

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 електроприводом робота-косарки

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕП-41мп

Константинов Ігор Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник 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 асист., Стулішенко Андрій Сергійович

(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 – 2025 р.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.4110.010.МД	Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.4110.010.МД	Пояснювальна записка	112	
3	A1	141.4110.010.МД	Габаритні розміри протопиту та кінематична схема	1	
4	A1	141.4110.010.МД	Структурно-принципова схема системи керування приводом	1	
5	A1	141.4110.010.МД	Функціональна схема САК АЕП	1	
6	A1	141.4110.010.МД	Фрагменти моделюючої програми в середовищі MATLAB/Simulink	1	
7	A1	141.4110.010.МД	Результати дослідження при роботі в першій зоні регулювання швидкості з виходом в другу зону	1	
8	A1	141.4110.010.МД	Результати дослідження при роботі на швидкостях нижче номіналу зі змінним моментом навантаження	1	

				141.4110.010.МД		
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Константинов І.С.				Лист 2	Листів
Керівн.	Приймак Б.І.					
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-41мп	
Н/контр.						
Зав.каф.	Ковбаса С.М.					
					Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки Відомість магістерської дисертації	

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Система автоматичного керування електроприводом робота-
косарки»

**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

Константинову Ігорю Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки,

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Приймак Богдан Іванович,

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

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

2. Строк подання студентом дисертації _____ 17 грудня 2025

3. Об'єкт дослідження Процеси керування автоматизованим тяговим електроприводом робота-косарки на основі асинхронного двигуна.

4. Вихідні дані Транспортна швидкість 9 км/год; робоча швидкість 6 км/год; кут ухилу 50° ; швидкість вітру 9 км/год; маса 840 кг; ширина 2.083 м; висота 1.257 м; радіус привідної зірки 0.11 м; маса привідної зірки 12 кг.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1.Провести аналітичний огляд ринку сучасних роботів-косарок. Навести їх класифікацію, сфери застосування, використовуванні двигуни для системи приводу переміщення.

2. Сформувати технічні вимоги до системи керування асинхронним електроприводом робота-косарки. 3. Розрахувати потужність двигуна, акумуляторної батареї та підібрати силові обладнання. 4. Виконати математичний опис об'єкта керування. 5. Побудувати функціональну схему системи автоматичного керування асинхронним електроприводом робота-косарки. 6. Синтезувати регулятори системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна. 7. Провести експериментальні дослідження статичних та динамічних режимів роботи системи векторного керування АД в середовищі MATLAB/Simulink. 7. Розробити стартап-проект для практичної реалізації розробленої системи керування на основі асинхронного двигуна.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів проекту*

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 8 вересня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури за темою роботи	30 вересня 2025 р.	
2	Формування технічних вимог до системи автоматичного керування (САК) асинхронним електроприводом (АЕП) робота-косарки	05 жовтня 2025 р.	

3	Розрахунок потужності двигуна, акумуляторної батареї та вибір силового обладнання	12 жовтня 2025 р.	
4	Математичний опис об'єкта керування	20 жовтня 2025 р.	
5	Побудова функціональної схеми САК АЕП робота-косарки	25 жовтня 2025 р.	
6	Написання статті на університетську студентську конференцію	03 листопада 2025 р.	
7	Синтез регуляторів системи векторного керування швидкістю АЕП робота-косарки	15 листопада 2025 р.	
8	Побудова моделі системи в середовищі MATLAB/Simulink та дослідження статичних і динамічних режимів САК АЕП робота-косарки	25 листопада 2025 р.	
9	Підготовка стартап-проекту	2 грудня 2025 р.	
10	Оформлення пояснювальної записки	12 грудня 2025 р.	

Студент

(підпис)

Ігор КОНСТАНТИНОВ

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Богдан ПРИЙМАК

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 116 сторінках, містить 6 розділів , 27 рисунків, 27 таблиць, 6 додатків графічної частини , 39 джерел.

Мета магістерської дисертації – розроблення та дослідження системи автоматичного керування тяговим асинхронним електроприводом промислового робота-косарки на основі прямого векторного керування за швидкістю, яка забезпечує відпрацювання заданих швидкісних профілів і стабільну роботу привода в умовах змінних опорів руху та роботи на схилах.

Під час виконання дисертації проведено аналітичний огляд ринку сучасних роботів-косарок та наведено їх класифікацію; сформовано технічні вимоги до системи керування електроприводом; виконано розрахунок потужності двигуна й акумуляторної батареї; розроблено математичний опис об'єкта керування та побудовано функціональну схему системи автоматичного керування; синтезовано регулятори системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна; проведено моделювання статичних і динамічних режимів у середовищі MATLAB/Simulink з урахуванням характерних експлуатаційних збурень (ухили, зчеплення гусениць із ґрунтом, додатковий опір під час косіння); розроблено стартап-проект.

РОБОТ-КОСАРКА, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ, П-РЕГУЛЯТОРИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ.

					14.1.4.110.010.МД			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Константинов І.С.			Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Приймак Б.І.					7	
Н. Контр.						НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41мп		
Затверд.		Ковбаса С.М.						

SUMMARY

The master's thesis consists of 116 pages, contains 6 chapters, 27 figures, 27 tables, 6 appendices of graphic material, and 39 sources.

The purpose of the master's thesis is to develop and study an automatic control system for the traction induction electric drive of an industrial robotic mower based on indirect field-oriented speed control, which ensures tracking of predefined speed profiles and stable drive operation under varying motion resistances and while operating on slopes.

During the thesis work, an analytical review of the market of modern robotic mowers was carried out and their classification was presented; technical requirements for the electric drive control system were formulated; the power of the motor and the battery pack was calculated; a mathematical description of the controlled plant was developed and a functional block diagram of the automatic control system was built; controllers for the vector speed control system of the induction motor were synthesized; simulations of steady-state and dynamic operating modes were performed in MATLAB/Simulink taking into account typical operating disturbances (slopes, track-ground traction conditions, additional resistance during mowing); and a startup project was developed.

ROBOTIC MOWER, TRACTION ELECTRIC DRIVE, INDUCTION MOTOR, VECTOR CONTROL, SPEED CONTROL, PI CONTROLLERS, MATHEMATICAL MODELING, TECHNOLOGICAL LOAD.

					<i>14.1.4.110.010.MД</i>			
	<i>Letter</i>	<i>Nº of doc</i>	<i>Sing.</i>	<i>Date</i>				
<i>Devel.</i>	<i>I. Konstantynov</i>				Automatic control system for electric drive of robotic mower Summary	<i>L</i>	<i>Page</i>	<i>Pages</i>
<i>Checked</i>	<i>B. Pryymak</i>					8		
<i>N. Contr.</i>						<i>NTUU "KPI them Igor Sikorsky", FEA, dep. ESA-ED, EP-41mp</i>		
<i>Approvad.</i>	<i>S. Kovbasa</i>							

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	14
1.1 Історичний розвиток та еволюція.....	14
1.2 Класифікація роботів-косарок	15
1.3 Системи навігації та орієнтації.....	22
1.4 Датчики роботів-косарок.....	25
1.5 Алгоритми руху та планування маршруту.....	28
1.6 Акумулятори.....	31
1.7 Електродвигуни в роботах-косарках.....	32
1.8 Порівняльний аналіз технічних характеристик	34
1.9 Сфери застосування	36
1.10 Вимоги до ЕП	38
2 ВИБІР ДВИГУНА ТА АКАМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ	40
2.1 Розрахунок та підбір двигуна	41
2.2 Розрахунок сумарного моменту інерції робота косарки.....	54
2.3 Розрахунок номінальних параметрів двигуна.....	55
2.4 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	56
2.5 Спрощений розрахунок перетворювача	58
2.6 Розрахунок акумуляторної батареї.....	61
3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА САК АД	64
3.1 Математичний опис асинхронного двигуна.....	64
3.2 Математичний опис інвертора.....	67
3.3 Розробка функціональної схеми.....	69

4	СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ПРИВODНОГО ДВИГУНА РОБОТА-КОСАРКИ ..	73
4.1	Синтез регуляторів струму статора I_d та I_q	73
4.2	Синтез регулятора швидкості	77
4.3	Синтез регулятора потокозчеплення	79
5	ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АЕП РОБОТА-КОСАРКИ.....	82
5.1	Дослідження при роботі в першій зоні керування швидкістю з виходом в другу зону	82
5.2	Дослідження роботи приводу на швидкостях нижче номіналу при зміні моментів навантаження	88
6	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	94
6.1	Опис ідеї проєкту	94
6.2	Технологічний аудит ідеї проєкту	96
6.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	97
6.4	Розроблення ринкової стратегії стартап-проєкту	104
6.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	105
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	110
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	112
	ДОДАТОК А.....	117
	ДОДАТОК Б.....	118
	ДОДАТОК В.....	119
	ДОДАТОК Г.....	120
	ДОДАТОК Д.....	121
	ДОДАТОК Е.....	122

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток робототехнічних засобів для виконання технологічних операцій у складних та небезпечних умовах є одним із пріоритетних напрямів сучасної інженерії. Окреме місце займають мобільні роботи для догляду за територіями та косіння рослинності на схилах, узбіччях, дамбах і промислових об'єктах, де ручна праця пов'язана з підвищеним ризиком, а вимоги до надійності й керованості техніки є критичними. Для робота-косарки, який працює на нерівному рельєфі та під значними змінними навантаженнями, визначальними стають здатність тягового привода стабільно підтримувати швидкість руху, формувати необхідний момент у перехідних режимах, забезпечувати безпечне гальмування та маневрування, а також працювати в широкому діапазоні швидкостей без втрати керованості.

Високі вимоги до тягових характеристик мобільної платформи ускладнюються тим, що під час косіння опір руху має нерівномірний характер і залежить від щільності рослинності, кута схилу, типу ґрунту, стану гусеничного рушія та режиму руху. В таких умовах ефективним рішенням є застосування частотно-регульованого електропривода з векторним керуванням, який забезпечує швидкодію, точність і можливість незалежного керування електромагнітним моментом та магнітним потоком. Використання асинхронного двигуна як тягового виконавчого органа є доцільним з огляду на його конструктивну простоту, механічну міцність, надійність і придатність до роботи в запилених та вологих середовищах, що відповідає умовам експлуатації промислового робота-косарки. Разом з тим, реалізація високоякісного керування швидкістю асинхронного двигуна потребує обґрунтованого вибору структури системи керування, синтезу регуляторів та перевірки працездатності в режимах, характерних для реальної роботи мобільної платформи, включаючи реверси та роботу в зоні послаблення поля.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розроблення та дослідження системи автоматичного керування тяговим асинхронним електроприводом

промислового робота-косарки на основі прямого векторного керування за швидкістю, яке забезпечує відпрацювання заданих швидкісних профілів і стабільну роботу привода в умовах змінних опорів руху та роботи на схилах.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання:

1. Виконати аналіз конструктивних і функціональних особливостей роботів-косарок та визначити вимоги до тягового електропривода мобільної платформи.

2. Сформувати навантажувальну діаграму з урахуванням сил опору руху на схилі та технологічного навантаження процесу косіння.

3. Обґрунтувати вибір асинхронного двигуна за потужністю і моментом із необхідним запасом для важких експлуатаційних режимів.

4. Визначити вимоги до енергоживлення та виконати розрахунок акумуляторної батареї за енергоспоживанням і тривалістю автономної роботи.

5. Синтезувати структуру системи автоматичного керування з внутрішніми контурами струмів у координатах $d-q$, контуром потокозчеплення та зовнішнім контуром регулювання швидкості, а також узгодити її з динамікою силового перетворювача.

6. Виконати моделювання режимів розгону, гальмування, реверсу та роботи під технологічним навантаженням на схилах і оцінити якість регулювання швидкості та характер перехідних процесів; обґрунтувати практичну доцільність рішення в контексті впровадження в сегменті робіт на складному рельєфі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є методи та алгоритми непрямого векторного керування швидкістю асинхронного електропривода, а також вплив змінних навантажень і режимів роботи на показники якості керування.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є система автоматичного керування тяговим всинхронним приводом робота-косарки.

Методи дослідження. Методичною основою роботи є положення теорії автоматичного керування, методи синтезу регуляторів багатоконтурних систем, векторне керування асинхронною машиною, математичне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для перевірки статичних та динамічних режимів роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої структури та налаштувань системи керування при проектуванні реального тягового електропривода робота-косарки, що забезпечує роботу в широкому діапазоні швидкостей із переходом у зону послаблення поля без втрати керованості, а також у застосуванні отриманих моделей і методики розрахунку силових та енергетичних параметрів для подальшої інженерної реалізації.

Структура та обсяг дисертації. Магістерська дисертація складається з вступу, 6 основних розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 122 сторінки, містить 19 рисунків, 28 таблиць, 6 аркушів графічної частини та 39 джерел.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Розвиток робототехніки та автоматизації призвів до появи інноваційних рішень у сфері догляду за газонами, придорожніми ділянками, залізнодорожними насипами. Роботи-косарки стали важливим елементом сучасного ландшафтного дизайну та обслуговування приватних і комерційних територій. Ці автономні пристрої здатні самостійно косити траву та чагарники дотримуючись заданих параметрів і маршрутів, що суттєво зменшує трудовитрати людини та забезпечує рівномірний догляд за газоном.

1.1 Історичний розвиток та еволюція

Ідея автоматизації процесу скошування газону не нова, але її практична реалізація стала можливою лише з розвитком відповідних технологій. перші комерційно успішні моделі з'явилися на ринку лише в середині 1990-х років. Одним із піонерів стала шведська компанія Husqvarna, яка представила свою першу модель у 1995 році. Компанія Friendly Robotics була заснована в 1995 році і розробила технологію RoboScan для навігації [1]. Ранні моделі часто сприймалися несерйозно, але за відносно короткий проміжок часу, близько десяти років, технологія розвинулася до рівня професійних пристроїв.

Справжній технологічний прорив відбувся в останнє десятиліття. Цьому посприяли кілька ключових факторів:

1. **Розвиток акумуляторних технологій:** Перехід від важких та менш ефективних свинцево-кислотних та NiMh акумуляторів до легких, ємних та довговічних літій-іонних батарей (Li-ion) значно збільшив час автономної роботи та зменшив вагу пристроїв [2].

2. **Удосконалення систем навігації:** Поява доступних GPS-модулів, розробка точніших методів позиціонування (RTK/DGPS), вдосконалення датчиків (ультразвукових, інфрачервоних, LiDAR) [3] та розвиток систем комп'ютерного зору дозволили роботам краще орієнтуватися, уникати перешкод та ефективніше покривати площу газону.

3. **Прогрес у мікроелектроніці та програмному забезпеченні:** Потужніші та енергоефективніші мікроконтролери та процесори дозволили реалізовувати складніші алгоритми управління, планування маршруту та обробки даних з датчиків.

4. **Штучний інтелект та машинне навчання:** Впровадження алгоритмів ШІ дозволило роботам адаптуватися до умов навколишнього середовища, навчатися на основі попереднього досвіду та оптимізувати свою роботу.

Сьогодні роботи-косарки здатні конкурувати не лише зі звичайними ручними косарками, але й з садовими тракторами на великих площах, таких як гольф-клуби. Вони набули безліч функцій, недоступних традиційній техніці: самостійне визначення географічного положення, складання плану ділянки, вибір оптимального маршруту та режиму обробки, підключення до мереж зв'язку для надсилання звітів власнику або виходу в Інтернет. Ця еволюція перетворила роботи-косарки з нішевого продукту на важливий сегмент ринку садової техніки та побутової робототехніки.

1.2 Класифікація роботів-косарок

Роботи-косарки можна класифікувати за декількома ключовими критеріями, що відображають їхні функціональні можливості, призначення та технологічні особливості. Розглянемо це питання більш детально.

Класифікація за принципом роботи та рівнем автономності. На основі цієї класифікації виділяють повністю автономних роботів, напівавтономних та роботів з дистанційним керуванням.

1. **Повністю автономні роботи:** Це найпоширеніший тип сучасних роботів-косарок. Вони здатні самостійно виконувати весь цикл робіт: автоматично виїжджати з базової станції для косіння за заданим алгоритмом або розкладом, самостійно повертатися на зарядку при низькому рівні заряду акумулятора, а потім продовжувати роботу з місця зупинки. Такі роботи

оснащені складними системами навігації та набором датчиків для виявлення меж ділянки та об'їзду перешкод.

2. *Напіваавтономні роботи:* Ці моделі потребують певного втручання користувача, наприклад, для ручного перенесення між різними зонами косіння, початкового запуску або налаштування для складних ділянок. Рівень автономності тут нижчий, ніж у повністю автономних моделей.

3. *Роботи з дистанційним керуванням:* Деякі моделі поєднують автоматичні функції з можливістю ручного керування через пульт дистанційного керування або мобільний додаток. Це дозволяє оператору вручну спрямовувати роботу на певні ділянки, обробляти важкодоступні місця або просто контролювати процес за потреби.

Класифікація за типом ріжучої системи. Конструкція ріжучого механізму впливає на якість скошування та тип трави, з якою робот може працювати. Всього виділяють 3 системи:

1. Роторна.
2. Циліндрична (барабана) система;
3. Мульчуюча система.

Роторна система – це найпоширеніший тип. Використовує один або кілька ножів (лез), закріплених на горизонтально обертовому диску або валу. Ножі можуть бути суцільними металевими або невеликими, вільно обертовими лезами (вільно плаваючі леза) [4].

Вільно плаваючі леза це кілька невеликих гострих лез, закріплених на обертовому диску так, що вони можуть обертатися навколо осі кріплення. Під дією відцентрової сили вони займають робоче положення. При зіткненні з твердим предметом лезо "ховається", що підвищує безпеку та довговічність. Добре підходять для м'якої газонної трави, але можуть погано справлятися з бур'янами. Часто вимагають попередньо підготовленого газону. Прикладом робота-косарки з таким типом леза є Husqvarna Automower.

Суцільні металеві ножі подібні до тих, що використовуються в мотокосах або традиційних газонокосарках. Вони краще справляються з високою травою та бур'янами. Часто такі ножі роблять великими, щоб захопити всю ширину колісної бази, дозволяючи косити впритул до країв. Прикладом є Robomow, Caiman Ambrogio.

Циліндрична (барабанна) система складається з циліндра з гвинтовими лезами, який обертається проти нерухомого нижнього ножа, зрізаючи траву за принципом ножиць. Забезпечує найвищу якість кошення, створюючи ідеально рівний газон. Використовується переважно в професійних моделях для гольф-полів та елітних газонів [5].

Мульчуюча система це не стільки окремий тип, скільки принцип роботи більшості сучасних роторних роботів. Робот косить траву часто, зрізуючи лише невелику частину верхівки. Леза та конструкція деки спроектовані так, щоб багаторазово подрібнювати зрізану траву на дрібні частинки, які залишаються на газоні як натуральне добриво (мульча). Дрібні частинки трави швидко розкладаються, повертаючи в ґрунт поживні речовини (азот, фосфор, калій) та вологу (трава містить до 90% води). Це покращує якість газону та усуває необхідність збирати скошену траву. Мульчування може знизити потребу в хімічних добривах на 25-30%, а також покращити структуру ґрунту та зменшити випаровування вологи [6].

Класифікація за розміром оброблюваної площі. Потужність, ємність акумулятора та навігаційні можливості робота визначають максимальну площу газону, яку він може ефективно обслуговувати, тому можна виділити наступні категорії:

- Компактні моделі для малих ділянок (до 300-500 м²);
- Моделі середнього класу (300/500 - 1500/1900 м²);
- Моделі для великих площ (1000/1500 - 5000 м²);
- Професійні моделі (понад 5000 м²);

- Промислові моделі спеціального призначення (працюють в важких умовах експлуатації; можуть виконувати різання не тільки газонів, а й густого бур'яну, чагарників, паростків молодих дерев).

Компактні моделі призначені для невеликих приватних садів та міських газонів. Характеризуються меншими розмірами, нижчою потужністю та доступнішою ціною. Приклади включають Husqvarna Automower 305/308 [7] та Robomow RM510/RM200.



Рисунок 1.1 – Робот-косарка Husqvarna Automower 308

Моделі середнього класу найбільш популярний сегмент для приватних користувачів, що пропонує оптимальний баланс продуктивності, функціональності та вартості для типових присадибних ділянок. Приклади: Worx Landroid WG 794 E, Bosch Indego [8].



Рисунок 1.2 – Робот-косарка Bosch Indego

Моделі для великих площ розраховані на просторі приватні садиби, парки, невеликі комерційні об'єкти. Оснащені потужнішими двигунами, більшими по ємності акумуляторами та часто мають розширені навігаційні функції (наприклад, GPS). Приклади: Wiper One XLT, Husqvarna Automower 220 AC / 230 ACX / 265 ACX, Robomow RS630 [9].



Рисунок 1.3 – Робот-косарка Robomow RS630

Професійні моделі розроблені для комерційного використання на дуже великих територіях: гольф-полях, спортивних майданчиках, парках, аеропортах. Відрізняються максимальною продуктивністю, надійністю, можливістю роботи в складних умовах та часто використовують передові системи навігації (RTK GPS). Приклад: Mammotion LUBA 2 AWD Series [10].



Рисунок 1.4 – Робот-косарка Mammotion LUBA 2 AWD Series

Промислові моделі роботів-косарок спеціального призначення це, по суті, важка роботизована техніка для покосу та розчищення територій, де звичайні побутові робот-косарки або не працюють, або швидко виходять з ладу. Їхній ключовий фокус – не ідеальний газонний зріз, а прохідність, безпека, продуктивність і здатність різати щільну рослинність (бур'ян, очерет, чагарник, підлісок). Середовищами їх експлуатації є схили, пересічна місцевість, канави, узбіччя, ділянки під опорами ЛЕП, біля відбійників, на дамбах, у зонах із камінням/гілками/сміттям. Промислова машина розрахована на багатогодинну роботу. У промисловому сегменті часто застосовують не газонну деку з тонкими ножами, а молоткові/ножові ланцюгові голови та лісові мульчери. Y-ножі або молоточки добре тримають ударні навантаження і перемелюють щільну траву/бур'ян та частково подрібнюють тонкі гілки. Щодо ходової частини то є варіанти з гусеницями, а є колісні з спеціальним приводом та лебідкою. Окремий тренд у гусеничному класі – зміна ширини колії для стійкості. Найчастіше в промислових машин стоїть ДВЗ + гідропривід, бо це просто і витривало для великої потужності та ударних навантажень. Але з'являються й гібридні архітектури, де ДВЗ живить генератор/батареї, а рух реалізують електродвигуни. Також зустрічаються варіанти виконані повністю на електродвигунах.

Класифікація за способом живлення. Переважна більшість роботів-косарок є електричними, але є відмінності в джерелі цієї енергії. Тому існують:

1. **Акумуляторні моделі.** Абсолютна більшість на ринку. Оснащені перезарядними літій-іонними (Li-ion) або літій-залізо-фосфатними (LiFePO₄) батареями. Забезпечують автономну роботу від 60 до 240 хвилин і більше. Автоматично повертаються на базову станцію для підзарядки.
2. **Гібридні моделі** (акумулятор + сонячні панелі). Деякі моделі (наприклад, Husqvarna Automower Solar Hybrid) оснащені сонячними панелями на корпусі. Сонячні панелі доповнюють заряд акумулятора,

дозволяючи продовжити час роботи між зарядками та зменшити споживання електроенергії з мережі, особливо в сонячну погоду.

3. **Моделі на біопаливних елементах** (концепція). Існують розробки та ідеї створення роботів-газонокосарок, які б використовували скошену траву як паливо для біопаливного елемента, що генерує електрику. Це могло б вирішити проблему підзарядки та утилізації трави одночасно, але поки що це експериментальний напрямок. Як приклад можна навести робота-газонокосарку EcoMow Harvester розроблену Джейсоном Форсом, студентом Університету Джорджа Мейсона, разом зі своєю командою. Автономна роботизована газонокосарка EcoMow оснащена реактором-газифікатором біомаси, який живиться шматочками трави та перетворює їх на паливо, щоб газонокосарка постійно працювала. EcoMow оснащена ефективним некінетичним електричним різакон, який акуратно підстригає траву та дозволяє збирати відходи всередині корпусу для перетворення їх на паливо. Поки що це лише прототип і автономна роботизована газонокосарка EcoMow потребує попереднього завантаження трав'яних гранулам для початку роботи [11].

4. **Моделі на водневих елементах** (концепція). Звичайні електричні радіокеровані газонокосарки використовують літій-іонні акумулятори. Однак ці акумулятори не здатні забезпечити тривалі періоди безперервної роботи, що робить їх непридатними для місцевості без зарядних пристроїв, таких як напівгірські райони або великі відкриті простори, такі як сонячні електростанції та фруктові сади. Щоб вирішити цю проблему, NEXTU Electronics у 2023 розробила електричну радіокеровану газонокосарку, оснащену водневим паливним елементом виробництва Spectronik Pte. Ltd., який забезпечує набагато довший час роботи, ніж звичайні літій-іонні акумулятори. На етапі демонстраційних випробувань успішну роботу було підтверджено з використанням двох водневих резервуарів високого тиску об'ємом 2,8 літра та тиском 19,6 МПа, а в майбутньому планується масове

виробництво з двома водневими резервуарами високого тиску об'ємом 6,8 літра та тиском 29,4 МПа, щоб забезпечити 8 годин безперервної роботи [12].



Рисунок 1.5 – Експериментальна розробка компанії NEXTY Electronics

Класифікація за типом приводу коліс. Тип приводу впливає на прохідність робота, особливо на схилах та нерівних поверхнях. За типом приводу косарки поділяються на два типи: задній привід та повний привід.

При задньому приводі передні колеса є опорними та вільно обертаються для маневреності. Це стандартна схема для багатьох моделей.

Повний привід застосовується в моделях, призначених для роботи на складних рельєфах з крутими схилами, забезпечуючи краще зчеплення та прохідність [13]. Колеса зазвичай одного розміру і не повертаються, а маневрування відбувається за рахунок різної швидкості обертання коліс лівого та правого борту (диференціальний привід).

1.3 Системи навігації та орієнтації

Сучасні роботи-косарки є складними пристроями, що поєднують різноманітні технології для забезпечення автономної, ефективною та безпечною роботи. Здатність робота орієнтуватися в просторі, визначити межі робочої

зони та уникати перешкод є основою для його автономної роботи. Існують різні підходи до навігації, часто вони комбінуються для підвищення надійності. Розглянемо кожен з них.

Навігація на основі периметрального дроту (граничного кабелю). Це традиційний та найпоширеніший метод визначення робочої зони. По периметру газону та навколо стаціонарних перешкод (клумби, дерева, басейни) укладається спеціальний низьковольтний дріт. Дріт підключається до базової станції, яка генерує слабкий електромагнітний сигнал [14]. Спеціальні антени на роботі виявляють це поле та визначають близькість до дроту. Коли робот наближається до дроту, система керування дає команду на розворот або зміну напрямку, утримуючи його в межах заданої зони. Дріт зазвичай кріпиться до землі спеціальними кілочками або закопується на невелику глибину (2-10 см). Деякі виробники постачають спеціальний інструмент для швидкого укладання кабелю в землю.

Периметральний дріт часто використовується роботом для повернення на базову станцію для підзарядки. Іноді для цього використовується окремий направляючий кабель, що прокладається віддалено від основної межі до станції. Це допомагає роботу швидше знаходити базу. Принцип дії такий: під час роботи косарка неодноразово перетинає направляючий кабель і зазвичай не реагує на нього, не змінюючи ні напрямку, ні швидкість при його переїзді. Але коли заряд зменшується до мінімуму, вона йде по ньому, як по стежці, і впирається прямо в контакти зарядного пристрою. І виїжджає звідти теж самостійно, коли її батареї повністю зарядяться.

Тепер поговоримо про позитивні та негативні сторони даного типу орієнтації.

Переваги: Надійність роботи незалежно від погоди та освітлення, точне визначення меж, можливість створення складних конфігурацій з зонами які потрібно об'їжджати, відносна простота та доступність технології, робот може почати роботу відразу після укладання дроту без додаткового програмування.

Недоліки: Трудомісткість первинного монтажу, ризик пошкодження дроту під час садових робіт, складність зміни конфігурації газону після установки.

GPS-навігація. Глобальна система позиціонування (GPS) та її аналоги (Galileo, BeiDou) все частіше використовується не тільки в просунутих моделях.

GPS-приймач на роботі визначає його географічне місцезнаходження. При першому налаштуванні користувач задає межі робочої зони (наприклад, обходячи периметр з роботом або малюючи на карті в мобільному додатку). Робот зберігає цю карту та використовує дані GPS для орієнтації, планування маршруту та уникнення повторного косіння.

Стандартний GPS має точність 2-5 метрів, що може бути недостатньо для точного визначення меж газону. Тому часто використовуються системи диференціального GPS (DGPS) або GPS з RTK-корекцією (Real-Time Kinematic), які забезпечують сантиметрову точність (1-30 см) [15]. Ці системи зазвичай вимагають наявності стаціонарної базової станції або доступу до мережі коригувальних сигналів.

Переваги: Не потребує укладання периметрального дроту, легкість зміни конфігурації зони косіння, можливість роботи на кількох незалежних ділянках, ефективне планування маршруту (наприклад, паралельними лініями).

Недоліки: Вища вартість обладнання (особливо з RTK), залежність від якості сигналу супутників (можливі проблеми під густими деревами, біля високих будівель, у погану погоду), менша точність стандартного GPS порівняно з дротом. GPS не виявляє дрібні або тимчасові перешкоди на газоні, тому на роботі завжди потрібні додаткові датчики (що значно підвищує вартість) [16].

Системи комп'ютерного зору. Використання камер та алгоритмів обробки зображень – один із найсучасніших підходів до навігації. Камери на

роботі знімають оточуюче середовище. Алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання аналізують зображення для розпізнавання об'єктів, визначення меж газону (наприклад, за кольором та текстурою поверхні, відрізняючи траву від доріжок чи клумб), картографування місцевості (SLAM - Simultaneous Localization and Mapping) та виявлення перешкод. Алгоритми ШІ можуть ідентифікувати різні типи об'єктів (люди, тварини, іграшки, садові меблі) та відповідно реагувати (зупинитися, об'їхати).

Типи камер, що використовуються в даних системах:

Монокулярні (одна камера) – для базового розпізнавання об'єктів та границь. Алгоритми комп'ютерного зору аналізують текстуру та колір поверхні, відрізняючи траву від інших поверхонь (доріжки, клумби, асфальт). Робот може автоматично визначати межі газону без периметрального дроту.

Стереокамери (дві камери) – забезпечують тривимірне бачення, дозволяючи оцінювати відстань до об'єктів. Це дозволяє точніше обходити перешкоди та оцінювати рельєф місцевості. Стереозір особливо корисний для виявлення небезпечних об'єктів (іграшки, тварини, каміння) та адаптації роботи до складного рельєфу.

Переваги: Не потребує периметрального дроту, автоматична адаптація до змін на ділянці, інтелектуальне розпізнавання об'єктів, можливість роботи на ділянках зі складною геометрією, потенційно вища безпека.

Недоліки: Висока вартість, залежність від умов освітлення (погана робота в сутінках, при яскравому сонці з тінями, під дощем), необхідність очищення датчиків і камер, високі обчислювальні вимоги, можливі помилки розпізнавання.

1.4 Датчики роботів-косарок

В даному пункті розглянемо типи датчиків які найчастіше використовуються на роботах-косарках.

