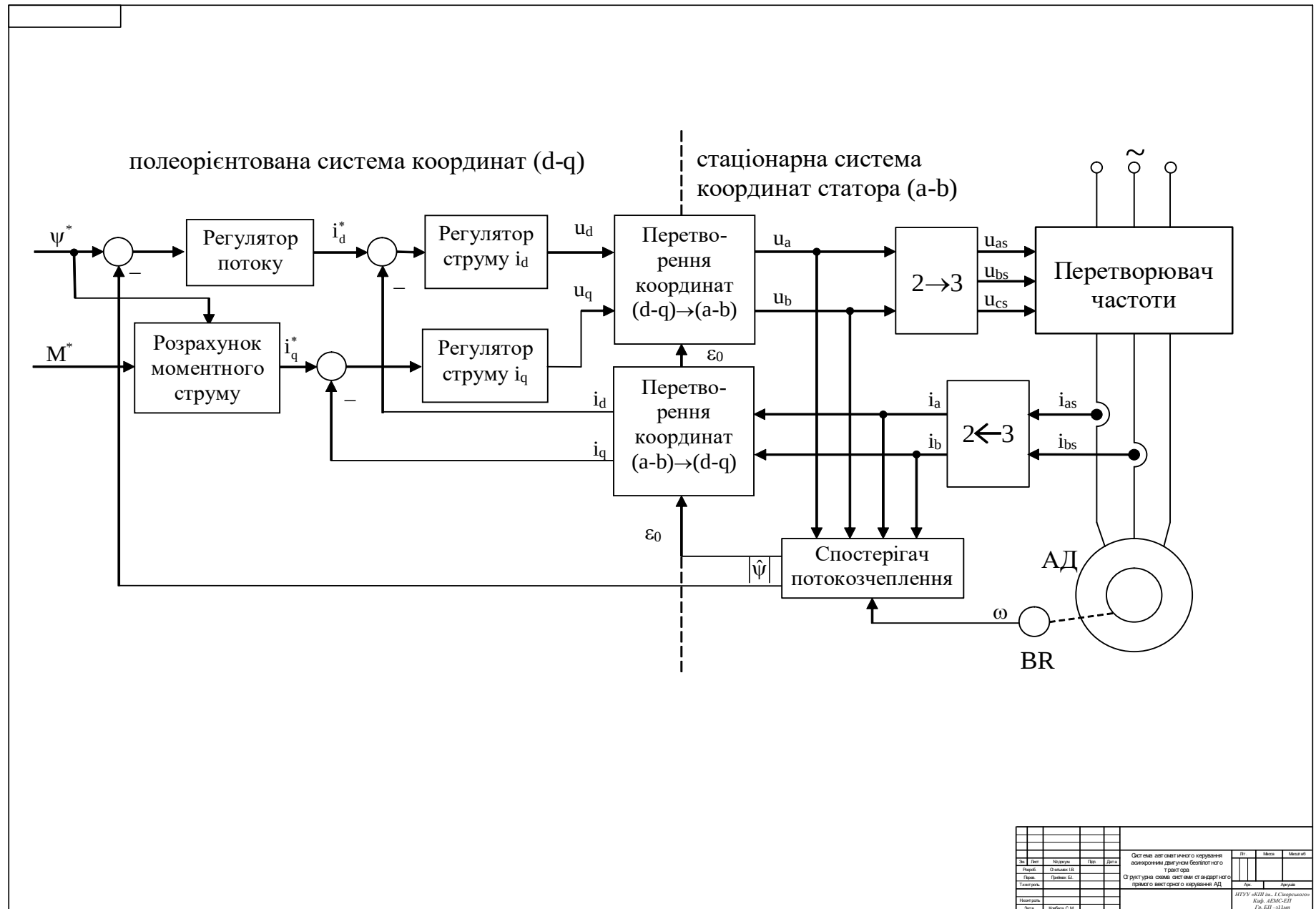


Рисунок 6.4 – Структурна схема системи стандартного прямого векторного керування АД

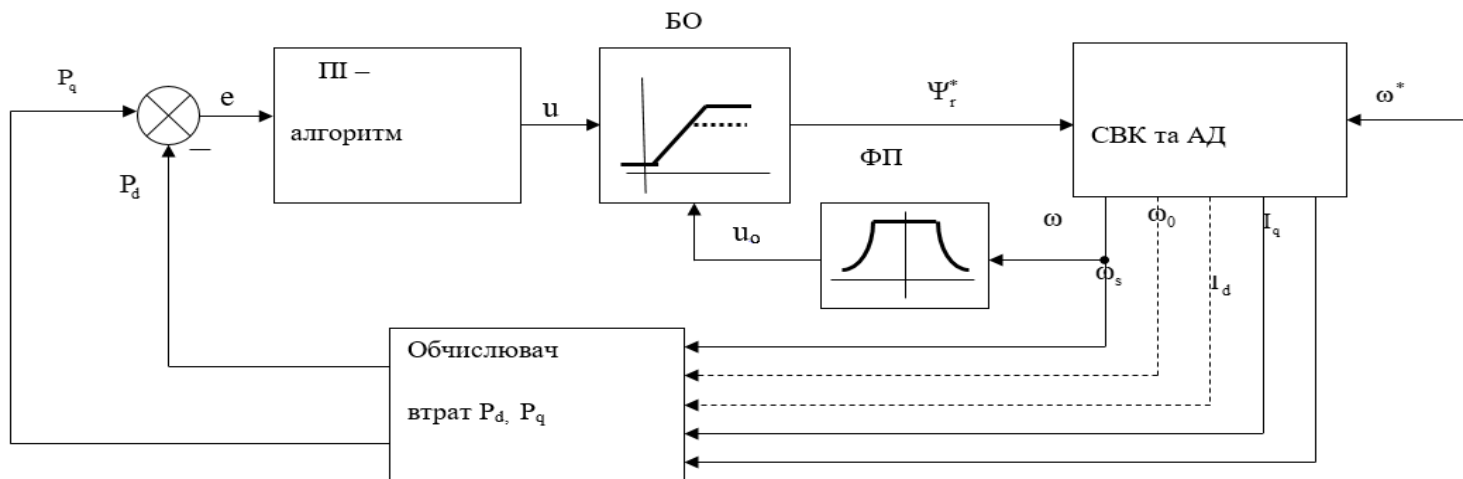
[illegible]

Рисунок 6.5 – Функціональна схема оптимізатора втрат