Датчики трави. Деякі роботи використовують спеціальні датчики для визначення наявності трави під собою. Датчики (часто оптичні або

інфрачервоні) аналізують поверхню під роботом. За рахунок цього робот може визначати межі газону, без трави (напр., доріжка), може розпізнавати вже скошені ділянки та об'їжджати їх, або переходити в економічний режим (знижувати оберти ножів) на ділянках без високої трави для економії енергії. Деякі моделі можуть змінювати тактику стрижки залежно від висоти або густоти трави, наприклад, переходячи на рух по спіралі на ділянках із густою травою. Недоліками є те що вони можуть некоректно працювати при наявності "лисина" на газоні, приймаючи їх за межу.

Ультразвукові та інфрачервоні датчики перешкод. Ці датчики є стандартним оснащенням більшості роботів для виявлення перешкод на близькій відстані. При виявленні перешкоди система управління змінює напрямок руху або зупиняє робота.

Ультразвукові датчики (сонари) випромінюють звукові хвилі та вимірюють час повернення відбитого сигналу для визначення відстані до об'єктів. Зазвичай працюють на відстані від 15 см до 2-6 метрів. Розміщуються по периметру корпусу для забезпечення кругового огляду.

Інфрачервоні (ІЧ) датчики також розміщуються по периметру корпусу та працюють за схожим принципом, але використовують інфрачервоне світло. Ефективні для виявлення близьких перешкод (до 50 см) , можуть краще виявляти прозорі об'єкти, які ультразвук може не виявити, тому в більш преміальних моделях використовується комбінація даних датчиків [17].

LiDAR-датчики працюють на основі технології LiDAR (Light Detection and Ranging). Це технологія дистанційного зондування, яка використовує лазерне світло для вимірювання відстаней до об'єктів та створення детальних 3D-карт оточення [18]. Датчик має циліндричну або купольну форму, встановлюється на даху робота (найвища точка) і виступає над корпусом на 5-10 см, при цьому постійно обертаючись зі швидкістю 5-20 обертів за секунду, що забезпечує повний круговий огляд без мертвих зон і дозволяє виявляти перешкоди на відстані 1-30 метрів, бачити через високу траву та будувати карту всієї ділянки навколо робота.

Також є передній 3D ToF LIDAR який встановлюється спереду робота на бампері, розташований на висоті 5-15 см від землі та спрямований вперед і трохи вниз. Має поле зору 90-120°, що дозволяє виявляти низькі перешкоди (каміння, іграшки), вимірювати висоту об'єктів (бордюри, сходи) та швидко реагувати на раптові перешкоди.

Таблиця 1.1 – Порівняння датчиків виявлення перешкод

Параметр	Ультразвукові датчики	Інфрачервоні	LIDAR
Принцип роботи	Звукові хвилі (20-50 кГц)	Інфрачервоне світло	Лазерні промені (часто ІЧ)
Дальність виявлення	0,15 - 3 м	0,05 – 0,5 м	0,5 - 100+ м
Точність вимірювання	± 1-3 см	± 0,5-2 см	± 0,1-1 см (до міліметрів)
3D-картування	Ні	Ні	Так (повна 3D-карта)
Обертання/сканування	Зазвичай ні (статичні)	Ні (статичні)	Так (360° або секторне)
Швидкість оновлення	20-40 разів/сек	30-60 разів/сек	600-14400 точок/сек
Робота в дощ/туман	Добре (стійкі до вологи)	Середньо	Погіршується на 30-70%
Темні об'єкти	Виявляє добре	Виявляє добре	Погано виявляє (<15% відбиття)
Прозорі об'єкти	Може не виявити	Виявляє добре	Виявляє добре
Поле зору	15-30° конус	10-20° конус	90-360° (залежно від типу)
Застосування в роботі	Виявлення близьких перешкод	Резервний датчик, контакт	Навігація, картування, SLAM
Вплив сонця	Не впливає	Сильно впливає	Помірно впливає

Як бачимо з таблиці 1.1 датчики Lidar мають значно більше переваг, особливо якщо казати за точність та дальність виявлення об'єктів в порівнянні з іншими типами датчиків, проте вони набагато дорожче, та погано виявляють перешкоди під час дощу, особливо темних кольорів.

Цифровий компас/Магнітометр. Допомогає визначати напрямок руху.

Одометрія (Енкодери коліс). Датчики на колесах вимірюють кут їх повороту, дозволяючи системі керування оцінювати пройдену відстань та швидкість. Використовується для більш точного слідування маршруту, особливо в поєднанні з іншими системами.

Інерційний вимірювальний блок (IMU). Поєднує акселерометри та гіроскопи для відстеження руху та орієнтації робота в просторі.

Датчики дощу виявляють вологість і можуть автоматично призупинити роботу під час дощу, оскільки кошення мокрої трави менш ефективне, а рух по мокрій землі може пошкодити газон.

Комбінація різних систем навігації та датчиків дозволяє роботам-газонокосаркам працювати надійно та ефективно в різноманітних умовах.

1.5 Алгоритми руху та планування маршруту

Ефективність роботи робота-косарки значною мірою залежить від алгоритмів, які визначають, як саме він переміщується по газону для забезпечення повного та рівномірного покриття. Вибір траєкторії руху впливає на час косіння, споживання енергії та загальну якість догляду за газоном. Існують різні підходи до планування маршруту та реалізації руху [19]. Розглянемо їх.

Хаотичний (випадковий) рух. Це найпростіший метод, часто використовуваний у бюджетних моделях та моделях, що покладаються переважно на периметральний дріт. Робот рухається по прямій лінії доки не досягне межі (дроту) або не зіткнеться з перешкодою. Після цього він змінює напрямок під випадковим або заздалегідь визначеним кутом і продовжує рух. Цей метод, при достатньому часі роботи, забезпечує повне покриття газону. Однак він вважається неефективним через багаторазове проходження одних і тих самих ділянок. Єдиною перевагою може бути рівномірність підстригання без видимих стиків.

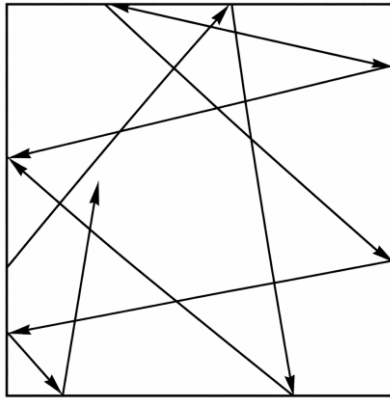


Рисунок 1.6 – Приклад хаотичного руху робота

Систематичний рух. Цей підхід передбачає більш організоване переміщення робота по газону за певним патерном, яких може бути чотири :

1. **Паралельні Лінії.** Робот рухається паралельними смугами з невеликим перекриттям, подібно до того, як людина косить газон звичайною косаркою. Цей метод значно ефективніший за хаотичний, швидше забезпечує повне покриття та створює естетичний вигляд газону зі смугами (система Logicut у роботах-косарках Bosch). Він вимагає точної системи навігації, такої як RTK GPS або комп'ютерний зір, для дотримання паралельності.

2. **Спіральний Рух.** Робот рухається по спіралі, що розширюється або звужується. Цей алгоритм може використовуватися для обробки ділянок правильної форми або для інтенсивного косіння окремих зон з високою чи густою травою. Якщо під час руху по спіралі робот виявляє перешкоду, він може від'їхати назад і продовжити рух.

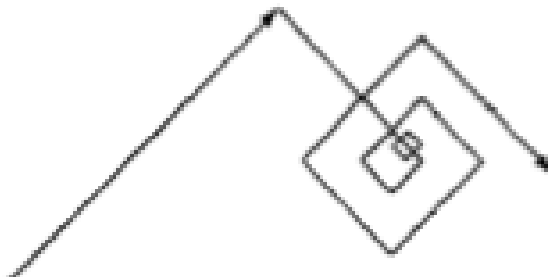


Рисунок 1.7 – Приклад спірального руху робота

3. **Діагональний Рух.** Переміщення здійснюється під гострим або тупим кутом до сторін ділянки.

4. **Круговий Рух (контурний).** Робот повторює контури ділянки. Це може зменшити кількість холостих ходів та підвищити швидкість обробки.

Адаптивний (навчальний) рух. Сучасні роботи з елементами штучного інтелекту використовують дані від попередніх сеансів косіння, інформацію з датчиків (наприклад, датчиків трави) та зовнішні дані (погода, швидкість росту трави) для оптимізації маршруту та графіка роботи. Робот може запам'ятовувати розташування постійних перешкод, визначати ділянки, що потребують частішого косіння, та уникати повторної обробки вже скошених зон. Це підвищує ефективність та якість догляду за газоном.

Гібридні підходи. Часто роботи поєднують різні алгоритми для досягнення найкращого результату. Наприклад, можуть використовувати систематичний рух для основної площі та хаотичний або контурний рух для обробки країв, кутів та важкодоступних місць.

Техніки планування шляху. Для реалізації систематичних та адаптивних алгоритмів руху використовуються різні методи планування шляху. Розглянемо деякі з них:

1. **Алгоритми пошуку шляху.** Такі алгоритми, як алгоритм пошуку A* [20] або алгоритм Дейкстри [21], можуть використовуватися для знаходження оптимального маршруту між точками на карті газону, враховуючи перешкоди.

2. **Алгоритми планування шляху покриття (CPP - Coverage Path Planning).** Спеціалізовані алгоритми, розроблені для забезпечення повного покриття визначеної області з мінімальним перекриттям та пройденою відстанню. Вони можуть генерувати маршрути у вигляді паралельних ліній, спіралей тощо [22].

3. **Нечітка логіка (Fuzzy Logic).** Може застосовуватися для керування рухом, наприклад, для утримання прямої лінії або плавного обходу перешкод на основі даних з датчиків.

4. Комп'ютерний зір. Використання камер та обробки зображень дозволяє створювати карти місцевості (SLAM), розпізнавати скошені/нескошені ділянки та генерувати відповідні маршрути.

5. Методи на основі карт. Якщо робот має карту ділянки (створену за допомогою GPS, SLAM або вручну), він може використовувати її для ефективного планування покриття всієї площі.

1.6 Акумулятори

Автономна робота роботів-газонокосарок неможлива без надійного та ефективного джерела енергії. Як ми вже згадували, переважна більшість сучасних моделей використовують живлення від акумуляторів, тому розглянемо які їх види застосовують для роботів-косарок. Отже, найрозповсюдженішим є:

- **Літій-іонні (Li-ion) акумулятори.** Це найпоширеніший тип акумуляторів у сучасних роботах. Вони популярні завдяки високій щільності енергії (велика ємність при малій вазі та розмірі), низькому саморозряду та тривалому терміну служби (500-1500 циклів). Типова ємність варіюється від 1.6 А·год до 6.9 А·год і більше, при напрузі 18-36 В.

- **Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори.** Сучасний різновид літійових акумуляторів, що набирає популярності. Вони відрізняються ще довшим терміном служби (до 2000 циклів і більше) та підвищеною безпекою експлуатації (менш схильні до загоряння при пошкодженні). Використовуються, наприклад, у моделі Robomow RS630.

- **Нікель-метал-гідридні (NiMh) акумулятори.** Використовувалися в деяких старих моделях роботів-пилососів та газонокосарок. Вони мають меншу щільність енергії та більший саморозряд порівняно з Li-ion.

- **Свинцево-кислотні (СК) акумулятори.** Зустрічаються в деяких, зазвичай простіших та дешевших, моделях. Їхні переваги – низька вартість. Недоліки – велика вага, менший термін служби, тривалий час зарядки.

1.7 Електродвигуни в роботах-косарках

Електродвигуни є серцем робота-косарки, забезпечуючи рух коліс та обертання ріжучої системи. Вони стали стандартом для цього типу техніки завдяки низці переваг порівняно з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Основні переваги в порівнянні з ДВЗ [23]:

Екологічність. Найважливіша перевага – відсутність прямих викидів вихлопних газів. Це критично важливо для роботи біля житлових будинків, у парках та на дитячих майданчиках. Для порівняння, година роботи бензинової газонокосарки може виробляти стільки ж забруднюючих речовин, скільки автомобіль за 160-190 км пробігу.

Низький рівень шуму. Електричні роботи працюють значно тихіше за бензинові аналоги, з рівнем шуму від 55 до 70 Дб (бензинові косарки генерують 90-100 Дб). Низький шум дозволяє роботам працювати рано вранці, пізно ввечері або навіть вночі, не турбуючи сусідів.

Простота обслуговування. Електродвигуни не потребують палива, мастил та регулярного технічного обслуговування, характерного для ДВЗ. Їхня конструкція простіша, з меншою кількістю рухомих частин.

Висока ефективність. ККД електродвигунів може досягати 85-95%, тоді як у ДВЗ цей показник становить 20-30%.

Крутний момент. Електродвигуни забезпечують максимальний крутний момент з моменту запуску, що дозволяє ефективно працювати навіть з густою або вологою травою.

Менша вага та компактність. Електродвигуни зазвичай легші та компактніші за ДВЗ аналогічної потужності.

У роботах-газонокосарках використовуються переважно два типи електродвигунів: щіткові (колекторні) та безщіткові (brushless, BLDC), рідше АД.

Щіткові електродвигуни постійного струму використовуються в бюджетних моделях роботів-газонокосарок. Їхня конструкція включає ротор з обмоткою, статор з постійними магнітами та щітково-колекторний вузол для

комутації струму. Основні переваги — проста конструкція, низька вартість виробництва, простота управління без складної електроніки.

Недоліки щіткових двигунів суттєві: механічний знос щіток та колектора вимагає періодичної заміни цих компонентів (кожні 500-1000 годин роботи), іскріння в щітковому вузлі створює електромагнітні перешкоди, нижчий ККД (70-80%) порівняно з безщітковими двигунами, нижча надійність через наявність компонентів, що зношуються. Проте для невеликих робіт з обмеженим бюджетом щіткові двигуни залишаються прийнятним рішенням.

Безщіткові електродвигуни постійного струму (BLDC) стали стандартом для сучасних робіт-газонокосарок преміум-класу. У них ротор складається з постійних магнітів, а обмотки розташовані на статорі. Відсутність щіткового вузла та електронне управління комутацією через контролер забезпечують численні переваги: значно вищий ККД (85-95%), що забезпечує довшу роботу від акумулятора; вища надійність через відсутність компонентів, що зношуються механічно; мінімальні вимоги до обслуговування (практично не потребують його протягом всього терміну служби); відсутність іскріння та електромагнітних перешкод; краще співвідношення потужності до розміру та ваги; точне управління швидкістю та крутним моментом через контролер; нижчий рівень шуму та вібрацій.

Недолік BLDC двигунів — вища вартість через необхідність складного електронного контролера та використання магнітів із рідкоземельних елементів. Однак ця різниця у вартості компенсується довговічністю та ефективністю.

Асинхронні двигуни змінного струму рідко використовуються в роботах-газонокосарках через специфіку їхньої конструкції та вимоги до живлення, проте є великий потенціал для їх встановлення в промисловій роботі-косарки. Їхня конструкція включає статор з трифазною обмоткою, ротор типу “біляча клітка” (короткозамкнений) та підшипникові вузли. Принцип роботи базується на створенні обертового магнітного поля статором, яке індукуює струми в роторі та створює обертовий момент.

Основні переваги асинхронних двигунів – надзвичайно проста та надійна конструкція ротора (немає контактних кілець, щіток чи постійних магнітів), низька вартість виробництва при масовому випуску, висока стійкість до перевантажень, можливість роботи в агресивних середовищах (вологість, пил, бруд), тривалий термін служби, мінімальні вимоги до обслуговування — лише заміна підшипників.

Недоліками асинхронних двигунів є потреба в живленні змінним струмом, що вимагає інвертора для перетворення постійного струму акумулятора в трифазний змінний струм.

1.8 Порівняльний аналіз технічних характеристик

Для всебічного аналізу сучасного ринку роботизованих газонокосарок необхідно провести порівняльний аналіз технічних характеристик провідних моделей від ключових виробників. Це дозволить виявити основні тенденції в галузі, визначити ключові параметри, що впливають на продуктивність, та сегментувати ринок.

Основні технічні та експлуатаційні параметри, зокрема тип живлення, ємність акумулятора, рекомендована площа обробки та ширина косіння, зведено у таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння характеристик роботів косарок різного рівня

Модель	Тип акумулятора	Ємність акумулятора, А*год	Час автономної роботи, хв	Тип приводу	Оброблювана площа, м ²	Ширина косіння, см	Висота косіння, мм	Максимальний ухил, град.	Габарити, мм	Вага, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Stiga Autoclip 140 4WD	Li-Ion	6,9	200	П	400	25	34	27	430x360x220	7,9
Cub Cadet Lawnkeeper 500	СК	2 по 12	200	3	500	20	20	18	640x520x300	17,6
Calman Ambrogio L 50 Evolution	Li-Ion	6,9	210	П	800	24	34-40	27	409x199x335	8,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RoboMow City 120	Li-Ion	24	180	П	1500	53	26-63	15	890x665x315	36,9
Stiga Autoclip 520/ 523	Li-Ion	6,9	180	3	1900/2600	29	20-56	24	590x430x270	12
Etesia ETM105	Li-Ion	Н/д	60	П	2000	105	22-80	18	1200x1200x500	48
Calman Ambrogio L 200 Elite	Li-Ion	2 по 6,9	360	3	3500	29	20-76	27	610x265x410	13
Stiga Autoclip 720 S	Li-Ion	13,8	300	3	4000	36	25-64	24	690x510x290	17,2
Etesia ETM44	Li-Ion	Н/д	60	П	5000	44	22-75	18	800x550x360	26
Husqvarna Automower 265 ACX	Li-Ion	8,8	80	3	6000	32	20-60	20	800x710x310	12,9
Etesia ETM65	Li-Ion	Н/д	60	П	9000	65	23774	18	970x1000x450	36
Stiga Autoclip 920 S	Li-Ion	13,8	360	3	10000	84	25-85	24	1470x1150x750	44

Як видно з аналізу даних, представлених у таблиці 1.2, на ринку спостерігаються наступні тенденції:

1. **Домінування Li-Ion технології.** Абсолютна більшість (понад 90%) сучасних моделей від усіх провідних виробників (Bosch, Calman, Husqvarna, Stiga) використовують літій-іонні (Li-Ion) акумулятори. Це свідчить про те, що даний тип акумулятора став галузевим стандартом, витіснивши застарілі нікель-метал-гідридні (Ni-Mh) та свинцево-кислотні (СК) батареї, які залишилися лише в деяких моделях RoboMow (наприклад, RL2000) або Cub Cadet (Lawnkeeper 500).

2. **Чітка сегментація ринку.** Моделі чітко поділяються за оброблюваною площею. Для невеликих приватних газонів (до 800-1000 м²) призначені компактні моделі, як-от Husqvarna Automower 305/308 або Bosch Indego, що мають вузьку ширину косіння (17-26 см). Для середніх та великих площ (3000-6000 м²) виробники пропонують потужніші рішення (наприклад, Calman Ambrogio L 300 Carbon або Husqvarna Automower 265 ACX) зі значно

більшою ємністю акумуляторів (до 13-14 Агод) та шириною косіння 29-36 см. Професійний сегмент (понад 9000-10000 м²) представлений важкими машинами, як-от Etesia ETM105 або Stiga Autoclip 920 S, де ширина косіння сягає 84-105 см.

3. **Залежність ваги та продуктивності.** Існує пряма кореляція між вагою пристрою та його продуктивністю. Легкі моделі (7-10 кг) зазвичай розраховані на площі до 1000 м², тоді як моделі для великих територій важать десятки кілограм, що обумовлено наявністю потужніших двигунів та батареї великої ємності.

4. **Різноманітність типів приводу.** Хоча більшість моделей середнього та високого класу використовують повний привід (позначено як "П"), у бюджетному сегменті часто зустрічається привід на 2 колеса (позначено як "З").

1.9 Сфери застосування

Розглянемо сфери застосування роботів-косарок:

Приватні домоволодіння. Це найбільший сегмент ринку роботів-косарок. Приватні власники цінують економію часу та зусиль на догляді за газоном. Робот може працювати навіть під час відсутності господарів вдома або під час відпустки, підтримуючи газон у доглянутому стані. Для приватного використання найбільш популярні компактні моделі та моделі середнього класу. Особливо цінується низький рівень шуму, що дозволяє роботу працювати рано вранці або ввечері без турбот про сусідів.

Котеджні селища та багатоквартирні комплекси. Управляючі компанії котеджних селищ та житлових комплексів використовують роботи-косарки для обслуговування загальних зелених зон. Це дозволяє зменшити витрати на персонал і забезпечити постійно доглянутий вигляд території. Для таких об'єктів часто використовуються кілька роботів, які працюють скоординовано, обробляючи різні зони.

Спортивні об'єкти. Футбольні поля, тенісні корти з трав'яним покриттям, поля для крикету та регбі потребують регулярного догляду для підтримки якості ігрової поверхні. Професійні роботи-косарки забезпечують рівномірне кошення з можливістю створення декоративних візерунків. Мульчуюча система кошення сприяє природному удобренню газону, що особливо важливо для спортивних об'єктів, де густина та міцність трави критично важливі. Можливість щоденного кошення стимулює горизонтальний ріст трави, створюючи більш густий та стійкий до навантажень газон.

Гольф-поля. Гольф-поля є одним з найбільш вимогливих застосувань для роботів-косарок. Тут використовуються спеціалізовані професійні моделі з циліндричною ріжучою системою, які забезпечують найвищу якість кошення. Перевага використання роботів на гольф-полях: можливість нічного кошення без турбот про шум, що дозволяє грати протягом всього дня; рівномірне кошення, що забезпечує однакову якість поверхні; зменшення ущільнення ґрунту, оскільки легкі роботи створюють менше навантаження порівняно з важкою технікою; економія води завдяки мульчуванню, яке зменшує випаровування вологи.

Парки та громадські простори. Міські парки, сквери, алеї та інші громадські зелені зони можуть обслуговуватися роботами-косарками. Для великих площ використовуються флоти професійних моделей з GPS-навігацією та централізованим управлінням. Особливо актуальне використання роботів у міських умовах завдяки нульовим викидам та низькому рівню шуму, що важливо для густонаселених районів. Роботи можуть працювати навіть під час відвідування парку людьми завдяки системам безпеки.

Кладовища та меморіальні комплекси. Специфіка цього застосування це наявність численних надгробків та меморіалів, що вимагає точної навігації. Сучасні роботи з GPS та системами технічного зору здатні ефективно обходити складні конфігурації та забезпечувати доглянутий вигляд території.

1.10 Вимоги до ЕП

Проаналізувавши матеріал, який наведено вище, сформулюємо вимоги до електроприводу робота-косарки:

1. Достатній момент двигуна. Необхідно для можливості долати великі кути ухилу під час роботи, коли на привод діють ще додаткові сили від різання;
2. Діапазон регулювання швидкості 1:20 (2:1 вгору та 1:10 вниз) для можливості швидкого переміщення між зонами обробки на швидкостях вище номіналу та роботи в важких умовах косіння на швидкостях нижче номіналу;
3. Високий ККД та енергоефективність. Так як живлення йде від акумулятора необхідно щоб система мала якомога вищий ККД ;
4. Реверсивність. Необхідно для можливості виконання розвороту на місці та оминання перешкод;
5. Велика надійність для різних умов експлуатації засобу. Це більше стосується механіки, але двигун також повинен бути стійким до вібрацій та великих навантажень ;
6. Точність регулювання швидкості. Необхідно для прямолінійного руху, бо якщо один двигун крутиться трохи швидше за інший, робот відхиляється від курсу;
7. Низький шум. Актуально для роботи в місцях скупчення людей.
8. Високий ресурс привода. Ресурс роботи повинен складати тисячі годин активного використання.

Висновки до розділу:

У першому розділі виконано комплексний аналітичний огляд сучасного стану та тенденцій розвитку роботів-газонокосарок. На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Завдяки переходу на літій-іонні (Li-ion) акумулятори, розвитку систем навігації та впровадженню алгоритмів штучного інтелекту роботи-косарки пройшли шлях від нішевих пристроїв до важливого сегмента ринку.

2. Після систематизації класифікації роботів за рівнем автономності, типом ріжучої системи, площею обробки та типом приводу визначено, що найбільш поширеними є повністю автономні моделі з роторною мульчуючою системою, які здатні обслуговувати ділянки від невеликих приватних садів до професійних гольф-полів.

3. Порівняльний аналіз методів навігації показав, що периметральний дріт залишається надійним та дешевим стандартом, проте спостерігається тенденція до переходу на бездротові системи (GPS-RTK та комп'ютерний зір), які спрощують експлуатацію та запуск косарки в роботу. Для безпечної роботи та орієнтації ефективним є використання комбінації ультразвукових, інфрачервоних датчиків та LiDAR, хоча останній суттєво здорожчує конструкцію.

4. Виявлено, що ефективність косіння значно підвищується при переході від хаотичного руху до систематичного (паралельними лініями, спіраллю) та адаптивного планування маршруту, що дозволяє зменшити час роботи та витрати енергії.

5. Встановлено, що основним джерелом енергії є акумуляторні батареї: домінують Li-ion завдяки високій щільності енергії та ресурсу, а LiFePO₄ розглядаються як перспективніші за довговічністю та безпекою.

2 ВИБІР ДВИГУНА ТА АКАМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Спочатку оберемо прототип на основі якого будемо виконувати подальші розрахунки. Після огляду ринку зупинимо свій вибір на моделі RC R-60 компанії RC Mowers [24], характеристики якої занесені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики RC R-60

Параметр	Значення
Вага, кг	840
Розміри, м	Д2.286 x Ш2.083 x В1.257
Ширина гусениці, м	0.24
Відстань між центрами гусениць, м	1.8
Висота зрізання, мм	63–178 мм
Ширина косіння, м	1.524
Радіус привідної зірки, м	0.11
Максимальна відкідість руху по землі, км/год	8.05
Максимальна робоча зона, м ²	12 500 (3.1 акра)
Місткість палива, л	45.4
Максимальна здатність долати підйоми	50°



Рисунок 2.1 – Обраний прототип

Дана модель була обрана так як вона відноситься до класу спеціалізованих, спеціально розроблених для роботи в екстремальних і небезпечних умовах, куди не можна відправляти людину. Це не просто косарка, а справжній гусеничний робот, створений для обслуговування великих площ та складних ландшафтів. Унікальність R-60 полягає у її здатності працювати на схилах із кутом нахилу до 50 градусів без використання допоміжної лебідки, на що роботи-косарки інших класів просто не здатні. Ця надзвичайна прохідність досягається завдяки низькому центру ваги, широкій гусеничній базі та спеціальній конструкції, що забезпечує максимальне зчеплення з ґрунтом. Призначена в першу чергу для комунальних служб, дорожніх компаній та підрядників, які працюють на крутих схилах, узбіччях доріг, під лініями електропередач і на водоймах, де ризик перекидання або падіння є занадто високим.

2.1 Розрахунок та підбір двигуна

Розрахунок будемо робити для найважчого режиму, а саме косіння на максимальній швидкості (6 км/год) під максимальним кутом який здатен подолати наш прототип (50°).

Нехай тахограма швидкості має вигляд наведений на рис.2.2.

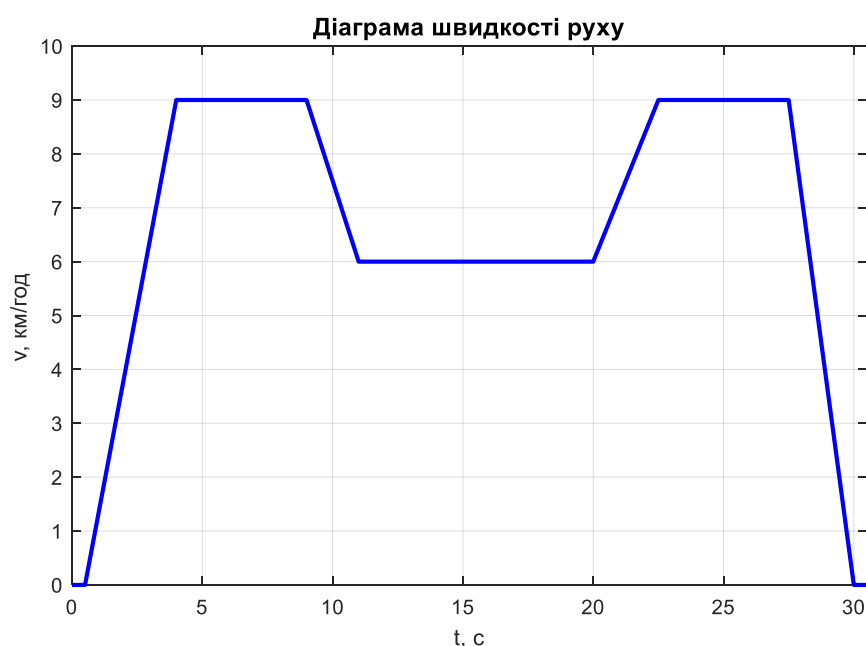


Рисунок 2.2 – Тахограма швидкості

Отже як бачимо робот-косарка плавно розганяється протягом 3.5 секунд, досягаючи транспортної швидкості 9 км/год, з цією швидкістю він рухається до зони обробки, після чого плавно зменшує швидкість до робочої - 6 км/год. На цій робочій швидкості він працює (косить) протягом певного проміжку часу. Після завершення роботи він знову плавно розганяється до транспортної. Він рухається на ній до місця призначення, а потім починає фінальне гальмування, доки робот повністю не зупиниться.

Спочатку розрахуємо статичні сили опору руху.

Статичні сили — це сили, що діють на робота постійно під час руху на схилі, незалежно від прискорення. Сумарна сила статичного опору це загальна сила, яку необхідно прикласти до коліс для підтримки рівномірного руху на схилі без прискорення та без косіння, її можна розрахувати як:

$$F_{ст} = F_r + F_a + F_g \quad (2.1)$$

Як бачимо сумарна сила статичного опору складається з сили тертя кочення F_r , сили аеродинамічного опору F_a , гравітаційної складової F_g .

Знайдемо кожну з цих компонент. Отже, сила тертя кочення визначається як:

$$F_r = mgf_r \cos(\alpha), \quad (2.2)$$

де f_r — коефіцієнт тертя кочення, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння, α — кут нахилу поверхні.

Коефіцієнт опору коченню (коефіцієнт тертя) — це безрозмірна величина, яка показує, яку частку від ваги машини потрібно прикласти, щоб просто штовхати її вперед по горизонталі. Для гусеничної техніки цей коефіцієнт завжди вищий, ніж для колісної, через тертя в самій гусениці та значну площу контакту.

Коефіцієнт f_r для гусениці — це сума трьох складових: $f_r = f_i + f_s + f_v$.

Коефіцієнт f_i – це внутрішні втрати, які виникають через тертя в підшипниках опорних котків та лівців, тертя зубів зірочки об гусеницю, через те що гумова стрічка постійно згинається і розгинається. Зазвичай він складає 0.03...0.06.

Коефіцієнт f_i залежить від деформації ґрунту. Основною складовою коефіцієнта є енергія, що витрачається на ущільнення землі під гусеницею (утворення колії). Якщо ґрунт м'який, перед гусеницею утворюється маленький валик землі, який треба постійно переїжджати. Зазвичай значення коефіцієнта варіюється в діапазоні 0.05...0.20.

Коефіцієнт f_v утворюється за рахунок опору рослинності, тому що гусениця та дека мусять пригинати та ламати стебла рослин. У густому бур'яні це створює величезний опір. Значення коефіцієнта варіюється в діапазоні 0.05...0.15.

Для подальших розрахунків використаємо два різні значення опорів. Перший коефіцієнт будемо використовувати для етапів коли косарка підїжджає до зони косіння (будемо рахувати, що на цій ділянці висота трави та її густина менше, адже ділянка вже була оброблена), другий – на етапі косіння, коли косарка заїжджає на ділянку з непокошеною травою та чагарниками. Для першого сценарію руху візьмемо коефіцієнт рівним 0.15, для другого – 0.35.

Також приймемо, що робот рухається до зони обробки на транспортній швидкості під кутом 20° , і вже підїжджаючи до зони косіння починає підйом на максимальний для себе кут, а саме 50° .

Тоді сила тертя кочення при русі на обох ділянках буде рівною:

$$F_{r1} = mgf_{r1} \cos(\alpha) = 840 \cdot 9.81 \cdot 0.15 \cdot \cos(20^\circ) = 1120.25 \text{ Н}, \quad (2.3)$$

$$F_{r2} = mgf_{r2} \cos(\alpha) = 840 \cdot 9.81 \cdot 0.35 \cdot \cos(50^\circ) = 1853.89 \text{ Н} \quad (2.4)$$

Оскільки рух відбувається по похилій площині, сила тяжіння розкладається на дві складові. Складова, що перешкоджає руху (тягне робота

назад вниз по схилу), залежить від синуса кута нахилу. Отже, гравітаційна складова для обох ділянок руху визначається за формулою:

$$F_{g1} = mg \sin(\alpha) = 840 \cdot 9.81 \cdot \sin(20^\circ) = 3482.54 \text{ Н} . \quad (2.5)$$

$$F_{g2} = mg \sin(\alpha) = 840 \cdot 9.81 \cdot \sin(50^\circ) = 6312.51 \text{ Н} . \quad (2.6)$$

Сила аеродинамічного опору визначається за формулою наведеною нижче:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S C_d (v - v_w)^2 , \quad (2.7)$$

де $\rho = 1.22 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ – густина повітря, S – площа фронтального перерізу транспортного засобу, C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, v – швидкість транспортного засобу, v_w – швидкість вітру.

Величина коефіцієнту аеродинамічного опору характеризує форму транспортного засобу. Виробники практично ніколи не публікують коефіцієнт аеродинамічного опору для корпусу робота-косарки, оскільки ця величина є практично незначною для його роботи. Головна причина – дуже низька швидкість руху. Корпус робота-косарки з точки зору аеродинаміки це тупе тіло, тобто воно не є обтічним. В таких випадках коефіцієнт аеродинамічного опору знаходиться в межах від 0.5 до 1. Для нашого випадку візьмемо середнє $C_d = 0.8$.

Приймемо, що швидкість вітру складає 8 км/год (2.2 м/с) і він є зустрічним та проведемо розрахунки для кожної швидкості транспортної діаграми, але спочатку треба перевести їх з км/год в м/с по формулі (2.8):

$$v(\text{м} / \text{с}) = \frac{v(\text{км} / \text{год}) \cdot 1000}{3600} = \frac{v(\text{км} / \text{год})}{3.6} , \quad (2.8)$$

отже лінійні швидкості обох ділянок діаграми швидкості в м/с будуть рівними:

$$v_{\text{тр}}(\text{м} / \text{с}) = \frac{v_{\text{тр}}(\text{км} / \text{год})}{3.6} = \frac{9}{3.6} = 2.5 \text{ м/с} , \quad (2.9)$$

$$v_{\text{роб}} (\text{м / с}) = \frac{v_{\text{роб}} (\text{км / год})}{3.6} = \frac{6}{3.6} = 1.667 \text{ м/с.} \quad (2.10)$$

Сила аеродинамічного опору для двох різних швидкостей буде рівною:

$$F_{a1} = \frac{1}{2} \rho S C_d (v_{\text{тр}} - v_w)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.22 \cdot (2.083 \cdot 1.257) \cdot 0.8 \cdot (2.5 + 2.2)^2 = 28.22 \text{ Н,} \quad (2.11)$$

$$F_{a2} = \frac{1}{2} \rho S C_d (v_{\text{тр}} - v_w)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.22 \cdot (2.083 \cdot 1.257) \cdot 0.8 \cdot (1.66 + 2.2)^2 = 19.04 \text{ Н} \quad (2.12)$$

Як бачимо сила аеродинамічного опору дійсно досить мала для таких об'єктів і нею можна нехтувати, але все одно врахуємо її в подальших розрахунках для більш точного відтворення технологічного процесу.

Тоді сумарна сила статичного опору обох ділянок згідно (2.3)-(2.6) та (2.11)-(2.12) дорівнює:

$$F_{\text{ст1}} = F_{r1} + F_{a1} + F_{g1} = 1120.25 + 28.22 + 3482.54 = 4631.01 \text{ Н,} \quad (2.13)$$

$$F_{\text{ст2}} = F_{r2} + F_a + F_g = 1853.89 + 19.04 + 6312.51 = 8185.43 \text{ Н.} \quad (2.14)$$

Тепер розрахуємо параметри за етапами циклу руху. Розрахунок виконується послідовно для кожного етапу діаграми: розгін, рівномірний рух, гальмування, косіння тощо.

Для обрахунку моменту на валу двигуна та потужності необхідно взяти до уваги передатне число редуктора. Попередньо оберемо передаточне число рівне $i_p = 10$.

Для вибору електродвигуна необхідно перерахувати сили опору на колесах у крутний момент на валу двигуна з урахуванням кінематичної схеми за формулою (2.11):

$$M_{\text{дв}} = \frac{F_{\Sigma} \cdot r}{N \cdot \eta \cdot i_p}, \quad (2.15)$$

де $F_{\Sigma} \cdot r$ – крутний момент на колесі; i_p – передаточне число редуктора; η – ККД редуктора, N – кількість двигунів.

Виконуємо ділення на i_p тому що редуктор збільшує момент на колесі, отже, двигуну потрібно створювати у i_p разів менший момент. Ділимо на η щоб врахування втрати енергії. Двигун повинен розвивати більшу потужність, щоб компенсувати тертя в зубчастій передачі.

Кутова швидкість розраховується за формулою:

$$\omega = \frac{v}{r} i_p, \quad (2.16)$$

Ми множимо на передаточне число, так як редуктор зменшує оберти колеса, отже вал двигуна обертається у i_p разів швидше.

Потужність двигуна можна отримати за формулою:

$$P_{дв} = M_{дв} \cdot \omega \quad (2.17)$$

Етап 1. Розгін до транспортної швидкості.

На цьому етапі привід повинен подолати статичний опір та додатково надати роботу кінетичну енергію (подолати інерцію маси в 840 кг).

Прискорення a_1 визначається як зміна швидкості за час розгону ($t_1 = 3.5$ с):

$$a_1 = \frac{v_{тр} - v_0}{\Delta t} = \frac{2.5 - 0}{3.5} = 0.714 \text{ м/с}^2. \quad (2.18)$$

Динамічна сила $F_{д1}$ згідно з другим законом Ньютона знаходиться як:

$$F_{д1} = m \cdot a_1 = 840 \cdot 0.714 = 599.8 \text{ Н}. \quad (2.19)$$

Повну силу тяги на першій ділянці знайдемо як:

$$F_{\Sigma 1} = F_{ст1} + F_{д1} = 4631.01 + 599.8 = 5230.81 \text{ Н}. \quad (2.20)$$

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_{дв1} = \frac{F_{\Sigma 1} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{5230.81 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 38.36 \text{ Нм}. \quad (2.21)$$

Максимальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{дв1}} = \frac{v_{\text{тр}} \cdot i}{r} = \frac{2.5 \cdot 10}{0.11} = 227.27 \text{ рад/с.} \quad (2.22)$$

Максимальна потужність згідно (2.10) знаходиться як:

$$P_{\text{дв1}} = M_{\text{дв1}} \cdot \omega_{\text{дв1}} = 38.36 \cdot 227.27 = 8718.07 \text{ Вт} = 8.72 \text{ кВт.} \quad (2.23)$$

Етап 2. Рівномірний рух на транспортній швидкості.

На даному етапі робот рухається без прискорення, тому сила тяги дорівнює сумі статичних сил:

$$F_{\Sigma 2} = F_{\text{ст1}} = 4631.01 \text{ Н.} \quad (2.24)$$

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв2}} = \frac{F_{\Sigma 2} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{4631.01 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 33.96 \text{ Нм,} \quad (2.25)$$

а максимальна потужність на етапі:

$$P_{\text{дв2}} = M_{\text{дв2}} \cdot \omega_{\text{дв1}} = 33.96 \cdot 227.27 = 7718.09 \text{ Вт} = 7.72 \text{ кВт.} \quad (2.26)$$

Етап 3. Гальмування до робочої швидкості за 2с.

На цій ділянці виконується сповільнення, отже прискорення буде від'ємне:

$$a_3 = \frac{v_{\text{роб}} - v_{\text{тр}}}{\Delta t} = \frac{1.67 - 2.5}{2} = -0.415 \text{ м/с}^2 \quad (2.27)$$

Динамічна сила $F_{\text{д3}}$:

$$F_{\text{д3}} = m \cdot a_3 = 840 \cdot (-0.415) = -348.6 \text{ Н,} \quad (2.28)$$

тоді повна сила тяги: $F_{\Sigma 3} = F_{\text{ст1}} + F_{\text{д3}} = 4631.01 - 348.6 = 4282.41 \text{ Н.}$

Крутний момент на валу двигуна складає:

$$M_{\text{дв3}} = \frac{F_{\Sigma 3} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{4282.41 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 31.41 \text{ Нм}. \quad (2.29)$$

Максимальна потужність (на початку гальмування):

$$P_{\text{дв3}} = M_{\text{дв3}} \cdot \omega_{\text{дв1}} = 31.41 \cdot 227.27 = 7138.55 \text{ Вт} = 7.14 \text{ кВт}. \quad (2.30)$$

Етап 4. Косіння.

На даному етапі додається сила різання $F_{\text{різ}}$. Прийmemo її рівною 900 Н, тоді повна сила тяги дорівнює: $F_{\Sigma 4} = F_{\text{ст2}} + F_{\text{різ}} = 8185.43 + 900 = 9085.43 \text{ Н}$.

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв4}} = \frac{F_{\Sigma 4} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{9085.43 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 67.36 \text{ Нм}. \quad (2.31)$$

Кутова швидкість на валу двигуна при робочій лінійній швидкості (2.10):

$$\omega_{\text{дв4}} = \frac{v_{\text{роб}} \cdot i}{r} = \frac{1.67 \cdot 10}{0.11} = 151.8 \text{ рад/с}. \quad (2.32)$$

Потужність на валу двигуна на даному етапі роботи згідно (2.17) та (2.32) буде дорівнювати:

$$P_{\text{дв4}} = M_{\text{дв4}} \cdot \omega_{\text{дв4}} = 67.36 \cdot 151.8 = 10225.25 \text{ Вт} = 10.23 \text{ кВт}. \quad (2.33)$$

Етап 5. Вихід на транспортну швидкість після косіння за 2.5 с.

На цій ділянці виконується розгін, отже прискорення буде додатне, на відміну від (2.27):

$$a_5 = \frac{v_{\text{тр}} - v_{\text{роб}}}{\Delta t} = \frac{2.5 - 1.67}{2.5} = 0.332 \text{ м/с}^2, \quad (2.34)$$

тоді динамічна сила тяги буде рівною $F_{\text{д5}} = m \cdot a_5 = 840 \cdot 0.332 = 278.88 \text{ Н}$, а повна сила тяги відповідно: $F_{\Sigma 5} = F_{\text{ст1}} + F_{\text{д5}} = 4631.01 + 278.88 = 4909.89 \text{ Н}$.

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв}5} = \frac{F_{\Sigma 5} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{4909.89 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 36.01 \text{ Нм}, \quad (2.35)$$

а отже потужність в кінці розгону:

$$P_{\text{дв}5} = M_{\text{дв}5} \cdot \omega_{\text{дв}1} = 36.01 \cdot 227.27 = 8183.99 \text{ Вт} = 8.18 \text{ кВт}. \quad (2.36)$$

Для 6 етапу (рівномірний рух на транспортній швидкості) розрахунки наводити не будемо, так як вони повністю збігаються з розрахунками для етапу 2, а зразу перейдемо до етапу 7.

Етап 7. Зупинка з транспортної швидкості.

На цьому етапі виконується сповільнення, отже прискорення буде від'ємне, як і для етапу 3:

$$a_7 = \frac{v_0 - v_{\text{тр}}}{\Delta t} = \frac{0 - 2.5}{2.5} = -1 \text{ м/с}^2. \quad (2.37)$$

Динамічна складова $F_{\text{д}7}$:

$$F_{\text{д}7} = m \cdot a_7 = 840 \cdot (-1) = -840 \text{ Н}, \quad (2.38)$$

тоді повна сила тяги: $F_{\Sigma 7} = F_{\text{ст}1} + F_{\text{д}7} = 4631.01 - 840 = 3791.01 \text{ Н}.$

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв}7} = \frac{F_{\Sigma 7} \cdot r}{N \cdot i \cdot \eta} = \frac{3791.01 \cdot 0.11}{2 \cdot 10 \cdot 0.75} = 27.8 \text{ Нм}. \quad (2.39)$$

Потужність на початку гальмування:

$$P_{\text{дв}7} = M_{\text{дв}7} \cdot \omega_{\text{дв}1} = 27.8 \cdot 227.27 = 6318.11 \text{ Вт} = 6.32 \text{ кВт}. \quad (2.40)$$

Тепер по розрахованим даним, можемо побудувати навантажувальну діаграму, яку наведено на другому графіку рис.2.3. Навантажувальна діаграма

є ключовим інструментом для правильного вибору двигуна. Вона дозволяє виконати перевірку двигуна на нагрівання та на перевантажувальну здатність.

Двигун може витримувати короточасні перевантаження, якщо потім йде пауза або робота з меншим навантаженням. Діаграма дозволяє розрахувати еквівалентне (середньоквадратичне) навантаження. Якщо вибрати двигун просто по піковому навантаженню, він буде занадто великим, важким та дорогим, якщо по середньому – він може згоріти.

Перевантажувальна здатність двигуна – це показник, який визначає, наскільки велике механічне навантаження (гальмівний момент на валу) може витримати двигун короточасно, не зупиняючись. Це одна з найважливіших характеристик для надійності роботи, особливо в умовах, де можливі різкі стрибки навантаження (наприклад, швидкий розгін, велике зусилля різання, втрата зчеплення, маневрування).

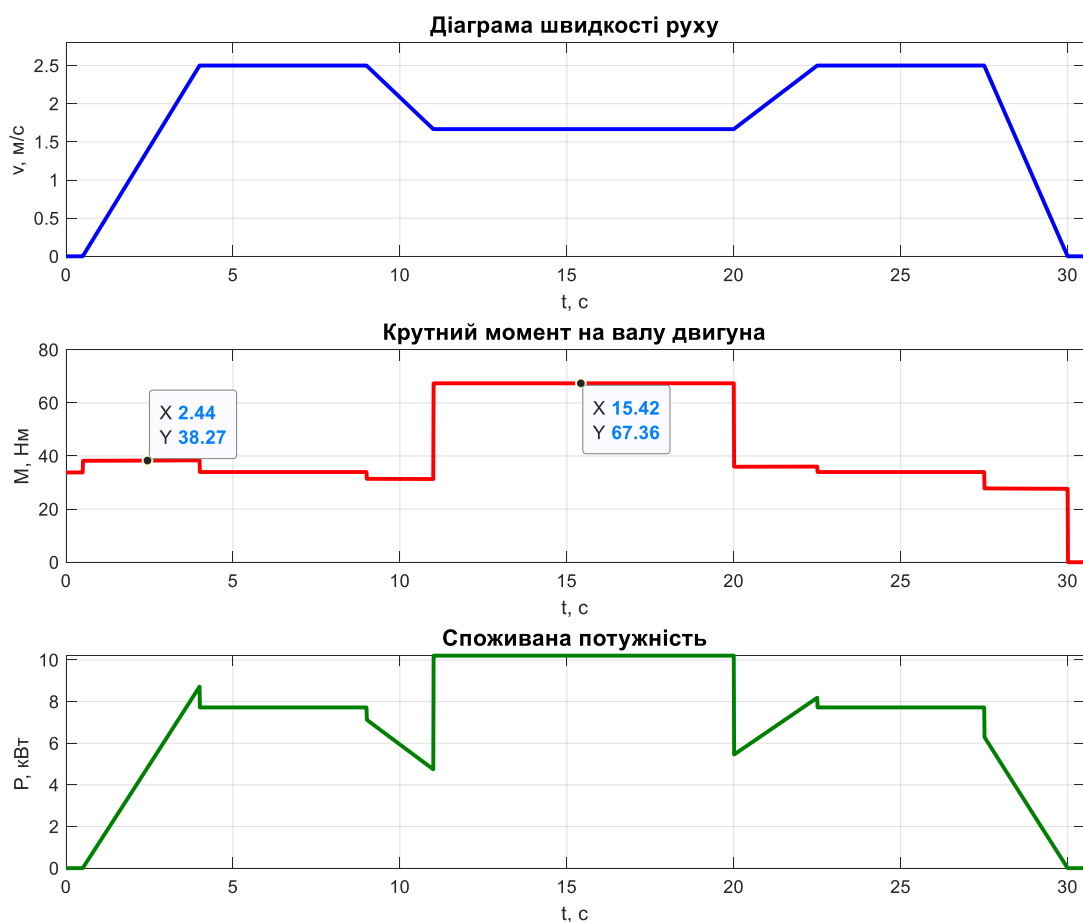


Рисунок 2.3 – Побудовані залежності в відповідності до наведених вище розрахунків

Тепер можемо підібрати двигун. Для цього скористаємося, згаданим вище, методом еквівалентного моменту та потужності для його підбору та перевірки. Отже, еквівалентний момент можна знайти за виразом (2.41):

$$M_E = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n (M_i^2 \cdot t_i)} = \sqrt{\frac{M_{\Sigma}}{t_{\text{ц}}}}, \quad (2.41)$$

де $t_{\text{ц}}$ – час циклу, M_{Σ} – сума квадратів моментів на кожному проміжку циклу.

Порахуємо $M_i^2 \cdot t_i$ на кожному етапі заданого циклу:

$$M_1 = M_{\text{дв1}}^2 \cdot t_1 = 38.36^2 \cdot 3.5 = 1471.49 \cdot 3.5 = 5150.22 \text{ Нм};$$

$$M_2 = M_{\text{дв2}}^2 \cdot t_2 = 33.96^2 \cdot 5 = 1153.28 \cdot 5 = 5766.4 \text{ Нм};$$

$$M_3 = M_{\text{дв3}}^2 \cdot t_3 = 31.41^2 \cdot 2 = 986.59 \cdot 2 = 1973.18 \text{ Нм};$$

$$M_4 = M_{\text{дв4}}^2 \cdot t_4 = 67.36^2 \cdot 9 = 4537.37 \cdot 9 = 40836.33 \text{ Нм};$$

$$M_5 = M_{\text{дв5}}^2 \cdot t_5 = 36.01^2 \cdot 2.5 = 1296.72 \cdot 2.5 = 3241.8 \text{ Нм};$$

$$M_6 = M_{\text{дв6}}^2 \cdot t_6 = 33.96^2 \cdot 5 = 1153.28 \cdot 5 = 5766.4 \text{ Нм};$$

$$M_7 = M_{\text{дв7}}^2 \cdot t_7 = 27.8^2 \cdot 2.5 = 772.84 \cdot 2.5 = 1932.1 \text{ Нм}.$$

Тепер знайдемо їх суму:

$$M_{\Sigma} = 5150.22 + 5766.4 + 1973.18 + 40836.33 + 3241.8 + 5766.4 + 1932.1 = 64666.4,$$

тоді еквівалентний момент буде рівний:

$$M_E = \sqrt{\frac{M_{\Sigma}}{t_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{64666.4}{32}} = 49.87 \text{ Нм}. \quad (2.42)$$

Еквівалентний момент в нас вийшов менше на 35% за максимальне значення моменту згідно навантажувальної діаграми, але варто враховувати що двигун більшу частину часу як раз і працює при такому моменті і якщо на навантажувальній діаграмі збільшити час роботи на цьому проміжку, бо в реальності двигун буде працювати достаньо довго при такому навантаженні, то і еквівалентний момент теж збільшиться.

Також необхідно врахувати коефіцієнт запасу, адже момент може бути і більшим, внаслідок налипання ґрунту на гусениці, зменшенню ККД системи внаслідок старіння підшипників і тд. Візьмемо коефіцієнт запасу рівним 1.2, тоді необхідний момент двигуна має складати:

$$M_{\text{дв}} = 1.2 \cdot M_{\text{Е}} = 1.2 \cdot 49.87 = 59.85 \text{ Нм}. \quad (2.43)$$

Еквівалентну потіжність знайдемо аналогічним способом. Спочатку знайдемо квадрат потужності на кожному етапі циклу:

$$P_1 = P_{\text{дв1}}^2 \cdot t_1 = 8.72^2 \cdot 3.5 = 266.13 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_2 = P_{\text{дв2}}^2 \cdot t_2 = 7.72^2 \cdot 5 = 297.99 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_3 = P_{\text{дв3}}^2 \cdot t_3 = 7.14^2 \cdot 2 = 101.96 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_4 = P_{\text{дв4}}^2 \cdot t_4 = 10.23^2 \cdot 9 = 941.88 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_5 = P_{\text{дв5}}^2 \cdot t_5 = 8.18^2 \cdot 2.5 = 167.28 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_6 = P_{\text{дв6}}^2 \cdot t_6 = 7.72^2 \cdot 5 = 297.99 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с};$$

$$P_7 = P_{\text{дв7}}^2 \cdot t_7 = 6.32^2 \cdot 2.5 = 99.86 \text{ кВт}^2 \cdot \text{с}.$$

Сума буде рівною:

$$P_{\Sigma} = 266.13 + 297.99 + 101.96 + 941.88 + \\ + 167.28 + 297.99 + 99.86 = 2173.09$$

тоді еквівалентна потужність знайдеться як:

$$P_{\text{Е}} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{t_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{2173.09}{29.5}} = \sqrt{73.66} = 8.59 \text{ кВт}. \quad (2.44)$$

Також враховуючи коефіцієнт запасу потужність буде рівною:

$$P_{\text{дв}} = 1.2 \cdot P_{\text{Е}} = 1.2 \cdot 8.59 = 10.31 \text{ кВт}. \quad (2.45)$$

Як видно з розрахунків (2.42) та (2.45) необхідний момент складає 59.85 Нм, а потужність 10.31 кВт, тому на основі цих значень оберемо двигун АИР 132 М4 (табл.2.2) та перевіримо його по перевантажувальній здатності.

Таблиця 2.2 - Паспортні дані двигуна АИР 132 М4

Параметр	Значення
Номінальна потужність	$P_{2n} = 11 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.09 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.884$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.87$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.3$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.029$
Критичне ковзання	$s_k = 0.195$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{x_1}' = 0.085$
Активний опір статора	$\overline{R_1}' = 0.043$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\overline{x_2}'' = 0.13$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R_2}'' = 0.032$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu} = 3.2$

Перевірка за перевантажувальною здатністю здійснюється відповідно методики яка наведена в [25]. При перевірці двигуна береться максимальний момент, а саме при розгоні, і протиставиться із максимальним моментом обраного двигуна:

$$\lambda \cdot M_H > M_{\max}, \quad (2.46)$$

де λ – перевантажувальна здатність двигуна, M_H – номінальний момент двигуна, M_{\max} – максимальний момент вибраний з навантажувальної діаграми.

Дана умова виконується:

$$\lambda M_H > M_{\max} = 2.3 \cdot 72.44 \text{ Нм} > 67.54 \text{ Нм} = 166.61 \text{ Нм} > 67.54 \text{ Нм}.$$

Перевірка на нагрів виконується за умови (2.47):

$$P_H \geq P_E. \quad (2.47)$$

Бачимо, що дана умова виконується:

$$11 \geq 10.31.$$

2.2 Розрахунок сумарного моменту інерції робота косарки

Для приведення маси робота-косарки до вала двигуна скористаємось методикою (2.48), яка наведена в [26, 27]:

$$J_{\text{мпр}} = m \cdot \frac{r^2}{i^2} + J_{\text{дв}} + \frac{1}{2} \cdot m_z \cdot \frac{r^2}{i^2} + m_g \cdot \frac{r^2}{i^2}, \quad (2.48)$$

де $J_{\text{мпр}}$ - приведений момент інерції робота-косарки, m - повна маса робота, r - радіус привідної зірки, i - передатне число редуктора, $J_{\text{дв}}$ - момент інерції двигуна, m_z - маса зірки, m_g - маса гусениці.

Нами попередньо був обраний редуктор з передатним числом $i=10$, виконаємо його перевірку. Для цього спочатку переведемо лінійну швидкість в кутову:

$$\omega_{\text{кол}} = \frac{v_{\text{роб}}}{r} = \frac{1.67}{0.11} = 15.18 \text{ рад/с},$$

тоді можемо знайти передаточне число редуктора як:

$$i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{кол}}} = \frac{152.52}{15.18} = 10.04.$$

Як бачимо попередньо підібране передаточне число відповідає дійсності.

Тоді, приведений момент інерції для робота-косарки визначимо як:

$$J_{\text{мпр}} = 840 \cdot \frac{0.11^2}{10^2} + 0.09 + \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot \frac{0.11^2}{10^2} + 55 \cdot \frac{0.11^2}{10^2} = 0.2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Прийmemo, що момент інерції редуктора рівний моменту інерції двигуна $J_p = 0.09, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Відтак, сумарний момент інерції даного механізму буде рівний :

$$J_{\Sigma} = J_{\text{мпр}} + J_p = 0.2 + 0.09 = 0.29, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.49)$$

2.3 Розрахунок номінальних параметрів двигуна

Знайдемо швидкість ідеального холостого ходу попередньо обраного двигуна:

$$\omega_{\text{xx}} = \frac{2\pi f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157.08 \text{ рад/с} . \quad (2.50)$$

Тоді номінальну швидкість двигуна знайдемо як:

$$\omega_n = \omega_{\text{xx}} (1 - s_n) = 157.08 \cdot (1 - 0.029) = 152.52 \text{ рад/с} . \quad (2.51)$$

Номінальний момент двигуна буде дорівнювати:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{11 \cdot 10^3}{152.52} = 72.12 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (2.52)$$

Критичний момент двигуна знаходиться по перевантажувальній здатності λ з каталогу, отже:

$$M_k = \lambda M_n = 2.3 \cdot 72.12 = 165.87 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (2.53)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{\text{ln}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} ; \quad (2.54)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos \varphi} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.884 \cdot 0.87} = 21.73 \text{ А} . \quad (2.55)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{\text{na}} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В} ; \quad (2.56)$$

$$I_{\text{na}} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 21.73 = 30.73 \text{ А} . \quad (2.57)$$

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

$$\Psi_{1\text{xx}} = \frac{U_{\text{na}}}{\omega_{0n}} = \frac{310}{314.16} = 0.98 \text{ Вб} . \quad (2.58)$$

2.4 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 2.4, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 2.5. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

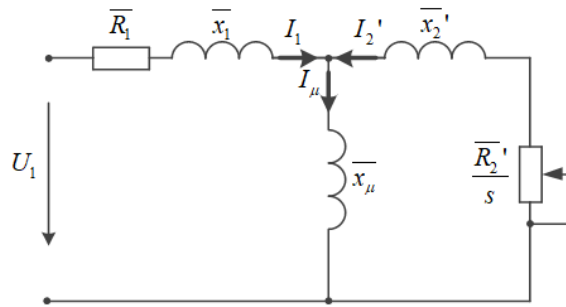


Рисунок 2.4 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

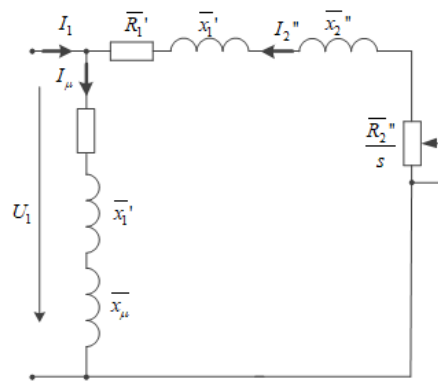


Рисунок 2.5 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4 \cdot \bar{x}_1' \bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{3.2 + \sqrt{3.2^2 + 4 \cdot 0.085 \cdot 3.2}}{2 \cdot 3.2} = 1.026. \quad (2.59)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\frac{\bar{x}_1}{c_1} = \frac{\bar{x}_1'}{c_1} = \frac{0.085}{1.026} = 0.083; \quad (2.60)$$

$$\frac{\bar{x}_2'}{c^2} = \frac{\bar{x}_2''}{c^2} = \frac{0.13}{(1.026)^2} = 0.123; \quad (2.61)$$

$$\overline{R_1} = \frac{\overline{R_1}'}{c_1} = \frac{0.043}{1.026} = 0.042; \quad (2.62)$$

$$\overline{R_2}' = \frac{\overline{R_2}''}{c^2} = \frac{0.032}{(1.026)^2} = 0.03. \quad (2.63)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \overline{x_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.083 \cdot \frac{220}{21.73} = 0.836 \text{ Ом}; \quad (2.64)$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.042 \cdot \frac{220}{21.73} = 0.423 \text{ Ом}; \quad (2.65)$$

$$x_2 = \overline{x_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0.123 \cdot \frac{220}{21.73} = 1.247 \text{ Ом}; \quad (2.66)$$

$$R_2 = \overline{R_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0.03 \cdot \frac{220}{21.73} = 0.307 \text{ Ом}; \quad (2.67)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 3.2 \cdot \frac{220}{21.73} = 32.307 \text{ Ом}. \quad (2.68)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.836}{314.16} = 0.0027 \text{ Гн}; \quad (2.69)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{1.247}{314.16} = 0.0040 \text{ Гн}. \quad (2.70)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{32.307}{314.16} = 0.1028 \text{ Гн}. \quad (2.70)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.1028 + 0.0027 = 0.1055 \text{ Гн}; \quad (2.71)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.1028 + 0.0040 = 0.1068 \text{ Гн}. \quad (2.72)$$

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

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.307}{0.1068} = 2.87 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (2.73)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.423}{0.1055} = 4.01 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (2.74)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.1055 \cdot \left(1 - \frac{0.1028^2}{0.1055 \cdot 0.1068} \right) = 0.0065 \text{ Гн}; \quad (2.75)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0.1028}{0.1068 \cdot 0.0065} = 148.48 \frac{1}{\text{Гн}}; \quad (2.76)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0.423}{0.0065} + 2.87 \cdot 0.1028 \cdot 148.48 = 109.14 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (2.77)$$

$$\mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.1028}{0.1068} = 1.44. \quad (2.78)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна АИР 132 М4 зведені до табл.

2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри двигуна АИР 132 М4

Параметр	Значення	Параметр	Значення
P_{2n} , кВт	11	R_1 , Ом	0.423
ω_{xx} , рад/с	157.08	R_2 , Ом	0.307
ω_n , рад/с	152.52	L_1 , Гн	0.1055
M_n , Нм	72.12	L_2 , Гн	0.1068
M_k	165.87	L_m , Гн	0.1028
λ	2.3	α_1 , Ом/Гн	4.01
I_{na} , А	30.73	α , Ом/Гн	2.87
ψ_{1xx} , Вб	0.99	β , 1/Гн	148.48
η	0.884	γ , Ом/Гн	109.14
$\cos \varphi$	0.87	σ , Гн	0.0065
J_d , кг·м ²	0.09		

2.5 Спрощений розрахунок перетворювача

Перетворювач частоти (англ. VFD – Variable Frequency Drive) — це електронний пристрій, який керує швидкістю обертання та моментом

електродвигуна змінного струму. Він дозволяє двигуну крутитися не з однією фіксованою швидкістю, а з тією, яка потрібна у конкретний момент.

Розрахунок перетворювача проведемо за методикою, яка наведена в [28]. Наведемо нижче амплітудні та фазні значення напруги та струму розраховані в пункті 2.3 за виразами (2.56 – 2.57), на основі яких будемо будувати наступні розрахунки:

$$U_n = 220 \text{ В}; \quad U_{na} = 311 \text{ В};$$

$$I_n = 0.99 \text{ А}; \quad I_{na} = 1.41 \text{ А}.$$

Схему розглянутого перетворювача відображено на рисунку 2.6.

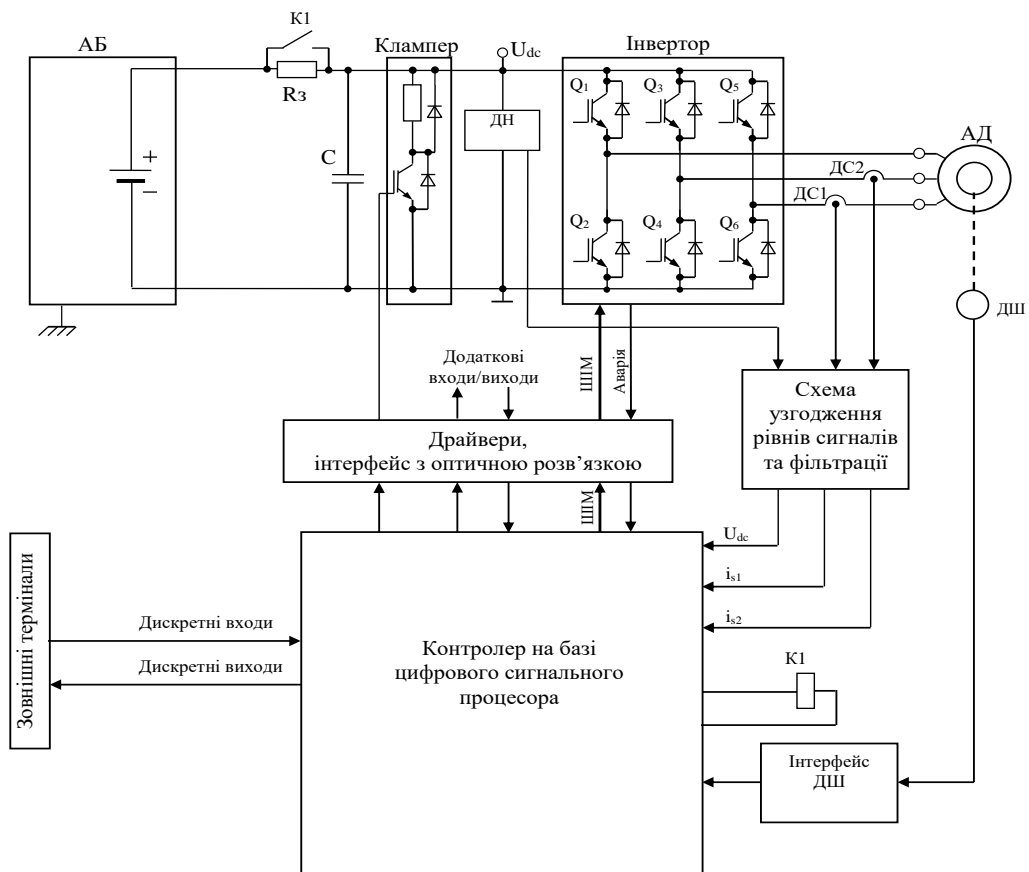


Рисунок 2.6 – Структурно-принципова схема системи керування приводом

Максимально можливе значення струму в фазі залежить від перевантажувальної спроможності електропривода k_{ovl} , яка залежить від виду механізму і змінюється в межах $k_{ovl} = (2 - 3)$. Виберемо $k_{ovl} = 3$. Отже, максимальний струм буде рівний:

$$I_{\max} = k_{\text{ovl}} \cdot I_{\text{na}} = 3 \cdot 30.73 = 92.19, \text{ A.} \quad (2.79)$$

Для вибору IGBT транзисторів для інверторів напруги, потрібно враховувати, що їх максимально дозволена зворотна напруга на колектор-емітері має бути в 1.5 і більше разів більшою, ніж максимальна напруга в ланці ПС, тобто

$$U_{\text{ce}} > 1.5 U_{\text{dc max}}$$

Максимальна напруга в ланці ПС сьогочасних перетворювачів визначається напругою встановлених конденсаторів фільтру, що складає близько 800 В для ПН з трифазним живленням $U_{\text{grid}} = 380 \text{ В}$.

Тобто:

$$U_{\text{ce}} = 1.5 \cdot 800 = 1200, \text{ В}$$

Оберемо IGBT модуль типу CP10TD1-24A [29] з основними параметрами $I_{\text{Cn}} = 100 \text{ А}$, $U_{\text{ce}} = 1200 \text{ В}$.

Враховуючи перевантаження, струм ланки постійного струму буде рівний:

$$I_{\text{dc}} = \frac{k_{\text{ovl}} \cdot P_{\text{n}}}{U_{\text{dcn}} \cdot \eta \cdot \eta_{\text{inv}}} = \frac{3 \cdot 11000}{540 \cdot 0.884 \cdot 0.95} = 72.77 \text{ А}, \quad (2.80)$$

де η_{inv} – коефіцієнт корисної дії інвертора.

Еквівалентний опір навантаження буде рівним:

$$R_0 = \frac{U_{\text{dcn}}}{I_{\text{dc}}} = \frac{540}{72.77} = 7.42 \text{ Ом}. \quad (2.81)$$

Ємність необхідного фільтра буде рівна:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{p}} \cdot m \cdot f \cdot R_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 175.89} = 35.74 \text{ мкФ}. \quad (2.82)$$

де k_{p} - коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги приймемо рівним 0.04 .

Для вимірювання значення напруги в ПС скористаємось датчиком типу LV-25NP [30]. Датчики вибираються за максимальним струмом, який вимірюється, тобто щоб вимірюваний діапазон обраного датчика був більшим за максимального струму в системі. На рисунку 2.7 зображено схему підключення.

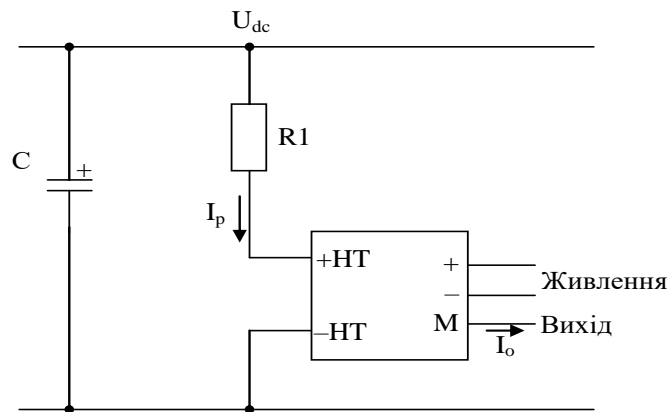


Рисунок 2.7 – Підключення датчика напруги

З інструкції обраного датчика відомо, що максимальний струм первинного кола $I_{pmax} = 14$ мА. Зважаючи на це, необхідне значення опору резистора R_1 буде рівна:

$$R_1 = \frac{U_{dc}}{I_{pmax}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом.} \quad (2.83)$$

Зі стандартного ряду оберемо резистор $R_1 = 56$ кОм.

2.6 Розрахунок акумуляторної батареї

Розрахуємо батарею напругою 48 В для умови неприривної роботи робота-косарки протягом 4 годин.

Спочатку визначимо, скільки електричної потужності споживає двигун від інвертора, щоб видати необхідну механічну потужність (прийmemo еквівалентне значення в якості такої потужності):

$$P_{ac} = \frac{P_{mech}}{\eta_{дв}} = \frac{10310}{0.884} = 11662.89 \text{ Вт.} \quad (2.84)$$

Далі визначаємо, яку потужність (постійного струму) інвертор має взяти від акумулятора, враховуючи власні втрати (прийmemo, що ККД складає 95%):

$$P_{dc} = \frac{P_{ac}}{\eta_i} = \frac{11662.89}{0.95} = 12276.73 \text{ Вт}. \quad (2.85)$$

Визначаємо, скільки всього енергії (у Вт·год) потрібно для 6 годин роботи:

$$E_{sum} = P_{dc} \cdot t = 12276.73 \cdot 6 = 73660.39 \text{ Вт} \cdot \text{год}. \quad (2.86)$$

Тепер переведемо необхідну енергію (Вт·год) у ємність А·год для 48-вольтової системи.

$$C = \frac{E_{sum}}{U_{dc}} = \frac{73660.39}{48} = 1534.59 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (2.87)$$

Звертаючись до пункту 1.6 першого розділу оберемо літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄). Так як їх не бажано розряджати повністю (лише на 80-90%), то повна номінальна ємність акумуляторної батареї має бути більшою за розраховану вище, а саме:

$$C_{\Sigma} = \frac{C}{0.9} = \frac{1534.59}{0.9} = 1705.11 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (2.88)$$

Виберемо акумулятори LG INR18650 [31] для побудови акумуляторної батареї, технічні дані наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні параметри акумулятора LiFePO₄ 18650

Параметр	Опис
Ємність	3200 мАгод
Напруга	3.2 В
Вага	45 г

Тепер можемо знайти загальну необхідну кількість акумуляторів, Отже кількість з'єднаних послідовно акумуляторів в ланці знайдемо як:

$$N_s = \frac{U_{dc}}{U_{cell}} = \frac{48}{3.2} = 15 \text{ шт}. \quad (2.89)$$

Кількість з'єднаних паралельно ланок:

$$N_p \geq \frac{C_\Sigma}{C_{\text{cell}}} \geq \frac{1705.11}{3.2} \geq 532.85 = 533 \text{ шт.} \quad (2.90)$$

Загальна кількість акумуляторів:

$$N = N_s N_p = 15 \cdot 533 = 7995 \text{ шт.} \quad (2.91)$$

Висновки до розділу

1. У розділі був наведений опис прототипу робота-косарки RC R-60, на базі якого виконано подальші силові та енергетичні розрахунки.
2. Розрахунки тягового електропривода проведено для найважчого режиму експлуатації — косіння на швидкості 6 км/год під кутом 50° , при цьому прийнято тахограму швидкості з ділянкою з транспортною швидкістю 9 км/год та переходами між цими швидкостями.
3. На основі сил опору та навантажувальної діаграми визначено найбільш навантажений етап роботи (косіння), для якого потрібний момент на валу двигуна 67.36 Нм і потужність 10.23 кВт.
4. За розрахованими вимогами обрано асинхронний двигун АИР 132 М4 та підтверджено його працездатність за перевантажувальною здатністю і перевіркою на нагрів.
5. Розраховано сумарний приведений момент інерції механізму до вала двигуна, отримано $J_\Sigma = 0.29 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, що є необхідним для подальшого моделювання динаміки привода.
6. Визначено номінальні параметри обраного двигуна та сформовано набір параметрів для математичної моделі (зокрема наведено параметри Т-подібної схеми заміщення та зведено їх у таблицю).

3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА САК АД

У цьому розділі виконано математичний опис об'єкта керування – асинхронного двигуна тягового електропривода робота-косарки, та наведено функціональну схему системи автоматичного керування. Математичний опис подано у двофазній обертовій системі координат $d - q$, що дозволяє перейти від трифазних змінних до еквівалентних складових струмів і потокозчеплень та забезпечити фізично зрозумілу інтерпретацію процесів: формування потокозчеплення (потокова складова) і створення електромагнітного моменту (моментна складова). Такий підхід є базовим для реалізації векторного керування асинхронним приводом, оскільки створює передумови для розділення каналів регулювання швидкості та потокозчеплення.

3.1 Математичний опис асинхронного двигуна

Сучасне векторне керування асинхронним ЕП ґрунтується на моделі ідеального двофазного АД в системі координат $(d - q)$, що обертається зі швидкістю ω та в параметри якої є сталими. Згідно [32, 33] дана математична модель описана рівняннями (3.1) – (3.10):

$$\frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_0 \Psi_{sq} + R_s I_{sd} = U_{sd} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_0 \Psi_{sd} + R_s I_{sq} = U_{sq} \quad (3.2)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \omega_{s1} \Psi_{rq} + R_r I_{rd} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \omega_{s1} \Psi_{rd} + R_r I_{rq} = 0 \quad (3.4)$$

$$\Psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} ; \quad \Psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \quad (3.5)$$

$$\Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} ; \quad \Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \quad (3.6)$$

$$\Psi_{md} = L_m I_{md} ; \quad \Psi_{mq} = L_m I_{mq} \quad (3.7)$$

$$I_{md} = I_{sd} + I_{rd} ; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq} \quad (3.8)$$

$$M_E = \frac{3z_p}{2} K_r (\Psi_{rd} I_{sq} - \Psi_{rq} I_{sd}) \quad (3.9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_L) \frac{1}{J} \quad (3.10)$$

де, M_E – електромагнітний момент двигуна; M_L – момент навантаження; J – сумарний момент інерції АЕП; z_p – кількість пар полюсів АД; ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна; $\omega_{s1} = \omega_0 - z_p \omega$ – кутова швидкість ковзання АД; R_s, R_r – активні опори статора та ротора відповідно, приведені до статора; L_m – взаємна індуктивність між статором та ротором; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$; $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно; а також:

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

$\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$ – компоненти узагальнених векторів струму статора;

$\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$ – компоненти узагальнених векторів струму ротора;

$\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$ – компоненти узагальнених векторів струму намагнічування;

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

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

$\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$ – компоненти узагальнених векторів головного потокозчеплення;

а K_r знаходиться як:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}. \quad (3.11)$$

Рівняння (3.5)–(3.8) пов'язують потокозчеплення зі струмами через повні та взаємні індуктивності, а (3.9)–(3.10) формують зв'язок між електромагнітною та механічною підсистемами через момент і динаміку кутової швидкості.

Важливою перевагою опису у $(d-q)$ координатах є можливість вибору орієнтації осей таким чином, щоб одна з них була пов'язана з вектором потокозчеплення ротора. Це спрощує керування, оскільки перетворює задачу керування асинхронним двигуном до задачі, подібної до керування двигуном постійного струму, де потокова складова струму відповідає за рівень потокозчеплення, а моментна – за електромагнітний момент. Подальше введення коефіцієнта K_r (3.11) використовується для компактного запису зв'язків між параметрами ротора та взаємною індуктивністю і є необхідним під час формування рівнянь у орієнтованій системі координат.

Якщо прийняти, що система координат (d,q) зорієнтована за вектором потокозчеплення ротора і обертається синхронно ним, тобто виражається у вигляді (3.12):

$$\Psi_{rq} = 0; \quad \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0; \quad \Psi_{rd} = \Psi_r = |\bar{\Psi}_r|, \quad (3.12)$$

то оновлена математична модель набуде вигляду продемонстрованому у рівняннях (3.13) – (3.16)

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = -\frac{\Psi_r}{T_r} + \frac{I_d L_m}{T_r} \quad (3.13)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{I_d R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sd}}{L'_s} + \frac{(\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r / T_r)}{L'_s} \quad (3.14)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\frac{I_q R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sq}}{L'_s} - \frac{(\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega)}{L'_s} \quad (3.15)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_L) \frac{1}{J} \quad (3.16)$$

де $I_q = I_{sq}$; $I_d = I_{sd}$ – відповідно моментна і потокова частина струму статора асинхронного двигуна.

Електромагнітний момент АД обчислюється за формулою (3.17):

$$M_E = \frac{3z_p}{2} K_r I_q \Psi_r, \quad (3.17)$$

де, $\Psi_r = |\bar{\Psi}_r|$; $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$; $T_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора та швидкість обертання Ψ_r рівна:

$$\omega_0 = \omega_{sl} + z_p \omega, \quad (3.18)$$

де $\omega_{sl} = K_r R_r I_q / \Psi_r$ – швидкість ковзання.

Опираючись на систему рівнянь (3.13 - 3.18) реалізується традиційне векторне керування асинхронним двигуном.

Електромагнітний момент визначається співвідношенням (3.17) і є пропорційним добутку $I_q \Psi_r$, що є основою принципу розділеного керування потоком і моментом. Швидкість ковзання ω_{sl} для (3.18) при цьому розраховується за моментною складовою струму I_q та оцінкою $\bar{\Psi}_r$, що і становить сутність непрямого векторного керування, де кут Θ_0 та синхронна швидкість формуються не шляхом прямого вимірювання потоку, а на підставі математичної моделі та вимірюваних електричних величин. Це зменшує вимоги до датчиків і забезпечує придатність структури для тягового привода, де важлива стійка робота при змінних навантаженнях.

3.2 Математичний опис інвертора

Інвертор напруги живить фази АД напругою з регульованими миттєвими значеннями амплітуди та фази які відповідають завданням

сигналам. Так як, ІН працює основоючись на ШІМ, то говориться про амплітуду і фазу вихідної напруги фаз інвертора першої гармоніки.

Оскільки інвертор напруги працює на основі ШІМ, вихідна напруга для електромеханічної підсистеми розглядається за першою гармонікою, а вплив комутації силових ключів проявляється як мала, але ненульова динамічна затримка у формуванні напруги статора. Тому інвертор доцільно описувати спрощено як ланку часового запізнення з передатною функцією (3.19) з подальшою апроксимацією аперіодичною ланкою першого порядку (3.20), оскільки період для комутації ключів буде визначати незначну сталу часу для контуру регулювання струму $T_u = T_k$. Це дає можливість врахувати інерційність силового каналу при налаштуванні контурів струму та забезпечити узгодження швидкодії регуляторів з реальною частотою комутації та періодом ШІМ.

$$W_{in}(p) = K_u e^{-\tau p} \quad , \quad (3.19)$$

де τ приймають рівним T_k .

Сьогодні в сучасних ІН, силовий модуль реалізується за допомогою IGBT транзисторів, які в мають змогу працювати з частотою ШІМ до 10 кГц та вище. Відповідно до цього період комутації для цих частот буде рівний $T_k = (1 - 0.1) \times 10^{-3} \text{ с}$.

$$W_{in}(p) = \frac{K_u}{T_u p + 1} \quad , \quad (3.20)$$

де $T_u = \tau$.

Урахування інвертора як ланки першого порядку особливо важливе для внутрішніх контурів I_d та I_q , оскільки саме вони повинні мати найбільшу швидкодію в каскадній структурі керування. Наявність сталої часу T_u фактично обмежує максимально досягну смугу пропускання регулювання струму, а отже впливає на точність формування моменту в динаміці. Саме

тому динамічні властивості ІН надалі враховуються у колах керування струмом через включення відповідної аперіодичної ланки, що буде враховано в наступному розділі при синтезі регуляторів струму.

3.3 Розробка функціональної схеми

Функціональна схема векторного керування АЕП наведено на рис. 3.1. В даній системі умовно виділяють силову частинну, частину векторних перетворень та частину регулювання.

В силову частину схеми включають акумуляторну батарею АБ, інвертор напруги ІН та асинхронний двигун АД.

До частини регулювання системи входить датчик швидкості ДШ, ПІ-регулятори струму статора РС1 та РС2, швидкості РШ, потокозчеплення РП та задавач інтенсивності ЗІ.

Частини векторних перетворень складається з блоків перетворення фаз ПФ1 та ПФ2, також, блоки координатного перетворення ПК1 і ПК2, блок зрівноваження зворотних зв'язків БКЗ та оцінювача потокозчеплення ротора ОПР.

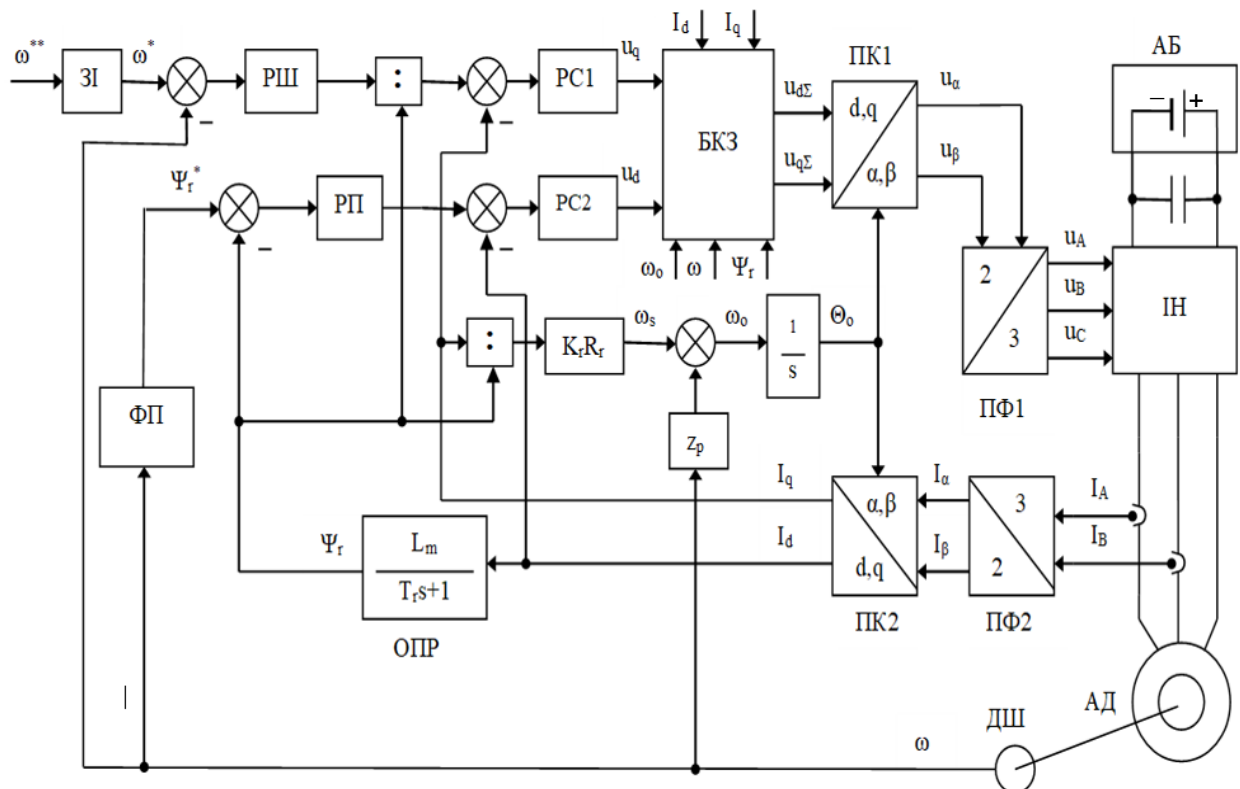


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САК АЕП

Функціональна схема на рис. 3.1 відображає типовий принцип векторного керування асинхронним приводом: зовнішній контур швидкості формує моментну складову струму I_q , а контур потокозчеплення — потокову складову I_d та I_q , після чого два незалежні контури струму забезпечують реалізацію цих завдань шляхом формування напруг u_q та u_d . Перетворення координат і фазові перетворення потрібні для переходу між вимірюваними трифазними струмами та регульованими величинами у систему координат (d-q). Таким чином, схема забезпечує керування швидкістю шляхом керування моментом двигуна при заданому потокозчепленні ротора.

У ПФ2 виміряні сигнали струму I_A, I_B трифазної системи А,В,С змінюються у струми I_α, I_β системи (α - β) відповідно зі співвідношенням (3.21):

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2 \cdot I_B) \frac{(I_A + 2 \cdot I_B)}{\sqrt{3}} \quad (3.21)$$

Далі блок ПК2 виконує перехід у обертову систему (d-q) за кутом Θ_0 , який визначає орієнтацію осей відносно вектора потокозчеплення за співвідношенням (3.22). У результаті регульовані складові I_d та I_q , отримують чітке фізичне трактування, що дозволяє застосувати ПІ-регулятори в кожному каналі й забезпечити стабільну роботу системи у широкому діапазоні швидкостей та навантажень.

$$I_d = I_\alpha \cos \Theta_0 + I_\beta \sin \Theta_0; \quad I_q = I_\beta \cos \Theta_0 - I_\alpha \sin \Theta_0 \quad (3.22)$$

де Θ_0 є кутом повороту вектора $\bar{\Psi}_r$.

Блок БКЗ реалізує компенсацію внутрішніх перехресних зв'язків моделі АД, які в обертовій системі координат проявляються у вигляді додаткових ЕРС і складових, пропорційних ω_0, Ψ_r, I_d та I_q . Введення коригуючих сигналів $u_{qк}$ та $u_{dк}$ (3.23) та їх додавання до виходу регуляторів струму (3.24) забезпечує зменшення взаємного впливу регулювання потоку та моменту. Це

підвищує точність відпрацювання струмів у перехідних режимах (розгін, гальмування, зміна навантаження) і, як наслідок, покращує якість регулювання швидкості тягового електропривода.

$$u_{dk} = \frac{-(L'_s \omega_0 I_q + K_r \Psi_r / T_r)}{K_u}; \quad u_{qk} = \frac{(L'_r \omega_0 I_d + K_r z_p \omega \Psi_r)}{K_u}, \quad (3.23)$$

де K_u – коефіцієнт передачі інвертора напруги.

$$u_{d\Sigma} = u_d + u_{dk}; \quad u_{q\Sigma} = u_q + u_{qk} \quad (3.24)$$

В ПК1 виконується протилежне перетворення з системи координат (d-q) у систему координат (α - β) згідно співвідношення (3.25):

$$u_\alpha = u_{d\Sigma} \cos \Theta_0 - u_{q\Sigma} \sin \Theta_0; \quad u_\beta = u_{d\Sigma} \sin \Theta_0 + u_{q\Sigma} \cos \Theta_0. \quad (3.25)$$

Потім в ПФ1 виконується перетворення з системи (α - β) в трифазну А,В,С, тобто сигнали u_α , u_β приймають вигляд завдання напруги АД u_A , u_B , u_C використовуючи вираз (3.26):

$$u_A = u_\alpha; \quad u_B = (-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta)/2; \quad u_C = (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta)/2. \quad (3.26)$$

Оцінювач потокозчеплення ротора ОПР забезпечує розрахунок модуля Ψ_r та кута Θ_0 вектора $\bar{\Psi}_r$ (3.27) відповідно з отриманими з рівняння (3.12) та (3.17) виразами (3.26), що є ключовим для підтримання правильної орієнтації осей d-q та збереження властивостей векторного керування.

$$\Psi_r(s) = I_d(s) \times \frac{L_m}{T_r s + 1}; \quad \Theta_0(t) = \int_0^t \omega_0(\tau) dt, \quad (3.27)$$

де s – перетворення Лапласа.

Функціональний перетворювач ФП забезпечує зміну завдання потокозчеплення ротора у зворотно пропорційній залежності до швидкості

двигуна, в другій зоні роботи, де швидкість більша від номінального значення [34]. ФП задає потік згідно з співвідношеннями:

$$\begin{aligned}\Psi^* &= \Psi_n \quad \text{при } |\omega| \leq \omega_n \\ \Psi^* &= \Psi_n \frac{\omega_n}{|\omega|} \quad \text{при } |\omega| \geq \omega_n\end{aligned}\tag{3.28}$$

Висновки до розділу

1. Складено математичну модель асинхронного двигуна у двофазній обертовій системі координат (d-q) та проведено орієнтацію моделі за вектором потокозчеплення ротора, що забезпечує можливість незалежного керування електромагнітним моментом (через складову струму I_q) та потоком (через складову I_d) двигуна. Наведена математична модель містить рівняння електричної та механічної підсистем і придатна для аналізу перехідних процесів електропривода.

2. Подано спрощену математичну модель інвертора напруги, де ланку запізнення апроксимовано аперіодичною ланкою першого порядку, що дозволяє врахувати динамічні обмеження силового каналу при налаштуванні контурів струму.

3. Розроблено та описано функціональну схему САК АЕП, у якій виділено силову частину, блоки векторних перетворень і підсистему регулювання зі швидкісним, потоковим та струмовими контурами. Пояснено призначення координатних перетворень і блоку компенсації внутрішніх зв'язків, що підвищує точність відпрацювання струмів по каналах d та q у перехідних режимах.

4. Отриманий математичний опис і функціональна схема формують основу для подальшого синтезу ПІ-регуляторів контурів струму, потокозчеплення та швидкості.

4 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ПРИВІДНОГО ДВИГУНА РОБОТА-КОСАРКИ

У цьому розділі виконано синтез регуляторів для векторно-керованого асинхронного тягового електроприводу робота-косарки. Структура системи керування побудована за принципом підпорядкованого регулювання: внутрішні контури забезпечують швидке та точне відпрацювання складових струму статора i_d та i_q , тоді як зовнішній контур формує закон зміни швидкості ω , а окремий контур підтримує заданий рівень потокозчеплення ротора Ψ_r . Така декомпозиція дозволяє наблизити асинхронний електропривод за динамікою до приводу постійного струму, де i_d визначає магнітний стан машини (потокозчеплення), а i_q – моментну складову, що безпосередньо впливає на тягове зусилля. Виконаємо синтез регуляторів враховуючи методику наведену в [35, 36].

4.1 Синтез регуляторів струму статора I_d та I_q

Контури струму є найшвидшими у системі керування, оскільки саме вони визначають якість розділення каналів керування i , як наслідок, точність реалізації векторного керування. Контур регулювання потокової компоненти i_d вектора струму статора має вигляд, показаний на рис. 4.1.

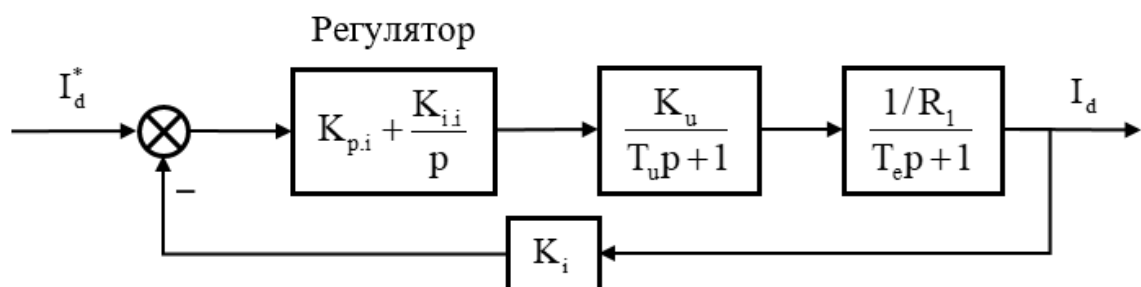


Рисунок 1 – Контур регулювання струму i_d

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (4.1)$$

Для налаштування контурів струму обрано критерій модульного оптимуму, оскільки він забезпечує високу швидкодію та близьку до аперіодичної форму перехідного процесу у внутрішніх контурах, що є критичним для тягового приводу робота-косарки. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{\text{пер.і}}(p) = \frac{R_1(T_e p + 1)}{2T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2T_u K_u K_i p}. \quad (4.2)$$

Отримуємо ІІІ-регулятор струму:

$$W_{\text{пер.і}}(p) = K_{\text{р.і}} + \frac{K_{\text{і.і}}}{p}, \quad (4.3)$$

де

$$K_{\text{р.і}} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i}; \quad K_{\text{і.і}} = \frac{R_1}{2T_u K_u K_i}; \quad K_u = 311 \text{ В}; \quad T_u = 0.001. \quad (4.4)$$

Далі розрахуємо параметри необхідні для (4.3). Отже:

$$R_1 = R_c + \left(\frac{L_M}{L_2}\right)^2 R_p = 0.423 + \left(\frac{0.1028}{0.1068}\right)^2 \cdot 0.307 = 0.707 \text{ Ом}, \quad (4.5)$$

де R_c та R_p – активні опори статора та ротора, відповідно, що розраховані в (2.65) та (2.67);

$$T_e = \frac{L_{1\sigma} + \frac{L_M}{L_2} L_{2\sigma}}{R_1} = \frac{0.0027 + \frac{0.1028}{0.1068} \cdot 0.0040}{0.423} = 0.0155 \text{ с}. \quad (4.6)$$

Підставивши числові значення R_1, K_u, T_u, T_e, K_i до формул (4.4), отримаємо числові значення коефіцієнтів ІІІ-регулятора струму:

$$K_{\text{р.і}} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} = \frac{0.0155 \cdot 0.707}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 0.0176; \quad (4.7)$$

$$K_{i,i} = \frac{R_1}{2T_u K_u K_i} = \frac{0.707}{2 \cdot 0.001 \cdot 311 \cdot 1} = 1.1378. \quad (4.8)$$

Параметри ПІІ-регуляторів струму визначено з урахуванням прийнятого коефіцієнта зворотного зв'язку $K_i = 1$, для спрощення моделювання.

Передаточна функція розімкненого контуру разом з регулятором має вигляд:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1)}. \quad (4.9)$$

Передаточна функція замкненого контуру разом з регулятором має вигляд:

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p (T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{10^{-6} p^2 + 0.001 p + 1}. \quad (4.10)$$

Так як $T_u^2 = 10^{-6} \text{ с}^2$ – дуже мала величина, то для спрощення нею можна знехтувати. Тоді передаточна функція замкненого контуру регулювання струму i_d мати вигляд наведений в (4.11), де у підсумку замкнений контур струму зводиться до еквівалентної першопорядкової ланки з малою сталою часу, що підтверджує досягнення високої швидкодії внутрішнього контуру та створює необхідний запас по швидкодії відносно зовнішніх контурів (швидкості та потокозчеплення).

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1} = \frac{1}{0.002 p + 1}. \quad (4.11)$$

Контур регулювання моментної компоненти вектора струму статора I_q має вигляд, аналогічний контуру регулювання струму I_d та показаний на рис.4.2.

Синтез регулятора струму i_q проводиться аналогічно синтезу регулятора струму i_d , оскільки їхні об'єкти регулювання прийняті ідентичними за структурою та параметрами. Це спрощує подальшу реалізацію

системи керування та підвищує її відтворюваність при налаштуванні на реальному приводі.

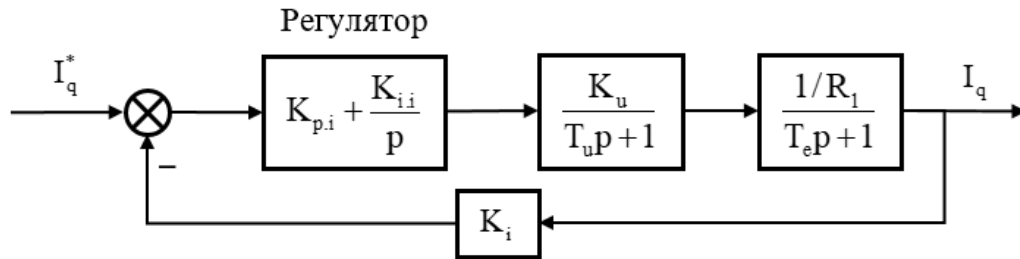


Рисунок 4.2 – Контур регулювання струму i_q

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{\text{роз.с}}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)} \quad (4.12)$$

Налаштування контуру регулювання також будемо робити на модульний оптимум. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.і}}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2T_u K_u K_i p} \quad (4.13)$$

Маємо ПІ-регулятор струму:

$$W_{\text{рег.і}}(p) = K_{p,i} + \frac{K_{i,i}}{p}, \quad (4.14)$$

де

$$\begin{aligned} K_{p,i} &= \frac{T_e R_1}{2T_u K_u K_i}; & K_{i,i} &= \frac{R_1}{2T_u K_u K_i}; \\ K_u &= 311 \text{ В}; & T_u &= 0.001 \text{ с}; \\ R_1 &= 0.707 \text{ Ом}; & T_e &= 0.0155 \text{ с}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Підставивши значення (4.15) в (4.14) отримуємо числові значення коефіцієнтів ПІ-регулятора струму, що є ідентичними до (4.7)-(4.8) за рахунок ідентичних параметрів об'єкту регулювання :

$$\begin{aligned} K_{p,i} &= 0.0176; \\ K_{i,i} &= 1.1378. \end{aligned} \quad (4.16)$$

4.2 Синтез регулятора швидкості

Контур швидкості є зовнішнім відносно контурів струму, тому його налаштування виконується з урахуванням уже динаміки внутрішніх контурів. Контур регулювання швидкості електроприводу ω має вигляд, показаний на рис. 4.3.

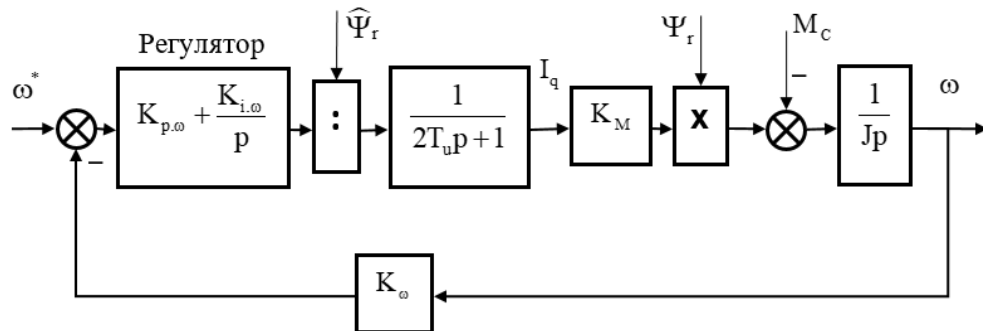


Рисунок 4.3 – Контур регулювання швидкості ω

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{\text{роз.ш}}(p) = \frac{K_M K_\omega}{(2T_u p + 1) J p}. \quad (4.17)$$

Об'єкт регулювання швидкості (4.17) включає момент інерції J , що робить систему чутливою до збурень моменту навантаження (опір коченню, технологічне навантаження під час косіння і т.д.). З огляду на це налаштування виконано за критерієм симетричного оптимуму, який забезпечує компроміс між швидкодією, запасами стійкості та здатністю до пригнічення збурень у системах з інтегруючою механічною ланкою.

Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = \frac{J(8T_u p + 1)}{32T_u^2 K_M K_\omega p} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega} + \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega p}, \quad (4.18)$$

де $J = 0.29 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – сумарний момент інерції двигуна та механізму.

Виходячи з (4.18) маємо наступний вигляд ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{\text{рег.ш}}(p) = K_{p,\omega} + \frac{K_{i,\omega}}{p}, \quad (4.19)$$

де

$$K_{p,\omega} = \frac{J}{4T_u K_M K_\omega}; \quad K_{i,\omega} = \frac{J}{32T_u^2 K_M K_\omega}. \quad (4.20)$$

Коефіцієнт K_M знаходиться наступним чином:

$$K_M = \frac{3pL_M}{2L_p} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.1028}{2 \cdot 0.1068} = 2.885. \quad (4.21)$$

Для спрощення моделювання приймаємо коефіцієнт зворотного зв'язку $K_\omega = 1$. Тому на вхід контуру подається номінальне значення швидкості $\omega_n = 152.52$ рад / с.

Підставивши числові значення T_u, K_M, K_ω, J до формул (4.18), отримаємо числові значення коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості:

$$\begin{aligned} K_{p,\omega} &= 25.1; \\ K_{i,\omega} &= 3137.06. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Передаточна функція розімкненого контуру разом з регулятором має вигляд:

$$W_{\text{роз.ш}}(p) = \frac{8T_u p + 1}{8T_u p} \cdot \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1)}. \quad (4.23)$$

Передаточна функція замкненого контуру разом з регулятором має вигляд:

$$W_{\text{зам.ш}}(p) = \frac{8T_u p + 1}{64T_u^3 p^3 + 32T_u^2 p^2 + 8T_u p + 1} = \frac{0.008p + 1}{6.4 \cdot 10^{-8} p^3 + 32 \cdot 10^{-6} p^2 + 0.008p + 1}. \quad (4.24)$$

Отримана передаточна функція замкненого контуру (4.26) надалі може бути використана для перевірки показників якості (час встановлення, перерегулювання, статична похибка) при моделюванні типових режимів руху робота-косарки.

4.3 Синтез регулятора потокозчеплення

Регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r необхідне для забезпечення стабільного магнітного стану асинхронної машини в широкому діапазоні навантажень і швидкостей, а також для коректної роботи системи векторного керування.

Контур регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r має вигляд, показаний на рис. 4.4.

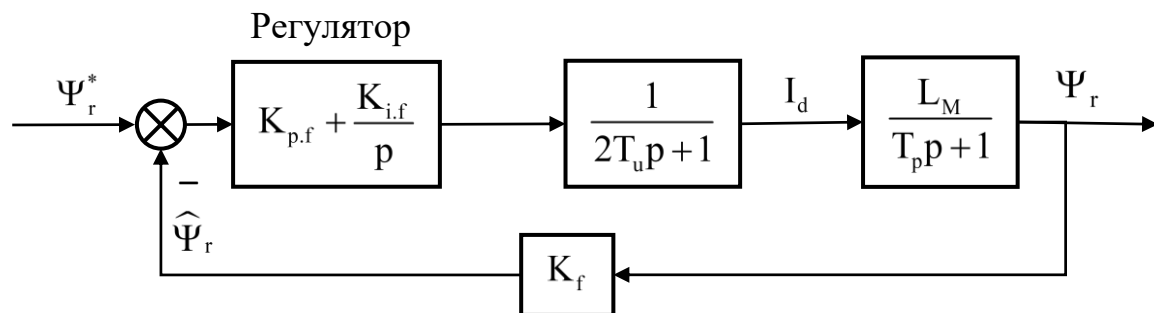


Рисунок 4.4 – Контур регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{L_M K_f}{(2T_u p + 1)(T_p p + 1)}. \quad (4.25)$$

Налаштування контуру регулювання будемо робити на модульний оптимум, що дозволить отримати швидкий перехідний процес без значних коливань. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = \frac{T_p p + 1}{4T_u L_M K_f p} = \frac{T_p}{4T_u L_M K_f} + \frac{1}{4T_u L_M K_f p}. \quad (4.26)$$

З (4.26) видно, що маємо ПІ-регулятор потокозчеплення ротора:

$$W_{\text{рег.п}}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p}, \quad (4.27)$$

де

$$K_{p.f} = \frac{T_p}{4T_u L_M K_f}; \quad K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_M K_f}. \quad (4.28)$$

Далі розрахуємо параметри необхідні для (4.26). Отже:

$$T_p = \frac{L_2}{R_p} = \frac{0.1068}{0.307} = 0.3479 \text{ с}; \quad (4.29)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку приймемо як і для попередніх контурів рівним одиниці для спрощення розрахунків та моделювання: $K_f = 1$.

Підставивши числові значення T_u, T_p, L_M, K_f до формул (4.28), отримаємо числові значення коефіцієнтів ПІ-регулятора потокозчеплення:

$$K_{p.f} = \frac{T_p}{4T_u L_M K_f} = \frac{0.3479}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.1028 \cdot 1} = 845.855; \quad (4.30)$$

$$K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_M K_f} = \frac{1}{4 \cdot 0.001 \cdot 0.1028 \cdot 1} = 2431.1. \quad (4.31)$$

Передаточна функція розімкненого контуру разом з регулятором має вигляд:

$$W_{\text{роз.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p (2T_u p + 1)}, \quad (4.32)$$

а передаточна функція замкненого контуру разом з регулятором матиме вигляд:

$$W_{\text{зам.п}}(p) = \frac{1}{4T_u p (2T_u p + 1) + 1} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-6} p^2 + 0.004p + 1}. \quad (4.33)$$

Висновки до розділу

1. Для внутрішніх контурів струму i_q та i_d виконано синтез ПІ-регуляторів за модульним оптимумом для забезпечення високої швидкодії та отримані наступні значення коефіцієнтів $K_{p.i} = 0.0176$, $K_{i.i} = 1.1378$. Також показана можливість спрощення замкненого контуру до першого порядку (4.11).

2. Для зовнішнього контуру швидкості застосовано симетричний оптимум який забезпечує компроміс між швидкодією та здатністю до пригнічення збурень. Із урахуванням сумарного моменту інерції $J = 0.29 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ отримано наступні значення коефіцієнтів регулятора швидкості: $K_{p,\omega} = 25.1$, $K_{i,\omega} = 3137.06$.

3. Виконано синтез ПІ-регулятора потягозчеплення ротора за модульним оптимумом та визначено його параметри, що завершує розрахункове формування системи керування і дає змогу перейти до дослідження динамічних та статичних режимів роботи системи автоматичного керування тягового привода робота-косарки.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АЕП РОБОТА-КОСАРКИ

У цьому розділі виконується математичне моделювання системи векторного керування за швидкістю асинхронним електроприводом тягового привода промислового робота-косарки. Потреба в такому моделюванні зумовлена характером експлуатації машини: привід працює в умовах частих розгонів і гальмувань, переходів між транспортною та робочою швидкостями, а також при змінному навантаженні, що визначається ухилами поверхні, зчепленням гусениць із ґрунтом, нерівностями рельєфу та додатковим опором під час процесу косіння. Для таких режимів критичними є швидкодія й стійкість системи, мінімальні просідання та коливання швидкості під дією збурень і забезпечення необхідної тягової здатності без перевантаження двигуна та перетворювача частоти.

Векторне керування обране як базовий принцип керування асинхронним двигуном, оскільки воно забезпечує керування двигуном через перетворення координат і розділення складових струму у синхронно обертовій системі координат. У структурі керування швидкістю основним є зовнішній контур регулювання кутової швидкості, який формує завдання на момент, за рахунок складової струму i_q . Таким чином, момент не є безпосередньо керованою величиною, а виступає керуючим впливом, що автоматично формується регулятором швидкості для компенсації навантаження і забезпечення потрібної динаміки руху робота.

5.1 Дослідження при роботі в першій зоні керування швидкістю з виходом в другу зону

В цьому пункті відтворимо характер навантаження подібний до побудованої навантажувальної діаграми в розділі 3. Згідно діаграми швидкості ми розганяємося з 0 рад/с до транспортної 228.9 рад/с за 3.5 секунди, причому в момент часу рівний 2.8 секундам відбувається перехід з першої зони швидкості в другу за рахунок ослаблення поля. Ми рухаємося на даній

швидкості певний проміжок часу та в 9 секунд починаємо гальмувати до максимальної робочої швидкості, яка відповідає номінальній швидкості двигуна, а саме 152,5 рад/с, чим самим знову переходимо в першу зону керування швидкістю. Далі працюємо на цій швидкості виконуючи технологічний процес (різання рослинності) і після виконання процесу знову виходимо на транспортну швидкість переходячи в другу зону керування звідки вже виконується повна зупинка робота.

Задана траєкторія швидкості, моменту навантаження та потоку наведена на рис.5.1.

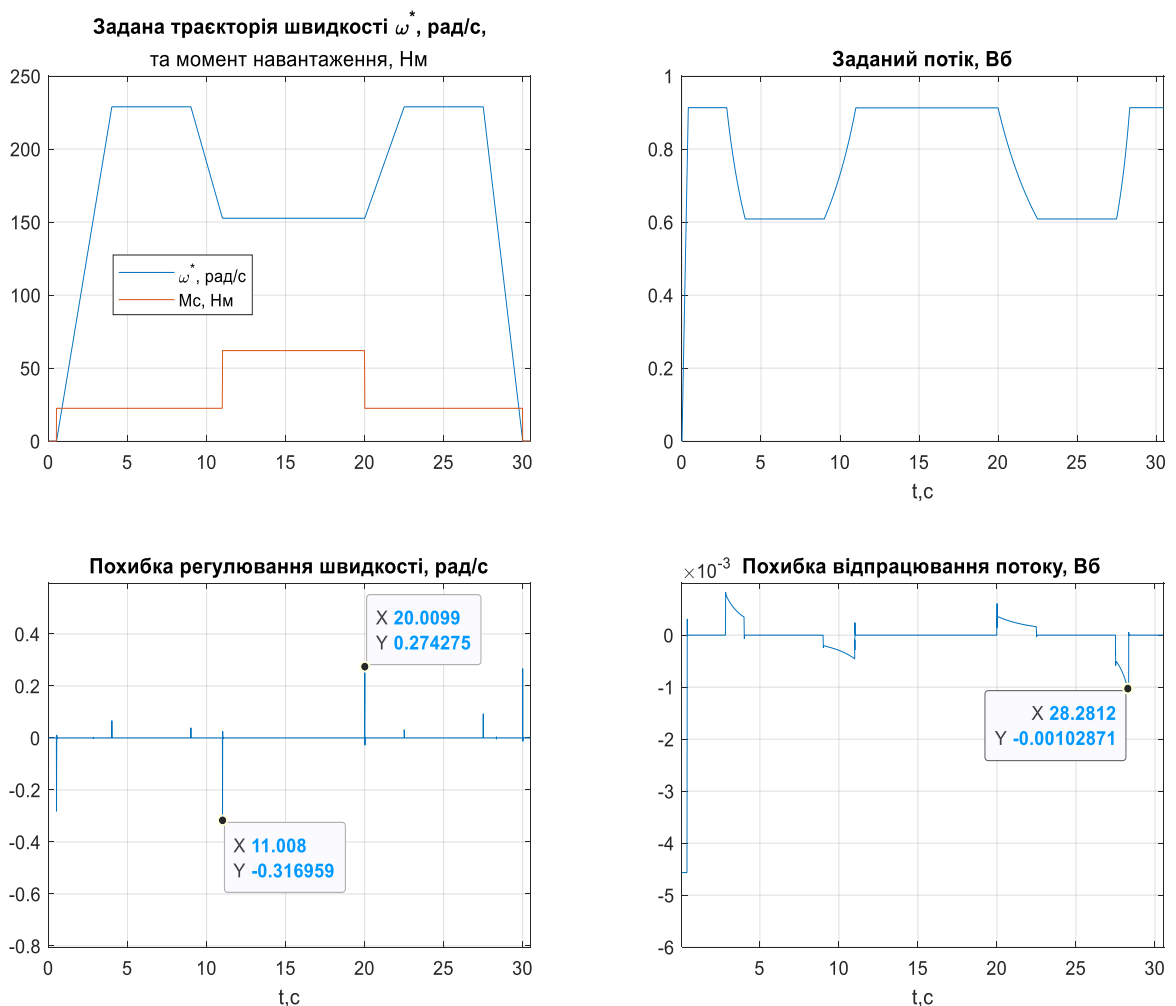


Рисунок 5.1 – Задана швидкість та потік та їх похибки відпрацювання

Моделювання відбувалося за умови що, на транспортній швидкості робот підїжджає до зони косіння, де заїжджає на поверню з максимальним кутом нахилу, а саме 50° , проте на транспортній швидкості робот тяж

рухається під кутом, а не по рівній поверхні, проте цей кут значно менше та складає 20° . Саме тому момент навантаження присутній весь час, тому що роботу потрібно долати ухил, щоб продовжувати рух. На транспортній швидкості момент становить приблизно 22 Нм, а в момент косіння зростає до 62 Нм.

Помітно, що заданий потік в інтервалах високої швидкості (ділянки транспортного руху) зменшується приблизно до 0,6 Вб, тоді як на ділянці робочої швидкості він підтримується близько 0,9 Вб. Це відповідає принципу ослаблення поля: за збільшення швидкості напруга, необхідна для підтримання потоку, зростає, і для недопущення насичення по напрузі інвертора потік знижують, забезпечуючи роботу привода у другій зоні регулювання.

Нижній лівий графік відображає похибку регулювання швидкості. В усталених режимах похибка практично дорівнює нулю, що свідчить про високу точність контуру швидкості. Максимальні відхилення спостерігаються в перехідних режимах, зокрема під час переходу на робочу швидкість та одночасного прикладання підвищеного навантаження фіксується короточасне від'ємне відхилення близько $-0,32$ рад/с. Додатковий імпульс похибки виникає в момент переходу до повторного розгону з робочої до транспортної швидкості, де зафіксовано додатне відхилення близько $0,27$ рад/с. Такий характер похибки є типовим: короткі відхилення виникають у моменти різкої зміни навантаження, після чого похибка швидко згасає.

Нижній правий графік показує похибку відпрацювання потоку. Похибка складає тисячні мілівебера в моментпочатку зміни потоку та швидко зменшується, що підтверджує достатню швидкодію внутрішнього контуру потоку (вісь d).

На наступному рисунку зображені компоненти напруги u_a та струму i_a статора та потокозчеплення Ψ_a . Перехідні процеси напруги u_b , потокозчеплення Ψ_b та струму i_b на графіках немає сенсу наводити, так як вони аналогічні тим, що на рис.5.1, тільки зміщені відносно них на 90 градусів.

Також на цьому рисунку наведені реальна траєкторія швидкості та момент двигуна у відносних одиницях.

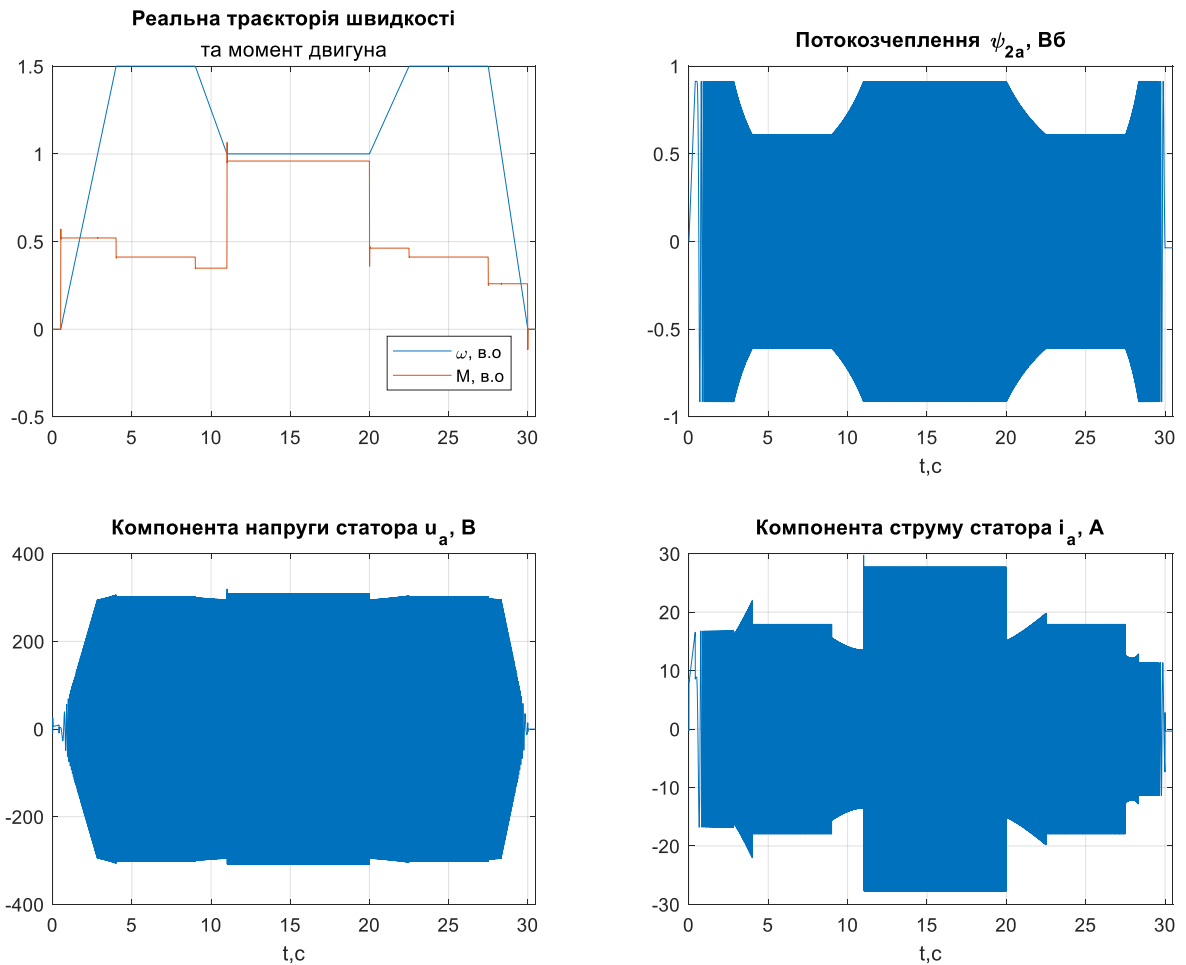


Рисунок 5.2 – Перехідні процеси при першому досліді

Момент двигуна змінюється узгоджено з динамікою швидкості: на ділянках розгону він підвищується для створення динамічної складової, у режимі усталеного руху приймає значення, необхідне для компенсації моменту опору, а в інтервалі 11...20 с спостерігається суттєве збільшення моменту, що відповідає прикладанню підвищеного моменту навантаження на етапі косіння рослини.

Потокозчеплення має змінну амплітуду, що відповідає переходу між режимом номінального потоку та ослаблення поля. Нижній лівий графік відображає компоненту фазної напруги статора u_a . Напряга формується інвертором і має високочастотну ШІМ-структуру. За графіком видно, що в

режимах підвищеної швидкості її рівень наближається до граничних значень, що додатково підтверджує актуальність ослаблення поля саме на цих ділянках.

Нижній правий графік показує компоненту фазного струму статора i_a , також із характерною високочастотною структурою. Помітно, що в інтервалі підвищеного навантаження струм зростає до більшого рівня (приблизно до 28 А), що є наслідком збільшення електромагнітного моменту.

Розглянемо перехідні процеси потоко- та моментоутворюючого струму наведені на рис.5.3.

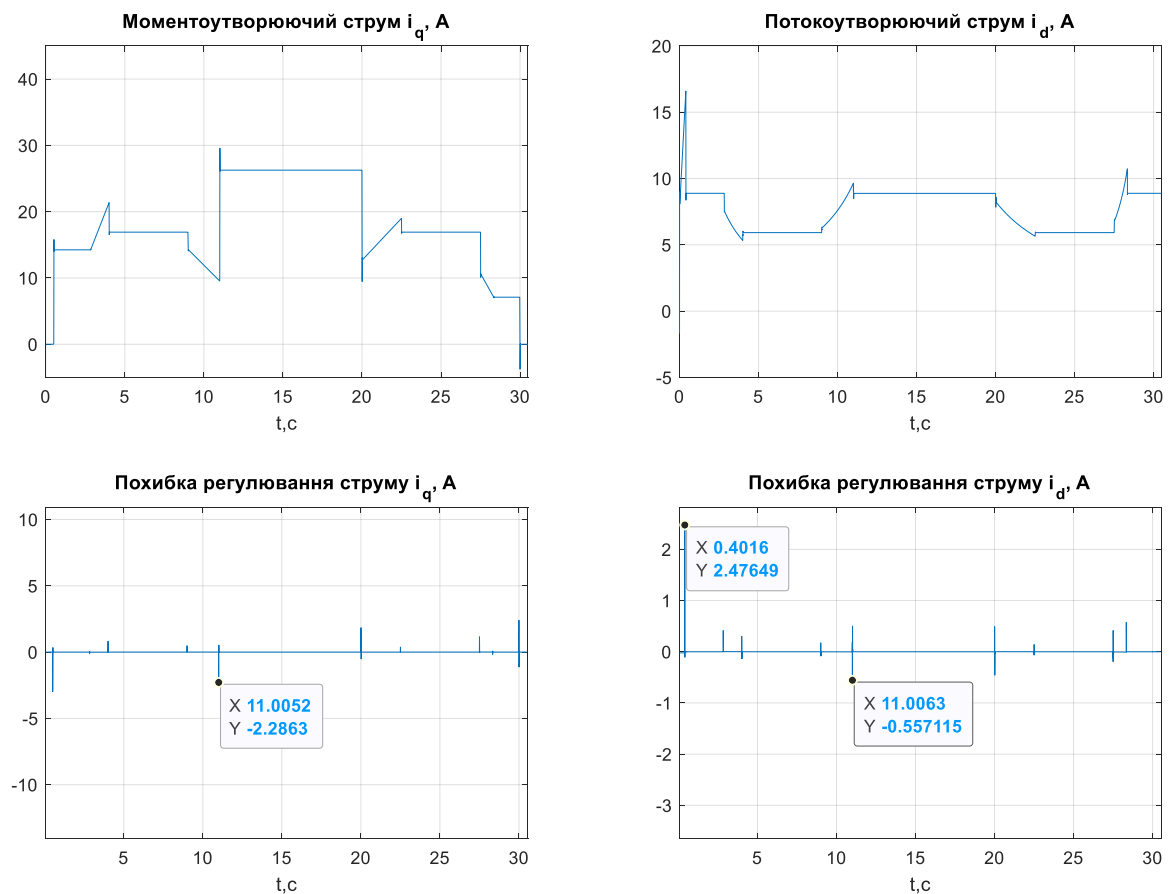


Рисунок 5.3 – Перехідні процеси струмів i_q та i_d та їх похибки

Зміна моментоутворюючого струму i_q прямо відображає формування електромагнітного моменту: на ділянках розгону i_q підвищується, у режимі усталеного руху зменшується до рівня, що компенсує опір, а в інтервалі підвищеного навантаження спостерігається різкий перехід до більшого значення, що забезпечує потрібний приріст моменту. Після зняття навантаження струм зменшується, а під час кінцевого гальмування прямує до

нуля й може короткочасно набувати від'ємних значень, що відповідає гальмівному моменту. На відміну від i_q , потокутворюючий струм змінюється відповідно до потоку: у режимі ослаблення поля i_d має менший рівень ~ 6 А, а в режимі номінального потоку зростає до ~ 9 А.

Нижні два графіки відображають похибки регулювання струмів i_q та i_d . У більшості часу похибки близькі до нуля, що підтверджує високу точність і швидкодію внутрішніх струмових контурів. Найбільші короткочасні відхилення виникають у моменти різкої зміни навантаження: для i_q помітна похибка близько 2.29 А в районі 11 с, а для i_d характерним є стартовий перехідний процес із піком близько 2.48 А на початку моделювання та короткий імпульс при зміні швидкості в районі 11 с. Після цих збурень похибки швидко затухають, що свідчить про стабільну роботу регуляторів і відсутність затяжних коливань.

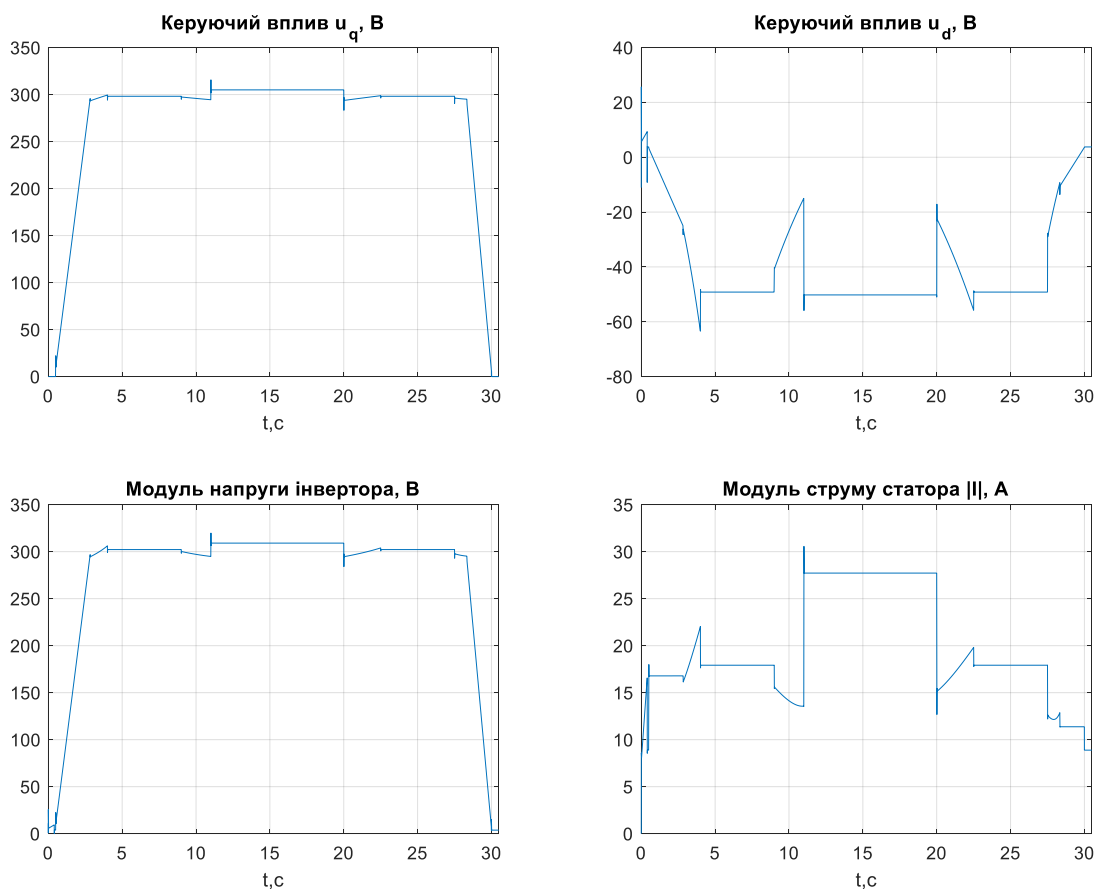


Рисунок 5.4 – Перехідні процеси керуючих впливів при першому досліді

На рис.5.4 наведено перехідні процеси керуючих впливів осях d – q , а також узагальнені показники по напрузі та струму. Керуючий вплив по вісі q відображає роботу каналу моменту: при розгоні та при переході на режим підвищеного навантаження він зростає до великих значень і надалі підтримується на рівні, необхідному для забезпечення потрібної динаміки швидкості та компенсації моменту опору. Керуючий вплив по вісі d змінюється відповідно до режимів підтримання/зміни потоку та компенсації перехресних зв'язків у координатах d – q . Характерні заломі спостерігаються в моменти переходів між ділянками номінального потоку та ослаблення поля.

Модуль напруги інвертора протягом швидкісних ділянок утримується поблизу граничного рівня, що свідчить про роботу привода в умовах обмеження по напрузі та пояснює необхідність ослаблення поля на підвищених швидкостях. Загалом форма сигналів підтверджує узгоджену роботу регуляторів: система забезпечує потрібну динаміку, при цьому напруга обмежується можливостями інвертора, а струм змінюється відповідно до поточного навантаження та режиму руху.

5.2 Дослідження роботи привода на швидкостях нижче номіналу при зміні моментів навантаження

В цьому досліді робот-косарка рухається і виконує косіння по пересічній місцевості на швидкостях нижче номінальної під різним кутом ухилу а також виконує розворот навколо своєї осі. Діаграма швидкості наведена на рис.5.5. Робот виконує косіння під кутом ухилу 50° та виходить на швидкість 5 км/год (127.18 рад/с), косить певний проміжок часу на цій ділянці і в 13с починає знижувати швидкість до 76 рад/с, а ділянка починає змінювати ухил до 30° , далі після роботи під таким кутом робот з'їжджає на ділянку з кутом ухилу 20° , при цьому весь цей час косячи рослинність і на цій ділянці виконує розворот за рахунок того, що починає обертати одну з гусениць в зворотньому напрямку. Після розвороту робот знову косячи помалу піднімається вгору під кутом 50° .

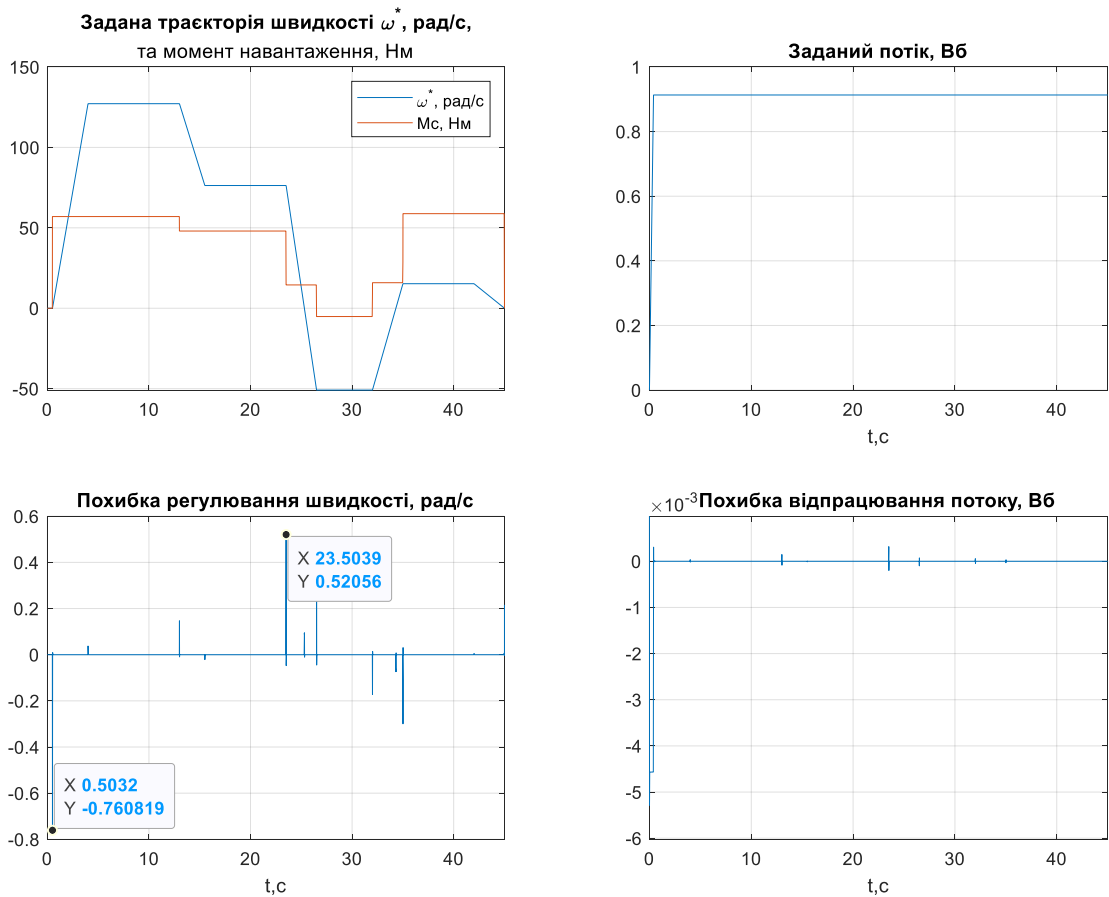


Рисунок 5.5 – Задана швидкість та потік та їх похибки відпрацювання

Графік заданого потоку ψ^* у цьому досліді практично сталий близько 0.9 Вб після короткого пускового наростання, тобто робота виконується в першій зоні регулювання швидкості без ослаблення поля. Похибка регулювання швидкості має імпульсний характер і зосереджується в моментах різкої зміни режимів, найбільш помітно під час початку розгону і входу в реверс, де фіксується максимальне короточасне відхилення 0.52 рад/с. Похибка відпрацювання потоку залишається малою, де найбільше значення похибки спостерігається лише на старті і складає кілька мілівебер, а надалі похибка коливається поблизу нуля на рівні 10^{-3} Вб.

Рисунок 5.6 ілюструє фактичну реакцію електропривода, тобто реальну швидкість і момент двигуна, потікозчеплення, а також фазні компоненти напруги та струму статора. Реальна траєкторія швидкості загалом повторює задану швидкість (що також можемо спостерігати по графіку похибки регулювання швидкості на рис.5.5).

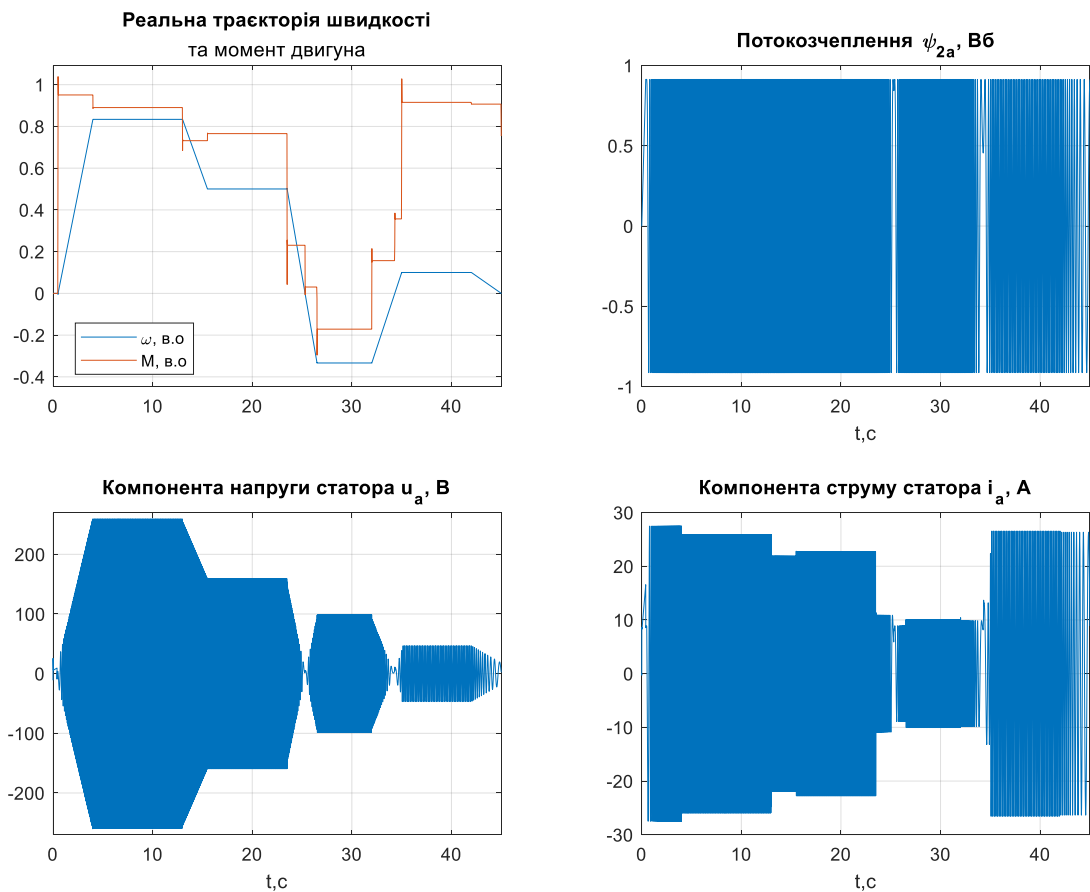


Рисунок 5.6 – Перехідні процеси при другому досліді

Момент двигуна під час реверсу закономірно змінює знак і у зоні з 26 до 32 с формується від’ємна складова моменту, необхідна для гальмування та підтримання руху в зворотному напрямку, а після 35 с момент різко збільшується у відповідь на суттєве підвищення моменту навантаження. Потокозчеплення ψ_{2a} має змінну щільність: на ділянках вищої швидкості сигнал виглядає більш заповненим, тоді як у зонах, де швидкість прямує до нуля або змінює знак, з’являються характерні “розрідження” коливань (поблизу моментів переходу через нуль). Це відображає зниження частоти обертання поля при гальмуванні та реверсуванні.

Фазна напруга статора u_a змінює амплітуду відповідно до режимів роботи. На інтервалах підвищеної швидкості вона має найбільшу амплітуду, а в області реверсу та при низьких швидкостях амплітуда помітно зменшується. Фазний струм статора i_a демонструє найбільш показову реакцію на зміну навантаження, де у зоні зменшеного навантаження та під час реверсу рівень

струму суттєво падає, а після зміни навантаження струм різко зростає і надалі утримується на підвищеному рівні, що відповідає необхідності формувати великий момент при невисокій швидкості.

На рисунку 5.7 показано завдання моментотворюючого струму i_q^* , завдання потокутворюючого струму i_d^* та похибки їх відпрацювання.

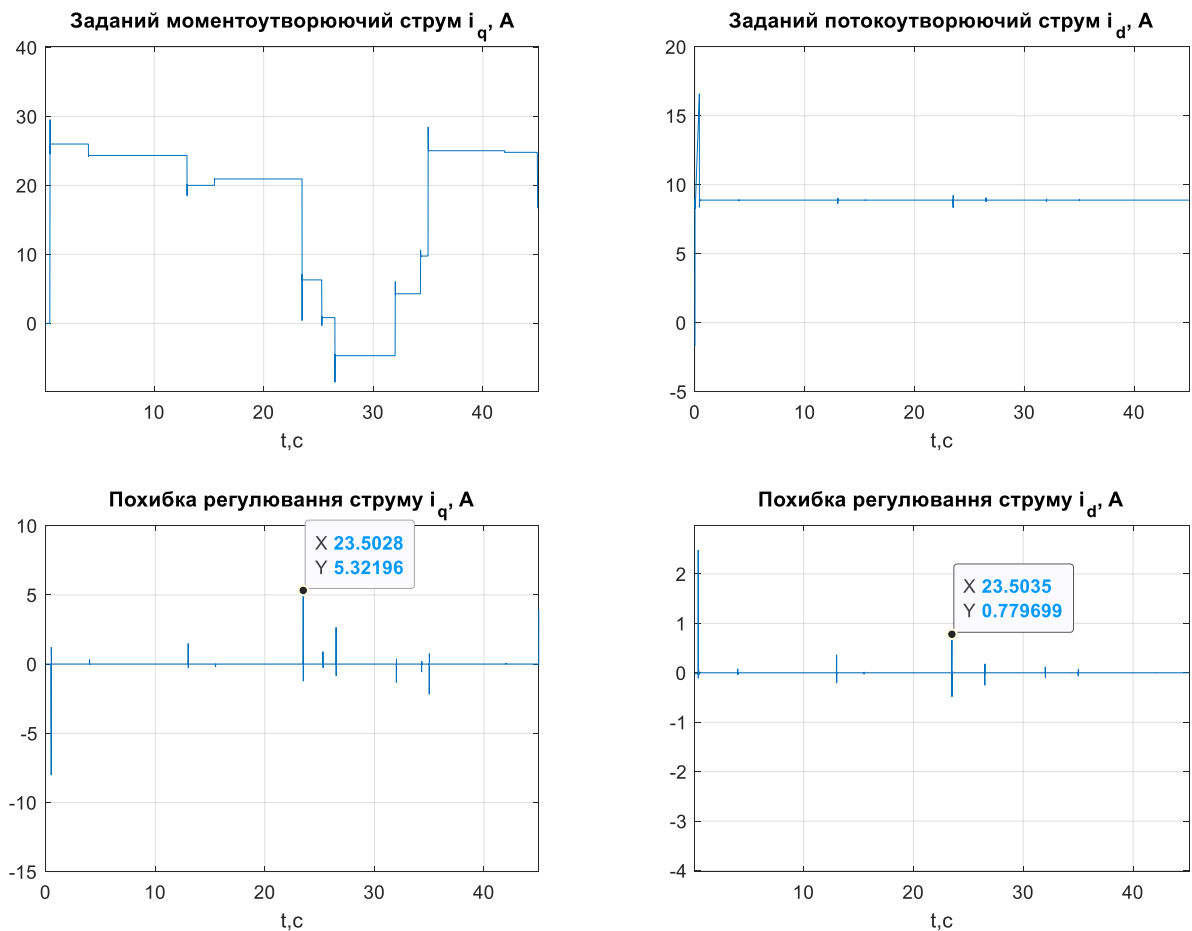


Рисунок 5.7 – Перехідні процеси струмів i_q^* та i_d^* та похибки їх регулювання

Закон зміни i_q^* безпосередньо відображає послідовність режимів, де у зоні розгону та руху з додатною швидкістю i_q^* підтримується на відносно високому рівні 20-27 А, далі перед входом у реверс зменшується до малих значень і в інтервалі реверсу набуває від'ємних значень близько 5 А, що відповідає формуванню від'ємного моменту. Після виходу з реверсу i_q^* знову переходить у додатну область, а в момент 35 с спостерігається різкий стрибок завдання i_q^* , що узгоджується зі стрибком моменту навантаження.

Завдання i_d^* у цьому досліді практично стале, що пов'язано з постійним завданням потоку ψ^* (рис.5.5). Похибки регулювання струмів мають імпульсний характер і локалізуються в моментах зміни навантаження. При цьому в усталених інтервалах похибки залишаються близькими до нуля, що підтверджує коректне відпрацювання заданих струмів.

На рисунку 5.7 наведено керуючі впливи u_q та u_d , а також модулі напруги інвертора і струму статора.

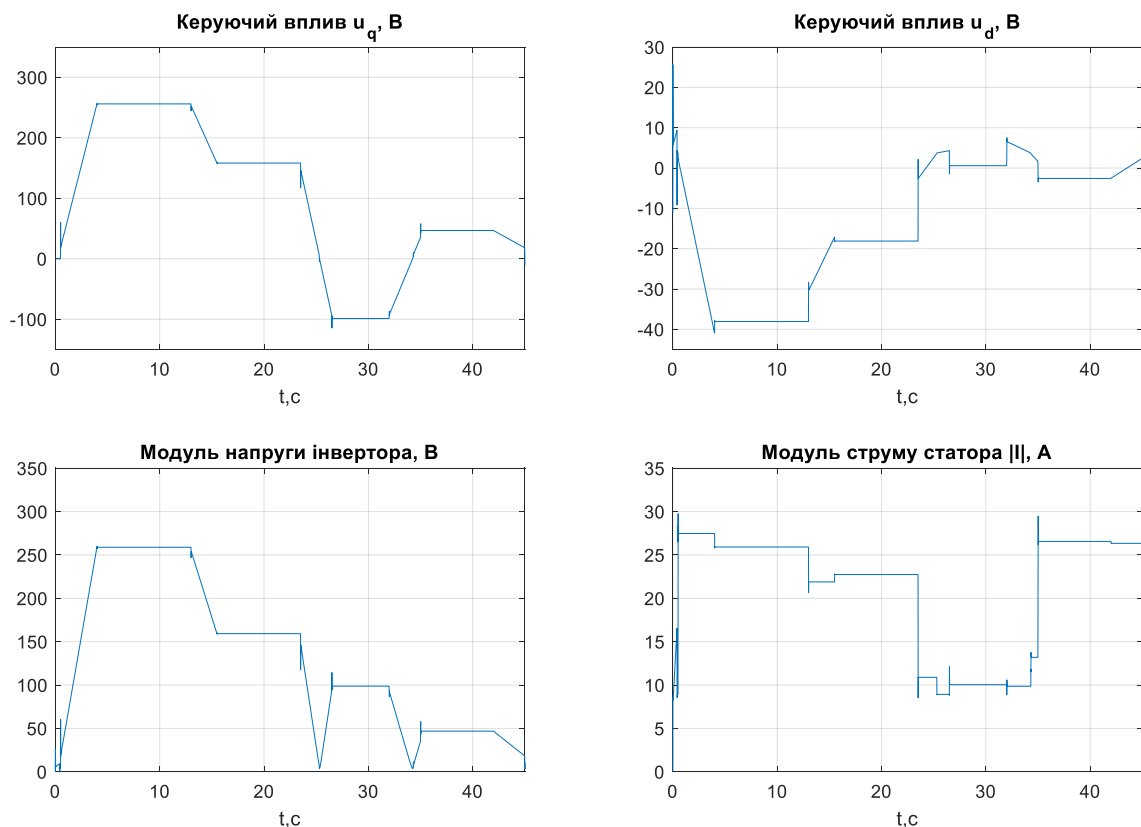


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси керуючих впливів при другому досліді

Згідно рисунку 5.8 керуючий вплив u_q на ділянці реверсу переходить у від'ємну область, що узгоджується з формуванням моменту під час реверсу. Модуль напруги інвертора в зоні зміни напрямку обертання двигуна істотно зменшується до малих значень, після чого знову зростає при роботі на реверсивній швидкості. Модуль струму статора, у реверсивній ділянці знижується до мінімальних рівнів, а після зростає до значень близько 27 А, що відповідає збільшенню моменту навантаження.

Висновки до розділу

У розділі виконано математичне моделювання системи векторного керування за швидкістю асинхронного тягового електропривода промислового робота-косарки для режимів із частими розгонами/гальмуваннями та змінним навантаженням, зумовленим ухилами, зчепленням гусениць і опором під час косіння в результаті чого отримані наступні висновки та результати:

1. У першому досліді відпрацьовано перехід між 1-ю та 2-ю зонами регулювання. Для умов руху на ухилі показано адекватну реакцію привода на зміну навантаження: при русі на транспортній швидкості момент навантаження становить близько 22 Нм, а під час косіння зростає до 67 Нм (з урахуванням різних кутів ухилу 20° та 50°). Точність стабілізації швидкості в усталених режимах є високою, тобто похибка близька до нуля, а максимальні короточасні відхилення зафіксовано близько -0.32 рад/с та 0.27 рад/с під час прикладання/зняття навантаження.

2. Підтверджено реалізацію ослаблення поля у 2-й зоні. На ділянках підвищеної швидкості потік знижується приблизно до 0.6 Вб, тоді як на робочій швидкості підтримується близько 0.9 Вб, що узгоджується з обмеженням по напрузі інвертора.

а. У другому досліді при змінні режимів роботи на швидкостях нижче номіналу та розвороту за допомогою реверсу похибка регулювання швидкості тримається в районі нуля та досягає максимуму близько 0.52 рад/с у моменти різкої зміни режимів, при цьому похибка відпрацювання потоку залишається малою й коливається поблизу 10^{-3} Вб.

3. Показано правильне формування керуючих впливів у реверсивних режимах. Момент змінює знак у зоні реверсу, керуючий вплив u_q переходить у від'ємну область, модуль напруги інвертора зменшується під час зміни напрямку, а модуль струму після зростання навантаження збільшується до приблизно 27 А.

6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

В даному розділі виконано маркетинговий аналіз стартап-проєкту гусеничної косарки для роботи на схилах з векторно-керованим асинхронним електроприводом.

6.1 Опис ідеї проєкту

Об'єктом стартап-проєкту є дистанційно керована гусенична косарка (робот-косарка) з можливістю автономної роботи для обслуговування крутих схилів, укосів, дамб і складних ділянок, де робота оператора безпосередньо біля машини є небезпечною. Ключова відмінність від типових рішень на ДВЗ полягає у застосуванні електроприводу на асинхронних двигунах із векторним керуванням, що забезпечує точне відпрацювання заданої швидкості руху на різних покриттях і при зміні навантаження (трава, нерівності, підйом).

У запропонованому рішенні силову установку виконано як електропривод на асинхронних двигунах з перетворювачами частоти та векторним керуванням за швидкістю. Для оператора основним керованим параметром є швидкість руху (та напрямок), тоді як необхідна тяга формується автоматично системою керування привода. Це підвищує керованість, стабільність руху та розширює робочий діапазон швидкостей під навантаженням і на схилах.

Таблиця 6.1 - Опис ідеї стартап-проєкту

№	Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
1	2	3	4
1	Дистанційно керована гусенична косарка для роботи на схилах; електропривід: два тягові асинхронні двигуни + редуктори; перетворювачі частоти з векторним керуванням	Комунальні та дорожні служби (узбіччя, укоси, дамби), підрядники з благоустрою	Безпека (оператор на відстані), стабільна швидкість під навантаженням, висока тяга на малих швидкостях

1	2	3	4
2	Заміна ДВЗ на електропривід з керуванням швидкістю	Парки, рекреаційні зони, об'єкти з обмеженням шуму/викидів	Менше шуму і вібрацій, менше регламентних робіт, можливість телеметрії та діагностики
3	Модульна платформа (косильна дека/мульчер; опційно інші навісні модулі)	Агросектор, лісове господарство, утримання інфраструктури	Універсальність та краща окупність, робота у важкодоступних місцях

Після формулювання ідеї важливо підкреслити, що для кінцевого користувача керування відбувається саме за швидкістю: оператор задає необхідну швидкість руху, а привід автоматично компенсує зміни навантаження. Такий підхід особливо корисний на схилах, де навіть невеликі «просідання» швидкості можуть призводити до втрати траєкторії або пробуксовування.

Технічна ідея передбачає побудову електромеханічної трансмісії з двома незалежними приводами гусениць. Векторне керування забезпечує швидкодію та якісне відпрацювання профілю швидкості (розгони/гальмування) і компенсацію зміни сил опору різання трави та опору коченню на різних ділянках. За рахунок точного регулювання швидкості зменшуються пробуксовування, ривки та ризики втрати керованості на складному рельєфі.

Таблиця 6.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

Характеристика	Оцінка (S/W/N)	Пояснення
1	2	3
Безпека на крутих схилах (RC-робота)	S	Оператор знаходиться на безпечній відстані; зниження ризику травм у небезпечних зонах.
Точність керування швидкістю	S	Векторне керування АД забезпечує стабільне утримання швидкості і високий момент на малих швидкостях.
Екологічність та шум	S	За живлення від АКБ - нуль локальних викидів, нижчий шум у порівнянні з ДВЗ.

1	2	3
Діапазон регулювання швидкості	S	Можливе широке регулювання (нижче номіналу - зона сталого моменту; вище - зона ослаблення поля за потреби).
Початкова ціна	W/N	АКБ, силова електроніка та системи захисту можуть підвищувати капітальні витрати.
Сервісна інфраструктура на старті	W	Потребує партнерів і складу запасних частин, особливо для B2B-сегменту.
Стійкість до погодних умов та забруднень	N	Потребує якісного захисту IP, фільтрації повітря для охолодження та герметизації електроніки.

Оцінка сильних/слабких/нейтральних характеристик дозволяє визначити, які переваги потрібно максимально підкреслити у позиціонуванні (безпека, стабільність швидкості, нижчий шум), а які ризики слід закрити організаційними рішеннями (сервісна підтримка, постачання комплектуючих, ціна).

6.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Метою технологічного аудиту є підтвердження здійсненності розроблення та виготовлення прототипу, а також оцінка доступності ключових технологій та компонентів.

Таблиця 6.3 - Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№	Компонент/ідея	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність
1	2	3	4	5
1	Тяговий електропривід	Асинхронні двигуни; ПЧ з векторним керуванням; датчики струму; енкодер	Є (серійні рішення)	Доступно через постачальників та інтеграцію
2	Ходова частина (гусениці)	Рама, катки, натягачі, ведуча зірочка, редуктор, гумово-металеві гусениці	Є	Доступно (кооперація з виробництвом)

1	2	3	4	5
3	Дистанційне керування та безпека	Радіоканал; аварійна зупинка (E-Stop); fail-safe; блокування при втраті зв'язку	Є	Доступно (готові модулі/контролери)
4	Енергосистема	АКБ, BMS, зарядний пристрій	Є	Доступно, але критичні вимоги до якості
5	Косильний/мульчувальний модуль	Роторна дека/мульчер; захисні кожухи; привод (електро або гідро)	Є	Доступно (стандартизовані вузли)

Технологічний аудит показує, що більшість вузлів є серійними або технологічно доступними. Критичними для успіху прототипу є: (1) надійна силова частина (ПЧ, захисти, ЕМС), (2) коректно налаштований контур керування швидкістю для малих швидкостей, (3) безпечна логіка аварійної зупинки та fail-safe дистанційного керування.

Висновок: ключові технології присутні на ринку. Основний інженерний виклик - інтеграція силової електроніки, енергосистеми та механіки з урахуванням безпеки, вологи/пилу та режимів роботи на схилах.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Ринок дистанційно керованих косарок для схилів формується під впливом трьох головних чинників: (1) безпека праці та зменшення ризиків перекидання/травм на крутих укосах; (2) зростання вартості робочої сили та потреба в підвищенні продуктивності; (3) технологічний розвиток (роботизація, поліпшення батарей, зв'язок і телеметрія). Сучасні машини дедалі частіше оснащують GPS-навігацією, виявленням перешкод, телематикою та IoT-моніторингом, що дозволяє керувати парком техніки та переходити до прогностичного техобслуговування. Одночасно зростає частка електричних та гібридних рішень, оскільки вони знижують шум, локальні викиди та витрати на обслуговування.

Попит, обсяг та динаміка ринку. За даними аналітичного звіту DataIntel [37], глобальний ринок slope mower remote-controlled у 2024 році оцінюється у 674,2 млн дол. США і прогнозується на рівні 1 742,8 млн дол. США до 2033 року при CAGR 14,1%. Сегментація ринку включає: тип виробу (crawler/ wheel), сфери застосування (agriculture, landscaping, roadside maintenance, forestry), джерело живлення (electric, gasoline, diesel, hybrid), кінцевого користувача (commercial, municipal, residential) та канали збуту (online/ offline). Для нашої концепції найбільш релевантними є сегменти crawler-type та municipal/ commercial, де критичними є безпека, тяга і стабільне утримання швидкості на схилі.

Таблиця 6.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Показник	Характеристика
Тип ринку	B2B (комунальні служби, підрядники, агро/інфраструктура)
Глобальний обсяг (оцінка)	674,2 млн дол. США (2024)
Прогноз	1 742,8 млн дол. США (2033), CAGR 14,1%
Ключові драйвери	Безпека робіт на схилах, автоматизація, зростання витрат на ручну працю, вимоги до утримання інфраструктури
Бар'єри входу	Потреба в надійності та сервісі, сертифікація/безпека, капіталомістка розробка
Ключові конкуренти	SPIDER, Green Climber, Energreen та інші

Ринкові дані підтверджують високий потенціал сегмента: ринок віддалено керованих косарок для схилів зростає завдяки вимогам безпеки, дефіциту робочої сили та переходу до автоматизованої техніки. Звіт також виділяє сегментацію за типом ходової (crawler/wheel), сферою застосування, джерелом живлення (electric/gasoline/diesel/hybrid), кінцевим користувачем і каналами збуту, що корисно для обґрунтування ніші саме гусеничного електроприводу з точним керуванням швидкістю.

Потенційні клієнти та їх вимоги. Розглянемо цільову аудиторію нашого стартап-проєкту та оцінемо їх вимоги.

Таблиця 6.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Потреба	Цільова аудиторія	Особливості поведінки	Ключові вимоги
Безпечне косіння на схилах	Комунальні та дорожні служби	Тендерні закупівлі, вимоги до документів	Надійність, сертифікація, сервіс, навчання персоналу
Підвищення продуктивності	Комерційні підрядники/ландшафтні компанії	Оцінка ТСО та простоїв	Швидкий сервіс, доступність запчастин, універсальність
Утримання важкодоступних зон	Інфраструктурні компанії (дамби, канали, енергетика)	Високі вимоги до безпеки	Fail-safe, E-Stop, дистанційна діагностика
Еко/низький шум	Парки, рекреація, об'єкти біля людей	Репутаційні вимоги	Низький шум, відсутність локальних викидів (за АКБ), плавність руху

Вимоги клієнтів відрізняються за сегментами. Комерційні оператори та підрядники порівнюють техніку за продуктивністю і сукупною вартістю володіння (ТСО), муніципалітети – за відповідністю нормам безпеки та наявністю сервісу, а інфраструктурні компанії (дороги, дамби, залізниця, utility) – за надійністю і здатністю працювати у важких умовах. Саме тому для продукту критичні демонстрації, навчання і сервісні контракти.

Фактори загроз і можливостей. Визначимо, що входить до ключових загроз проєкту та наведемо їх у табл.6.6, а також що входить до факторів можливостей (табл.6.7).

Таблиця 6.6 - Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Реакція стартап-компанії
Сильні міжнародні бренди	Висока довіра клієнтів до існуючих виробників	Нішування (електропривід + точне керування), пілотні проєкти, демонстрації
Висока вартість АКБ/електроніки	Збільшення початкової ціни	Дві комплектації; лізинг/оренда; оптимізація енергоспоживання
Недостатня сервісна мережа	Ризик простоїв техніки для клієнтів	Партнери сервісу; склад ЗП; регламенти та навчання
Сезонність робіт	Нерівномірне завантаження	Мультифункціональність платформи (різні навісні модулі)

До ключових загроз належать висока стартова вартість технологічної техніки та складність обслуговування, що може стримувати чутливих до ціни покупців. Додатковими бар'єрами є недостатня обізнаність користувачів, потреба в навчанні та можливі вимоги щодо безпеки/шуму/викидів, які відрізняються між країнами та замовниками.

Таблиця 6.7 - Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Реакція стартап-компанії
Зростання ринку	Прогноз суттєвого зростання сегменту RC slope mowers	Вихід на ринок через пілоти та партнерів; нарощування виробництва
Попит на безпеку	Робота на схилах - зона підвищеного ризику	Фокус на системах безпеки, fail-safe та стандартах
Тренд на електрифікацію	Підвищення вимог до екологічності та шуму	Електропривід як ключова диференціація, сервіс-контракти
Потреба в точному керуванні	Стабільна швидкість під навантаженням впливає на якість косіння	Векторне керування АД, режими тяги/антипробуксовки (розробка ПЗ)

Можливості зростання пов'язані з трендом «smart landscaping» і «precision agriculture»: виробники додають телеметрію, IoT, віддалений моніторинг і прогнозне техобслуговування. Доступність лізингу/фінансування та державних програм також підвищує готовність клієнтів купувати дорогі машини, а партнерства з сервісними компаніями та прокатними парками прискорюють вихід на ринок.

Аналіз конкуренції. На ринку представлені професійні дистанційно керовані косарки для схилів як колісного, так і гусеничного типу. За даними DataIntel, гусеничні (crawler) моделі цінуються за стійкість та зчеплення і здатні ефективно працювати на градієнтах понад 50°, тоді як колісні (wheel) моделі виграють у маневреності та вартості для менш екстремальних умов. У конкурентному середовищі ключовими чинниками стають безпека, продуктивність, сервіс і технологічні функції. Запропонований стартап займає нішу електроприводу з пріоритетом на точному керуванні швидкістю руху та зниженні шуму/викидів порівняно з рішеннями на ДВЗ.

Таблиця 6.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Ознака	Характеристика ринку	Висновок для стартапу
Тип конкуренції	Висока конкуренція у професійному B2B сегменті	Потрібна чітка диференціація та сервіс
Рівень	Глобальний та національні ринки	Починати локально, масштабувати через партнерів
Характер	Переважно нецінова конкуренція (безпека, продуктивність, сервіс)	Акцент на safety, точному керуванні, TCO
Інтенсивність	Середня-висока, довгий цикл продажу у B2B	Пілотні проекти, демонстрації, кейси

Ступеневий аналіз конкуренції узагальнює, що галузь є конкурентною: присутні як великі виробники, так і інноваційні нові гравці. Конкуренти змагаються не лише ціною, а й набором функцій (безпека, автономність, енергоефективність), а також якістю післяпродажної підтримки.

Таблиця 6.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Сила	Прояв у галузі
Конкуренція між існуючими компаніями	Сильні бренди, широка лінійка моделей, акцент на безпеку та продуктивність
Загроза нових конкурентів	Середня: бар'єри входу (сертифікація, сервіс, інвестиції)
Сила постачальників	Висока для АКБ/електроніки/гусениць (ціни та строки поставок)
Сила покупців	Висока у тендерних закупівлях та великих підрядників (вимоги до SLA)
Загроза замінників	Ручна праця (ризик), тракторні/колісні косарки, інші методи утримання рослинності

Модель «5 сил» дозволяє формально оцінити тиск ринку. У цьому сегменті суттєвими є: сила покупців (B2B/муніципалітети вимагають гарантій та сервісу), сила постачальників (АКБ, електроніка, гусениці) і загроза замінників (тракторні/колісні рішення, ручна праця, підрядні послуги).

Фактори конкурентоспроможності та SWOT. Фактори конкурентоспроможності потрібно пов'язувати з вимірюваними характеристиками.

Таблиця 6.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор	Обґрунтування
Робота на схилах та прохідність	Визначає придатність до цільових задач (укоси, дамби, узбіччя).
Безпека (RC, fail-safe)	Основний драйвер застосування у небезпечних зонах.
Точність керування швидкістю	Впливає на якість косіння, стабільність руху та зменшення пробуксовки.
Екологічність/шум	Перевага на об'єктах біля людей та в умовах обмежень.
Сервіс та доступність ЗІП	Критично для B2B клієнтів через вартість простою.
Сукупна вартість володіння (ТСО)	Визначає рішення про покупку/оренду.

Фактори конкурентоспроможності потрібно пов'язувати з вимірюваними характеристиками. Для нашої концепції такими факторами є стабільність швидкості на схилі, прохідність гусеничної платформи, безпека дистанційного керування та можливість зменшити шум/локальні викиди. Додатковий потенціал – цифрові функції (телеметрія, діагностика).

Таблиця 6.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту (шкала -3...+3)

Фактор	Оцінка	Коментар
Тяга та момент на малих швидкостях	+2	Векторне керування АД дає високий момент у зоні малих швидкостей.
Точність утримання швидкості	+2	Компенсація навантаження (трава/схил) за рахунок керування швидкістю.
Робота на схилах (за ТЗ)	0	Ціль - робота на схилах до 50°; для підвищення необхідні випробування і конструктивні рішення.
Екологічність/шум	+2	Перевага електроприводу за живлення від АКБ.
Початкова ціна	-1	АКБ і силова електроніка підвищують CAPEX.
Сервісна мережа	-2	Потрібна партнерська модель сервісу та склад ЗІП.

Порівняльна оцінка показує, де проєкт має реальні переваги вже на рівні концепції (точність керування швидкістю, комфорт оператора, потенційно нижчі експлуатаційні витрати), і де потрібні компенсуючі заходи (канал

сервісу/збуту, довіра до нового бренду). Саме ці пункти далі враховуються у стратегії виходу на ринок.

Таблиця 6.12 - SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (S)	Слабкі сторони (W)
Електропривід на АД з векторним керуванням; висока керованість; високий момент на малих швидкостях; нижчий шум; можливість телеметрії.	Початкові витрати (АКБ/ПЧ); потреба у сервісній мережі; вимоги до захисту електроніки; довший цикл продажу у В2В.
Можливості (O)	Загрози (T)
Зростання ринку; попит на безпечні RC-рішення; тренд на електрифікацію; попит на мультифункціональні платформи.	Конкуренція з брендами; тендерні бар'єри; сезонність; ризики постачання АКБ/компонентів.

SWOT-аналіз формує основу для ринкової стратегії: сильні сторони перетворюються на ключові повідомлення (позиціонування), слабкі – на план дій (партнери, сервіс), можливості – на дорожню карту розвитку (телеметрія, лізинг), загрози – на заходи з управління ризиками.

Таблиця 6.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

Альтернатива	Опис	Переваги	Недоліки	Рекомендація
А	Прямі продажі В2В (муніципалітети /підрядники)	Вищий контроль, маржа	Тендери, довгий цикл	Після пілотів
В	Дилерська мережа + сервісні партнери	Швидший доступ до клієнтів, сервіс	Залежність від партнерів	Так (старт)
С	Послуга косіння (Mowing-as-a-Service) / оренда	Швидкий старт, демонстрація ефекту	Потрібні операційні ресурси	Так (старт)

Для високовартісного В2В-обладнання доцільно розглядати кілька моделей комерціалізації. На практиці швидкий старт часто дає модель послуги або демонстраційні проєкти з партнерами, тоді як прямий продаж у муніципалітети потребує часу через тендерні процедури.

6.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проекту

Стратегія передбачає поетапний вихід на ринок: первинні демонстрації та пілотні проекти, формування партнерської мережі сервісу, після чого - масштабування продажів.

Таблиця 6.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

Сегмент	Потреба	Готовність купувати	Ключовий аргумент
Комерційні підрядники	Продуктивність і безпека	Висока	ТСО, швидкий сервіс
Комунальні/дорожні служби	Безпечне утримання укосів	Середня	Відповідність вимогам безпеки, документація
Інфраструктурні компанії	Робота в небезпечних зонах	Середня	Fail-safe, дистанційна діагностика

Вибір цільових груп визначає пріоритети функцій і сервісу. Рекомендовано починати з комерційних підрядників та компаній, які вже мають регулярні роботи на схилах і можуть швидко оцінити переваги стабільного керування швидкістю на реальних об'єктах.

Таблиця 6.15 - Визначення базової стратегії розвитку

Альтернатива	Суть	Обґрунтування вибору
Стратегія диференціації	Відмінність через електропривід на АД з векторним керуванням, низький шум, точність керування, безпеку	Покупці обирають рішення за безпекою/надійністю та сервісом, а не лише за ціною
Фокусування (нішування)	Схили та важкодоступні ділянки, де традиційна техніка небезпечна	Дозволяє швидше отримати кейси та репутацію у вузькому сегменті

Базова стратегія розвитку для технологічного стартапу в цій галузі – диференціація. Тобто конкурувати не найнижчою ціною, а поєднанням безпеки, якості керування та сучасних функцій, які дають вимірюваний ефект у роботі клієнта.

Таблиця 6.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Питання	Рішення для стартапу
Позиція на ринку	Новий гравець у локальному сегменті електрифікованих RC slope mowers
Джерело попиту	Перехід клієнтів з ДВЗ/гідроприводу + нові клієнти через підвищені вимоги до безпеки
Захист від копіювання	Ноу-хау алгоритмів керування тягою/антипробуксовки; модульна компоновка; ПЗ та параметри керування

Стратегія конкурентної поведінки передбачає орієнтацію на ринкові стандарти безпеки та сервісу, але з акцентом на власну відмінність: стабільне керування швидкістю на схилах, зручність оператора та можливість подальшої цифровізації (моніторинг, діагностика).

Таблиця 6.17 - Визначення стратегії позиціонування

Елемент	Зміст
Ціннісна пропозиція	Безпечне й точне косіння на схилах завдяки електроприводу з керуванням швидкістю
Ключові переваги	Точність швидкості; високий момент на малих швидкостях; нижчий шум; можливість телеметрії
Брендові асоціації	Safe - Precise - Electric

Позиціонування повинно бути зрозумілим з першого контакту: «безпечна гусенична косарка для схилів, яка точно тримає задану швидкість». Таке формулювання на пряму відповідає на біль клієнта (ризик та нестабільність руху на схилі).

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Маркетингова програма формується як комплекс 4P/7P для B2B: продукт, ціна, збут, комунікації (з урахуванням сервісу та безпеки).

Таблиця 6.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба клієнта	Вигода	Реалізація в продукті
Безпека на схилі	Оператор не знаходиться на машині	Дистанційне керування, E-Stop, fail-safe, обмеження швидкості/моменту
Стабільна якість косіння	Швидкість не 'просідає' під навантаженням	Векторне керування АД (контур швидкості), обмеження струму, режими тяги
Низький шум/еко	Можна працювати поблизу людей	Електропривід (АКБ), оптимізація шуму
Менше простоїв	Менше техобслуговування	Електропривід без ДВЗ, телеметрія/діагностика (опційно)

Зведення «потреба – вигода – перевага» показує, як технічні рішення перетворюються на маркетингові аргументи. Для покупця важливо не те, який саме алгоритм застосовано, а що машина прогнозовано рухається із заданою швидкістю та зменшує ризики/витрати.

Таблиця 6.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівень	Опис
I. Товар за задумом	Безпечне та ефективне косіння/мульчування на крутих схилах без ризику для оператора.
II. Товар у реальному виконанні	Гусенична платформа; два тягові асинхронні двигуни + редуктори; ПЧ з векторним керуванням; дистанційний пульт; E-Stop; захисти; косильна дека/мульчер.
III. Товар із підкріпленням	Пусконаладження, навчання, гарантія, сервіс-контракт, склад ЗІП, регламент ТО, віддалена діагностика.

Модель трьох рівнів допомагає доповнити «залізо» сервісом. Для B2B-клієнта важливі: швидке введення в експлуатацію, навчання, гарантія, наявність ЗІП і можливість віддаленої діагностики – це напряду впливає на простій техніки.

Таблиця 6.20 - Визначення меж встановлення ціни на товар/послугу

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Цінова чутливість споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни
1	Висока вартість ручної праці та ризику; оренда техніки	Професійні RC slope mowers (преміум сегмент)	Середня: важливі безпека та простий	Нижня межа: собівартість + мінімальна маржа; верхня: рівень преміум-аналогів з урахуванням сервісу
2	Тракторні/колісні рішення (дешевші, але обмежені на схилах)	Середній сегмент slope mowers	Висока у малих підрядників	Створити базову комплектацію з конкурентною ціною та опції (АКБ ємність, телеметрія, навісні модулі)

Ціноутворення для такого продукту повинно враховувати високу капіталомісткість та очікування клієнтів щодо ТСО. Оскільки ринок вказує на бар'єр високих початкових витрат, доцільно передбачити комплектації (base/pro), сервісні пакети та фінансування (лізинг/оренда), щоб знизити поріг входу для клієнта.

Таблиця 6.21 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції постачальника товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Підрядники: швидке рішення, оцінка ТСО	Демо, швидкий сервіс, запасні частини	Короткий (виробник-дилер-клієнт)	Дилер + сервіс-партнер у регіоні
2	Комунальні служби: тендери, вимоги документів	Документація, гарантія, навчання	Середній	Партнерський продаж через дилера/інтегратора, пілотні проекти
3	Інфраструктура: вимоги до безпеки	SLA, сервіс-контракт, діагностика	Короткий/середній	Прямі контракти після пілотів

Згідно з аналізом каналів збуту, офлайн-канали (дилери, прямі продажі, спеціалізовані магазини) домінують, бо клієнтам потрібні демонстрації і післяпродажна підтримка. Водночас онлайн-канал зростає через цифровізацію закупівель і «віртуальні демонстрації». Для стартапу оптимальною є гібридна модель: онлайн для генерації лідів і офлайн для тест-драйву та угоди.

Таблиця 6.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації	Засоби комунікації	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	B2B клієнти довіряють кейсам і демо	Проф. виставки, дилери	Демо-покази, відео робіт	Показати безпеку та продуктивність	«Безпека: тримає швидкість на схилі. Менше ризику - вища продуктивність.»
2	Комунальні служби орієнтуються на надійність	Тендерні майданчики, презентації	Технічні паспорти, сертифікати	Підтвердити відповідність вимогам	«Надійна техніка для укосів: документи, сервіс, навчання.»
3	Підрядники рахують ТСО	Сайт, соцмережі B2B, партнерські канали	Калькулятор ТСО, кейси	Довести економічний ефект	«Менше простою - більше гектарів. Електропривід знижує витрати на ТО.»

Комунікації у цьому сегменті мають бути практичними: польові демонстрації на схилі, відео «до/після», кейси економії часу та зниження ризиків, участь у профільних виставках/днях поля, а також навчальні матеріали з безпеки. Для підвищення довіри бажано мати сертифікації, гарантію та чітку схему сервісного реагування.

Висновки до розділу

1.Ринок дистанційно керованих косарок для схилів демонструє стале зростання та характеризується високою актуальністю задач безпечного утримання укосів і важкодоступних територій.

2.Запропонований проєкт має технологічну здійсненність: ключові компоненти (асинхронні двигуни, ПЧ з векторним керуванням, ходова

частина, системи безпеки) доступні, а інтеграція можлива в межах інженерної розробки.

3.Основною конкурентною перевагою є електропривід на асинхронних двигунах із векторним керуванням за швидкістю, що дозволяє стабільно утримувати уставку швидкості при зміні навантаження та при роботі на схилах. Це підвищує якість виконання робіт, зменшує втому оператора (менше корекцій керування) та забезпечує більш передбачувану поведінку машини порівняно з традиційними рішеннями на ДВЗ/гідроприводі.

4.Доцільна модель виходу на ринок: старт через дилерів і сервісних партнерів, а також через послугу/оренду для формування кейсів; подальше масштабування - прямі контракти з інфраструктурними та муніципальними замовниками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської дисертаційної роботи розроблено систему автоматичного керування тяговим електроприводом промислового робота-косарки на базі асинхронного двигуна з прямим векторним керуванням за швидкістю, яке забезпечує стабілізацію та відпрацювання заданих швидкісних профілів у режимах розгону, гальмування, реверсу й роботи під технологічним навантаженням (косіння) на схилах. Запропонований підхід дозволяє реалізувати керування в широкому діапазоні швидкостей, включаючи роботу у другій зоні регулювання із послабленням поля, з прийнятною точністю та без втрати керованості привода.

1. Здійснено аналіз ринку сучасних роботів-косарок і наведено їх класифікацію з виділенням сегмента промислових машин для важких умов експлуатації. На основі аналізу визначено експлуатаційні особливості тягового привода (схили, змінне зчеплення, нерівності поверхні, різні режими руху та маневрування) і сформовано технічні вимоги до системи керування електроприводом, зокрема щодо діапазону регулювання швидкості.

2. На етапі розрахунків сформовано навантажувальну діаграму тягового привода з урахуванням основних складових опору, а саме гравітаційної складової на підйомі/спуску, опору деформації гусениці, технологічного опору процесу косіння, а також інерційної складової під час розгону та гальмування. На основі навантажувальної діаграми визначено вимоги до моменту й потужності привода та виконано вибір електродвигуна за номінальними параметрами та обґрунтовано його вибір із необхідним запасом для важких експлуатаційних умов (рух під великим кутом, короткочасні перевантаження при вході в густу рослинність, великий технологічний опір косіння).

3. Додатково визначено вимоги до енергоживлення мобільної платформи та виконано розрахунок акумуляторної батареї за енергоспоживанням і тривалістю автономної роботи, що забезпечує

узгодженість силової частини та системи керування в межах єдиного технічного рішення.

4. Синтезовано багатоконтурну структуру САК, що включає внутрішні контури регулювання складових струму статора в обертовій системі координат ($d-q$), контур регулювання потокозчеплення та зовнішній контур регулювання швидкості. У структурі враховано властивості силового перетворювача (інвертора) та взаємозв'язки між каналами керування, що підвищує точність формування електромагнітного моменту при зміні навантаження та зменшує небажані перехресні впливи між координатами d і q . Окремо забезпечено коректний режим послаблення поля у зоні підвищених швидкостей шляхом зміни завдання потокозчеплення залежно від швидкості, що дозволяє дотримуватися обмежень по напрузі інвертора та струму статора.

5. Проведене моделювання підтвердило працездатність і якість синтезованої системи: швидкість у сталих режимах підтримується з мінімальною похибкою, а перехідні процеси при зміні моменту навантаження мають керований характер без критичних перерегулювань. Момент і струми формуються відповідно до вимог режиму (транспортний рух, робочий рух на схилі, косіння, реверс), що свідчить про коректність параметризації контурів і адекватність розробленої моделі.

6. У стартап-частині показано практичну доцільність впровадження розробки в сегменті роботів для складних рельєфів, де ключовими є тяга, точність регулювання швидкості, надійність привода та підвищені вимоги до безпеки експлуатації.

Отже, запропонована система векторного керування асинхронним тяговим електроприводом може розглядатися як ефективна технічна основа для створення промислового робота-косарки, здатного стабільно переміщуватися на транспортній та робочій швидкості в умовах змінних навантажень та складного профілю місцевості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Hicks R., Hall E. A Survey of Robot Lawn Mowers. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.403770> (дата звернення: 11.09.2025).
2. Development of an Autonomous Solar Grass Cutting Robot with a Path Memorizing Mechanism / C. Manikandababu et al. 2024. P. 1–7. URL: https://www.researchgate.net/publication/382565680_Development_of_an_Autonomous_Solar_Grass_Cutting_Robot_with_a_Path_Memorizing_Mechanism (дата звернення: 11.09.2025).
3. Abdul Rahim N. A. S., Shamsudin A. U. Laser-based Autonomous Navigation of Lawnmower. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 349–356. URL: <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/eeee/article/view/6735> (дата звернення: 13.09.2025).
4. A Technical Review of Lawn Mower Technology / P. Dutta et al. *ADBU Journal of Engineering Technology (AJET)*. 2021. Vol. 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/353688834_A_Technical_Review_of_Lawn_Mower_Technology (дата звернення: 13.09.2025).
5. Константинов І. С., Приймак Б.І. Роботи-косарки: сучасний стан і тенденції розвитку. Міжнар. н.-т. журн. “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики”. 2025. 6 с. У друці.
6. Газонокосарки-роботи чи потрібно збирати скошену траву? URL: <https://robotmower.com.ua/shcho-hazonokosarky-roboty-robliat-zi-skoshenoiu-travoju/> (дата звернення: 14.09.2025).
7. HUSQVARNA AUTOMOWER 305. URL: <https://www.gplshop.pl/pl/husqvarna-automower-308> (дата звернення: 18.09.2025).
8. BOSCH Indego S+ 500. URL: <https://www.mediaexpert.pl/dom-i-ogrod/kosiarki-i-podkaszarki/roboty-koszace/indego-s-500-1> (дата звернення: 18.09.2025).

9. Robomow RS630. URL: <https://akvadesign.ua/shop/product/robot-dlia-strizhki-gazona-robomow-rs-630> (дата звернення: 18.09.2025).
10. Mammotion LUBA 2 AWD Series. URL: <https://mammotion.com/pages/luba-2-awd> (дата звернення: 18.09.2025).
11. EcoMow self-powered robotic lawnmower uses trimmed grass pellets for fuel. URL: <https://www.homecrux.com/ecomow-self-powered-robotic-lawnmower-uses-trimmed-grass-pellets-fuel/11806/> (дата звернення: 19.09.2025).
12. NEXTY develops eco-friendly electric radio-controlled mowers equipped with Spectronik hydrogen fuel cells. URL: https://www.nexty-ele.com/en/news/detail/release20230329_j (дата звернення: 19.09.2025).
13. Як вибрати газонокосарку. URL: <https://optoweek.com.ua/uk/blog/jak-vibrati-gazonokosarku-benzinovu-chi-elektrichnu> (дата звернення: 19.09.2025).
14. Обмежувальний кабель для газонокосарки-робота. URL: <https://robotmower.com.ua/chy-potribno-prokladaty-obmezhuvalnyi-kabel-dlia-hazonokosarky-robota-pid-zemleiu/> (дата звернення: 19.09.2025)..
15. Що таке RTK? Яка різниця між GPS та RTK? URL: <https://ua.led-diode.com/news/what-is-an-rtk-what-is-the-difference-between-26471919.html> (дата звернення: 21.09.2025).
16. Which Is Better, Robot Lawn Mower GPS or Wire. URL: <https://us.mammotion.com/blogs/news/robot-lawn-mower-gps-or-wire> (дата звернення: 21.09.2025).
17. Infrared Sensors and PIR Sensors Breakdown. URL: <https://www.getkisi.com/guides/infrared-sensors> (дата звернення: 21.09.2025).
18. LiDAR – Light Detection and Ranging. URL: <https://www.sbg-systems.com/glossary/definition-lidar/> (дата звернення: 21.09.2025).
19. Waga A., Benhlima S., Bekri A., Abdouni J., Saber F. Z. A survey on autonomous navigation for mobile robots: From traditional techniques to deep learning and large language models // *Journal of King Saud University – Computer*

and Information Sciences. – 2025. – Vol. 37. – Art. 198. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44443-025-00216-x> (дата звернення: 21.09.2025).

20. Introduction to the A* Algorithm. URL: <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html> (дата звернення: 21.09.2025).

21. Dijkstra Algorithm. URL: <https://cp-algorithms.com/graph/dijkstra.html> (дата звернення: 21.09.2025).

22. Pulikkal Kizhakkeyil R., Patel N. Autonomous Lawn Mower -A Comprehensive Review. *International Research Journal on Advanced Science Hub*. 2025. Vol. 12. URL: https://www.researchgate.net/publication/387761733_Autonomous_Lawn_Mower_-_A_Comprehensive_Review (дата звернення: 21.09.2025).

23. Плюси та мінуси купівлі газонокосарки-робота. URL: <https://robotmower.com.ua/pliusy-ta-minusy-kupivli-hazonokosarky-robota/?srsltid=AfmBOoqD5GwsZh2pfGyaWXxPBPKFn6loECkJdODwFI6Du7HSTgx8kac> (дата звернення: 21.09.2025).

24. RC Mowers R-60. URL: <https://www.colbrookindustries.com.au/rc-mowers/rc-mowers-r-60/> (дата звернення: 13.10.2025).

25. Попович М. Г. Теорія електропривода: підручник / за ред. М. Г. Поповича. Київ: Вища школа, 1993. 494 с.

26. Розрахунок сумарного моменту інерції. URL: <https://msd.com.ua/teoriya-elektroprivoda/privedenie-momentov-inercii-j-momentov-soprotivleniya-ms-i-staticheskix-usilij-fc-uglov-povorota-j-i-zhestkостей-s-uprugix-elementov-k-raschetnoj-skorosti-i-raschetnye-sxemy-mexanicheskoy-chasti-el-pr/> (дата звернення: 15.10.2025).

27. Kelly, A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods : book. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 716 p. DOI:[10.1017/CBO9781139381284](https://doi.org/10.1017/CBO9781139381284) (дата звернення: 15.10.2025).

28. Функціональна схема та спрощений розрахунок перетворювача електропривода змінного струму: методичні вказівки до виконання

кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702 "Електромеханіка" спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / уклад. С. М. Ковбаса. Київ: НТУУ "КПІ", 2013. 22 с.

29. Інтернет магазин силового обладнання Semikron. URL: <https://www.semikron-danfoss.com/products/p/semix405tml12e4b-21919490> (дата звернення: 19.10.2025).

30. Датчик напруги LEM LV25-P, вихідний струм 25 мА. Інтернет-магазин Discon. URL: <https://discon.ua/ua/datchiki/datchik-napryazheniya-lv25-p> (дата звернення: 19.10.2025).

31. Акумулятор LG INR18650. URL: https://velo-battery.com/18650-1gmh1/?gad_source=1&gad_campaignid=22544299836&gbraid=0AAAAA-85mW3zzfLjj9VGAwAhK4I7iOW4-&gclid=EA1aIQobChMIi-CHopvZjQMVkpeDBx3NsQUFEAQYASABEgJrLvD_BwE (дата звернення: 20.10.2025).

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

33. Дерещ О. Л., Садовой О. В., Дерещ Г. О. Двохзонне регулювання швидкості асинхронних електроприводів в умовах стабілізації прискорення. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2023. Вип. 2 (43). С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.43.2023.7> (дата звернення: 07.11.2025).

34. Прумак В. Induction Motor Control System of Electric Vehicle with Improved Dynamics in Field Weakening Region. Proc. of the IEEE 2nd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering "UKRCON-2019", Lviv, July 02–06. 2019. P. 615-620. DOI: [10.1109/ukrcon.2019.8880012](https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8880012) (дата звернення: 08.11.2025).

35. Бурдільна Є. В. Система векторного керування електроприводом конвеєра зернометальної машини / Є. В. Бурдільна, С. А. Сергієнко, О. П.

Чорний // Електротехніка та електроенергетика. — 2021. — № 2. — С. 5–13.
DOI: [10.15588/1607-6761-2021-2-1](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-2-1) (дата звернення: 16.11.2025).

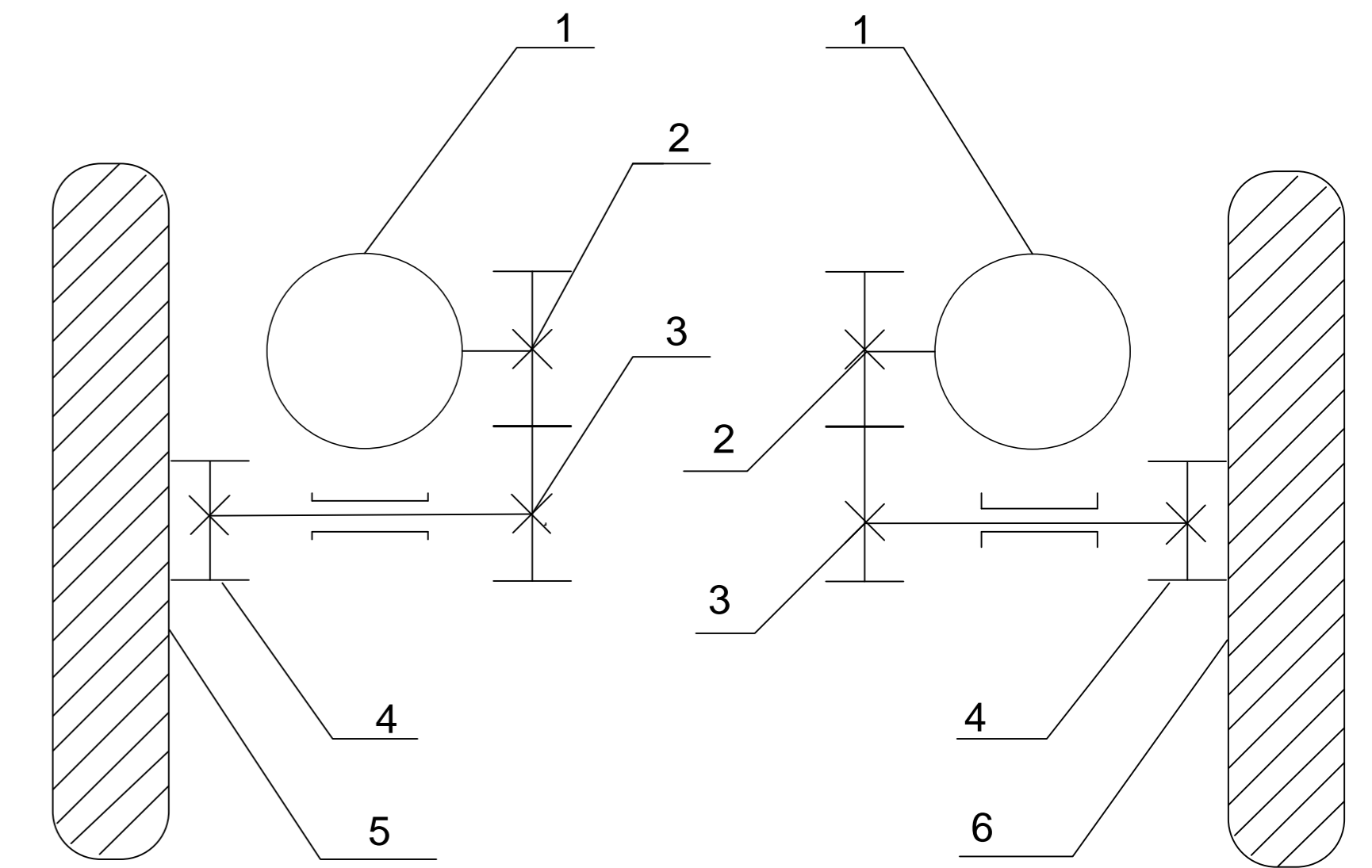
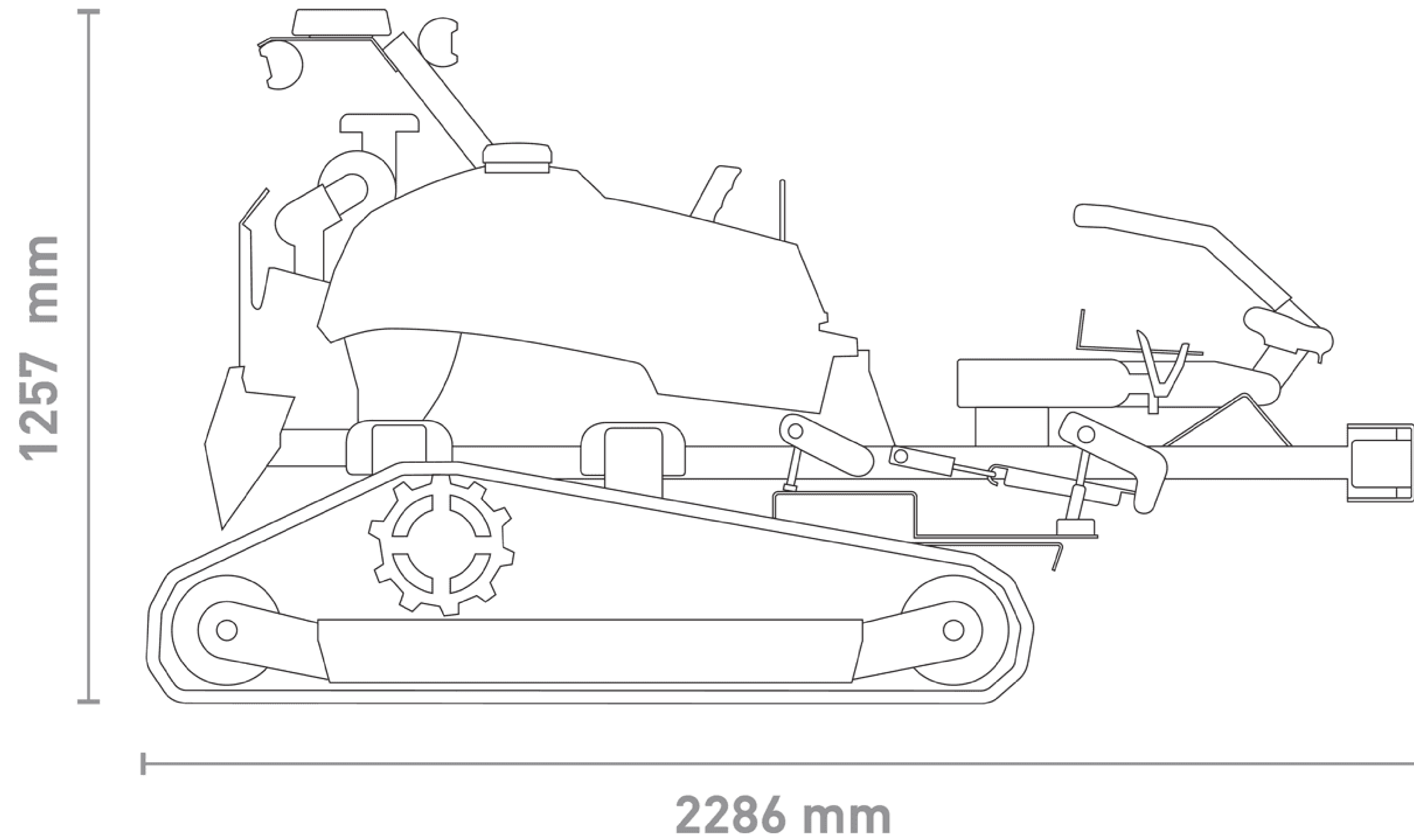
36. Покращена векторна система керування тяговим асинхронним електроприводом рухомого складу. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/keruvannja-elektropoizdom.pdf> (дата звернення: 16.11.2025).

37. DataIntel. Slope Mower Remote-Controlled Market Research Report 2033. URL: <https://dataintel.com/report/slope-mower-remote-controlled-market> (дата звернення: 01.12.2025).

38. SPIDER. Official Global Website. Slope mowers up to 60 degrees. URL: <https://www.spidermower.com/> (дата звернення: 02.12.2025).

39. Green Climber. Remote Control Slope Mowers. URL: <https://www.greenclimberna.com/> (дата звернення: 01.12.2025).

Додаток А

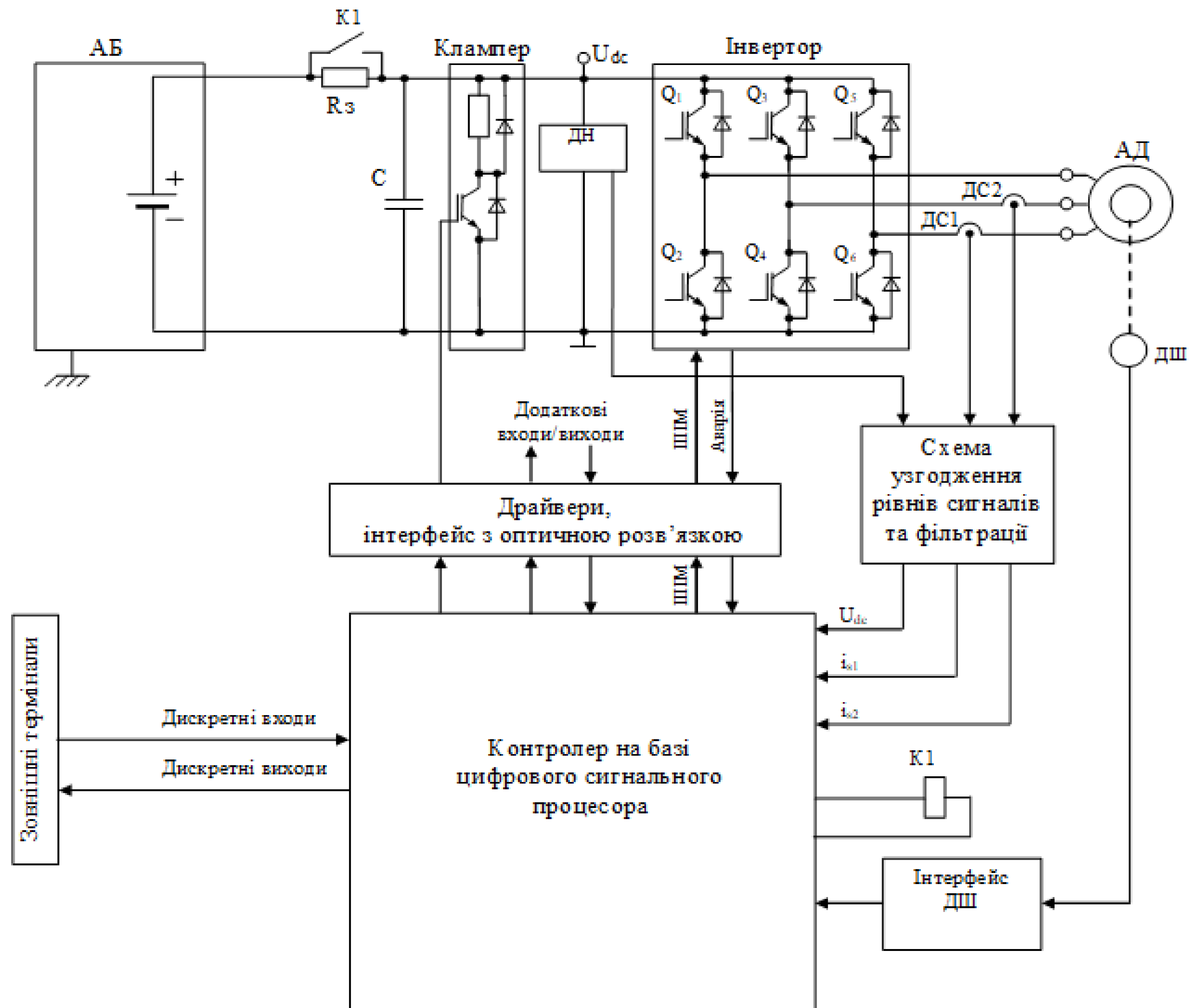


Кінематична схема робота-газонокосарки

- 1 – Асинхронні двигуни
- 2 – Привідні шестерні редукторів
- 3 – Ведені шестерні редукторів
- 4 – Ведуча зірка гусениці
- 5 – Ліва гусениця
- 6 – Права гусениця

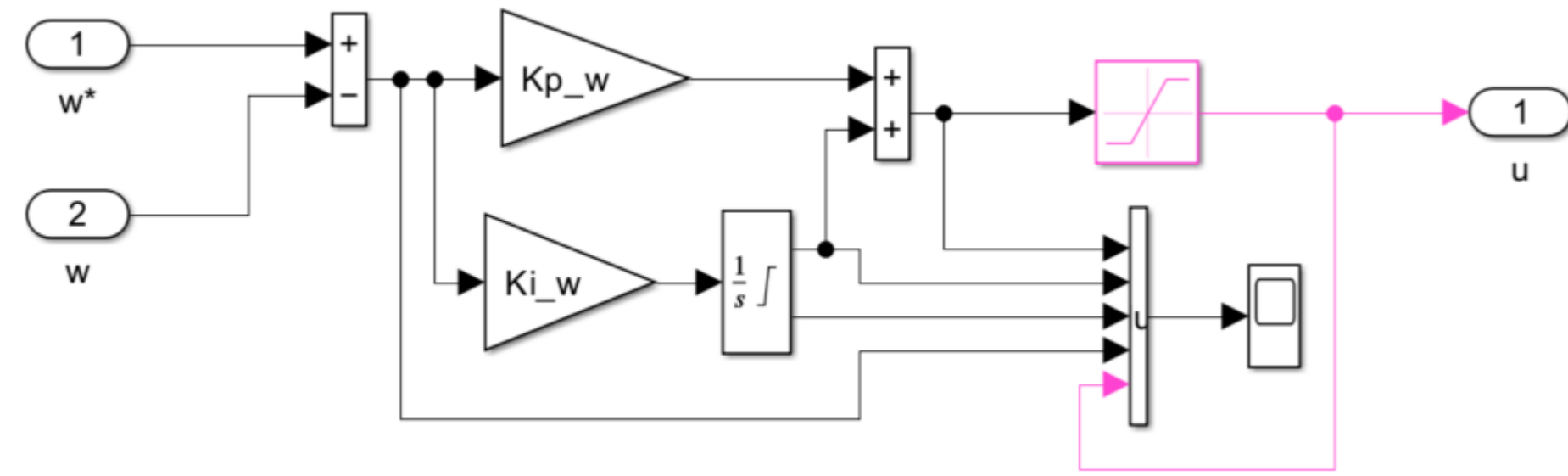
					141.4110.010 МД				
Зм.	Арх.	Ур. докум.	Підпис	Дата	Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки	Лит.	Маса	Масштаб	
Розроб.	Конструктор	К.С.						1:1	
Перевір.	Проймач	Б.І.				Арх.	1	Архив	1
Реценз.	Степаново	А.С.				Габаритні розміри прототипу та кінематична схема			
Н. Коопр.									
Затверд.	Кобяк	С.М.			НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41ми				

Додаток Б

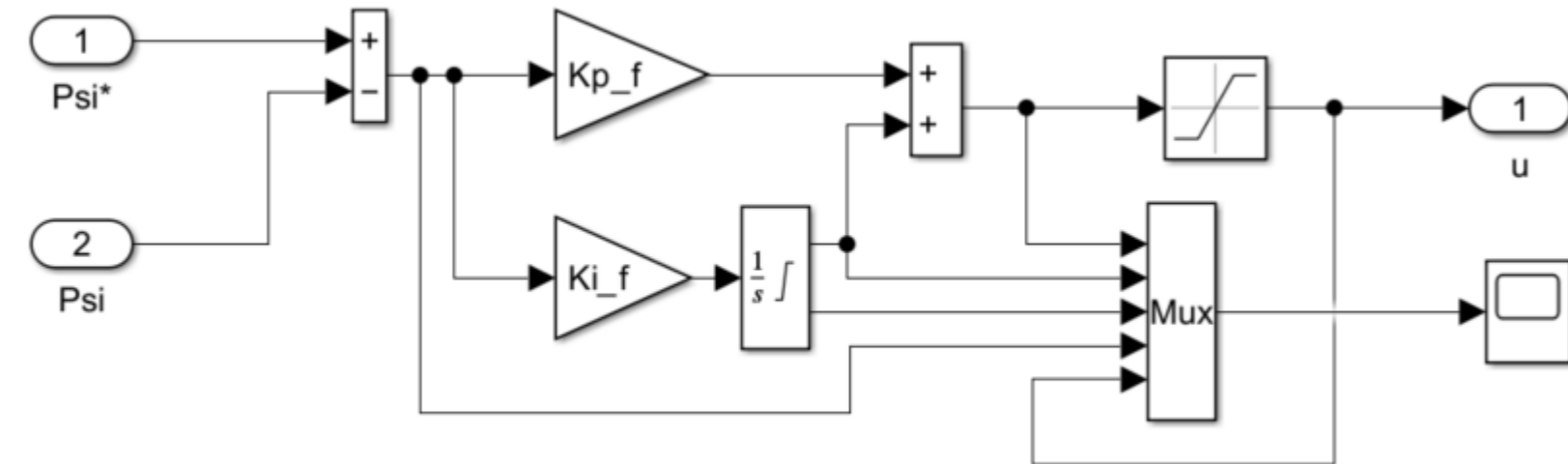


					141.4110.010 МД		
Змі.	Арх.	№ докум.	Після	Дата	Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки		
Розроб.	Конструктор	Л.С.			Лит.	Маса	Масштаб
Перевір.	Проймак	Б.І.					1:1
Реценз.	Степаново	Л.С.			Арх.	1	Архив
Н. Контр.					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41ми		
Затверд.	Кобяк	С.М.			Структурно-принципова схема системи керування приводом		

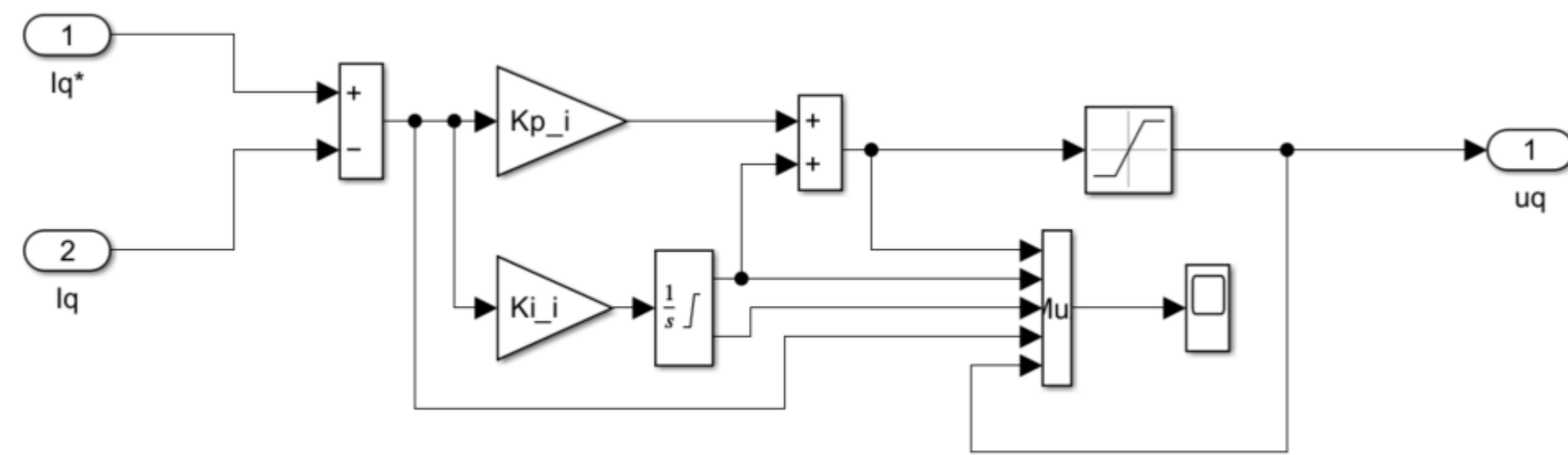
Додаток Г



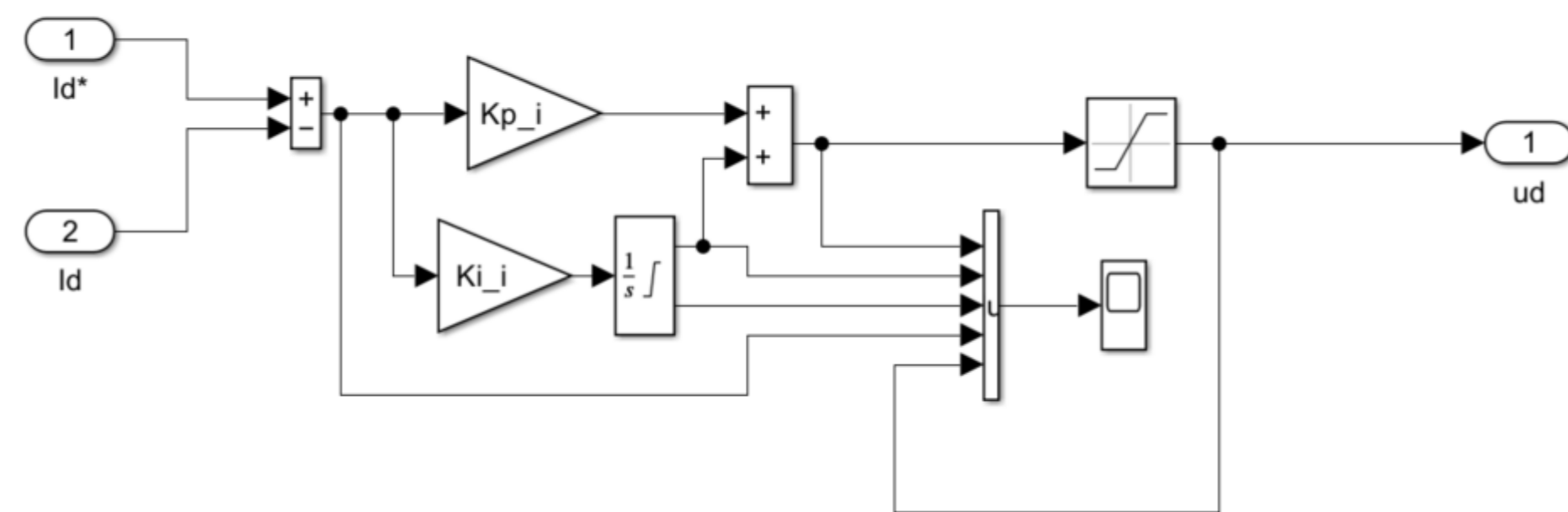
Контур регулювання швидкості



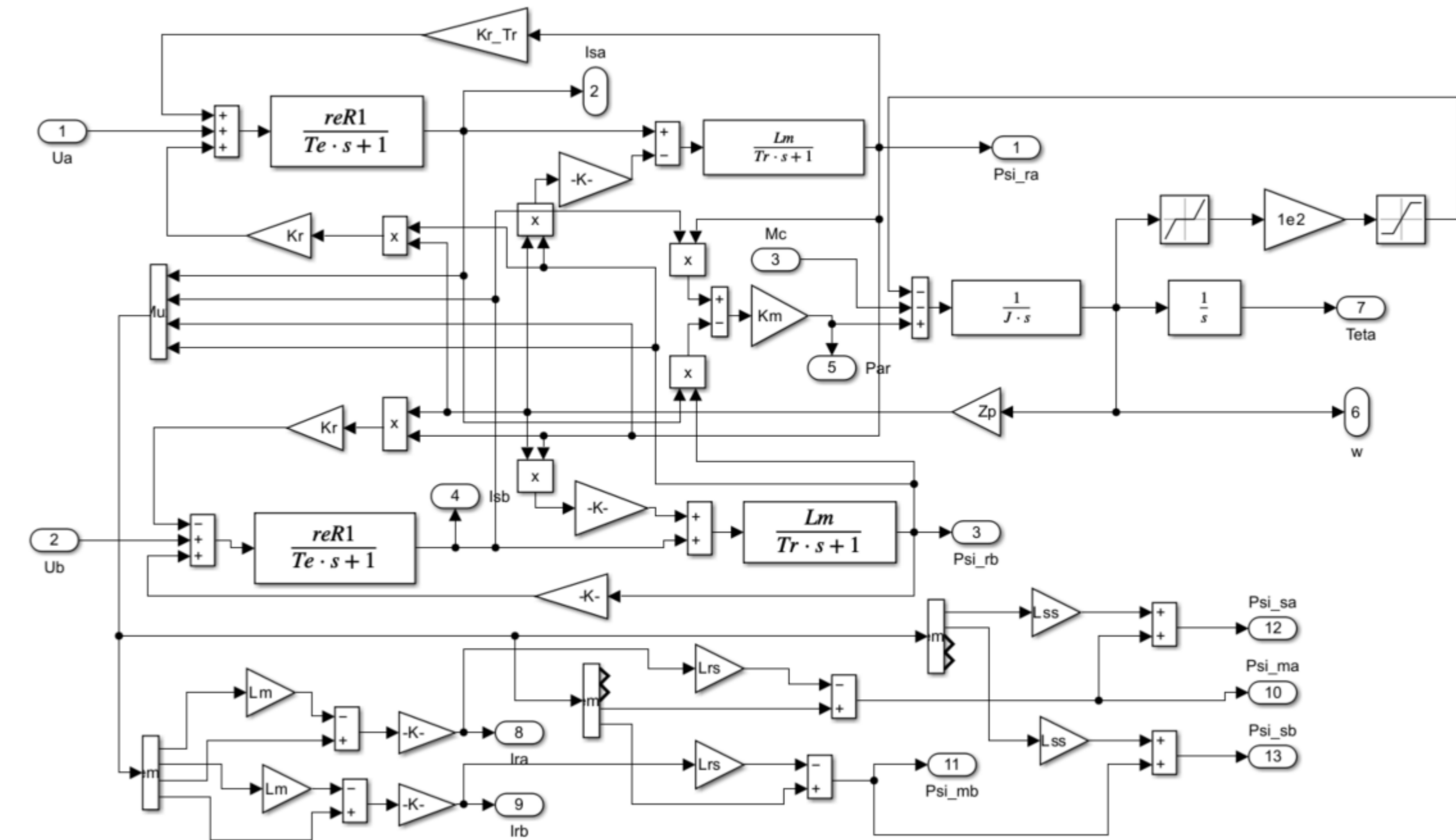
Контур регулювання потокозчеплення ротора



Контур регулювання струму iq



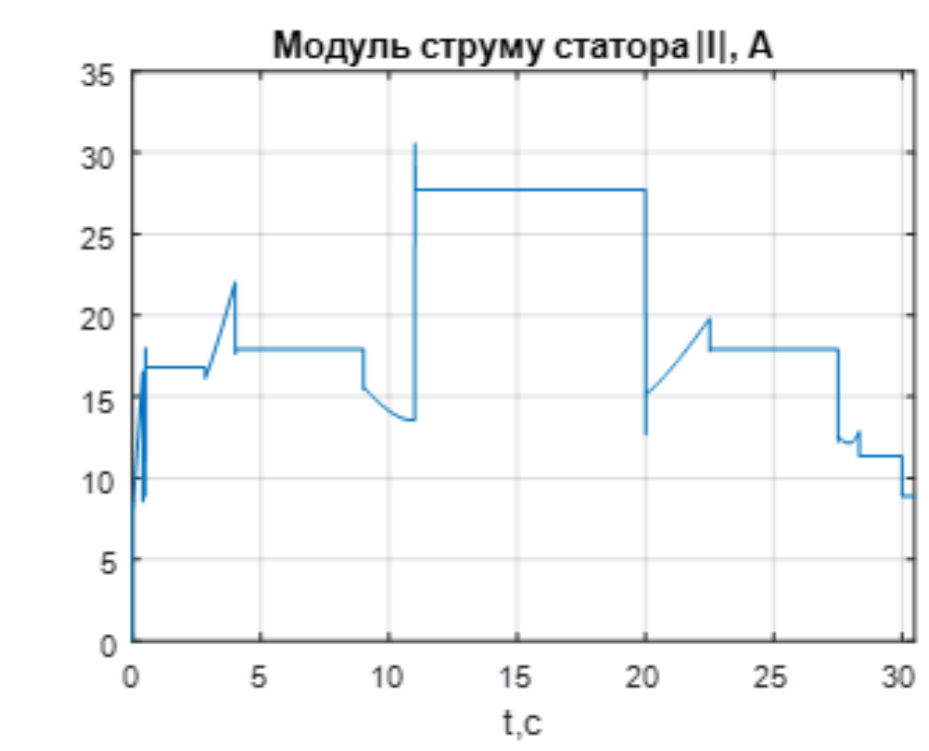
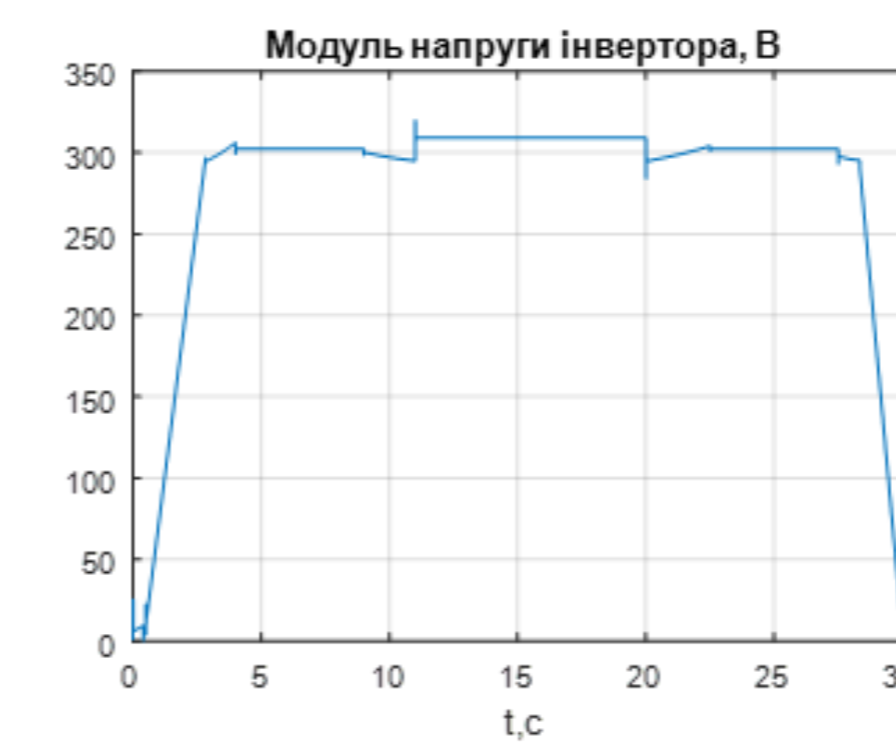
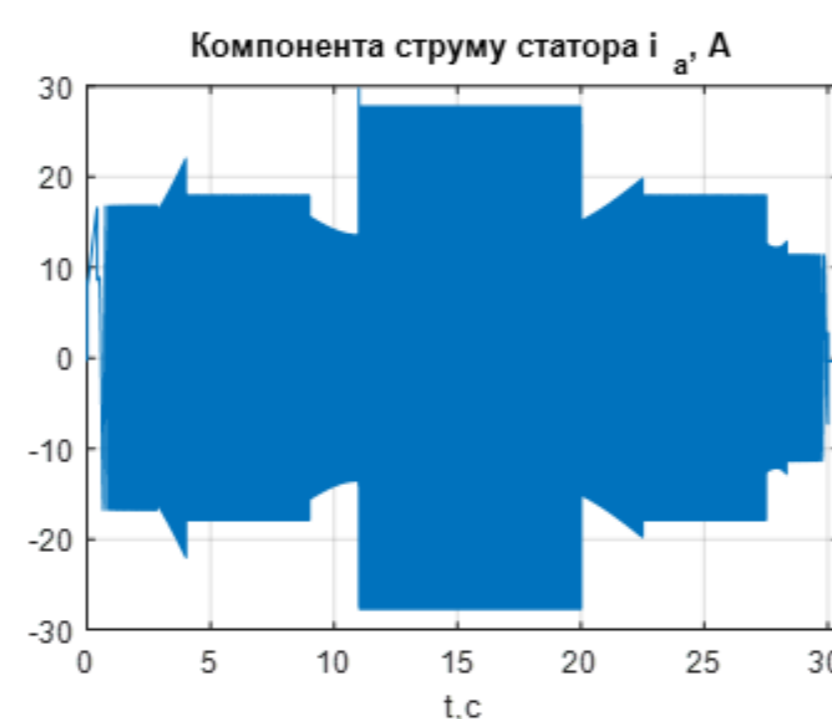
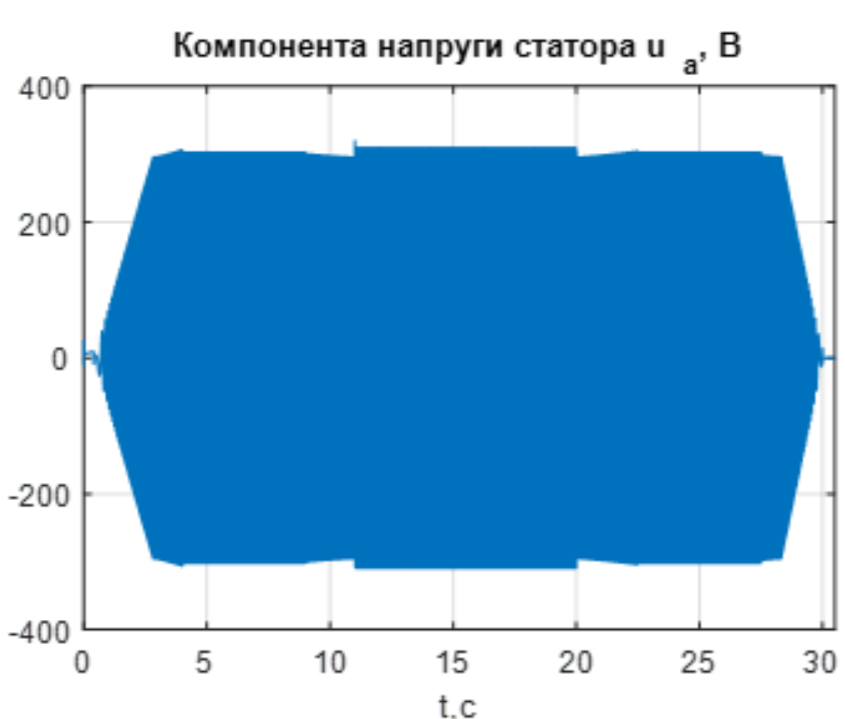
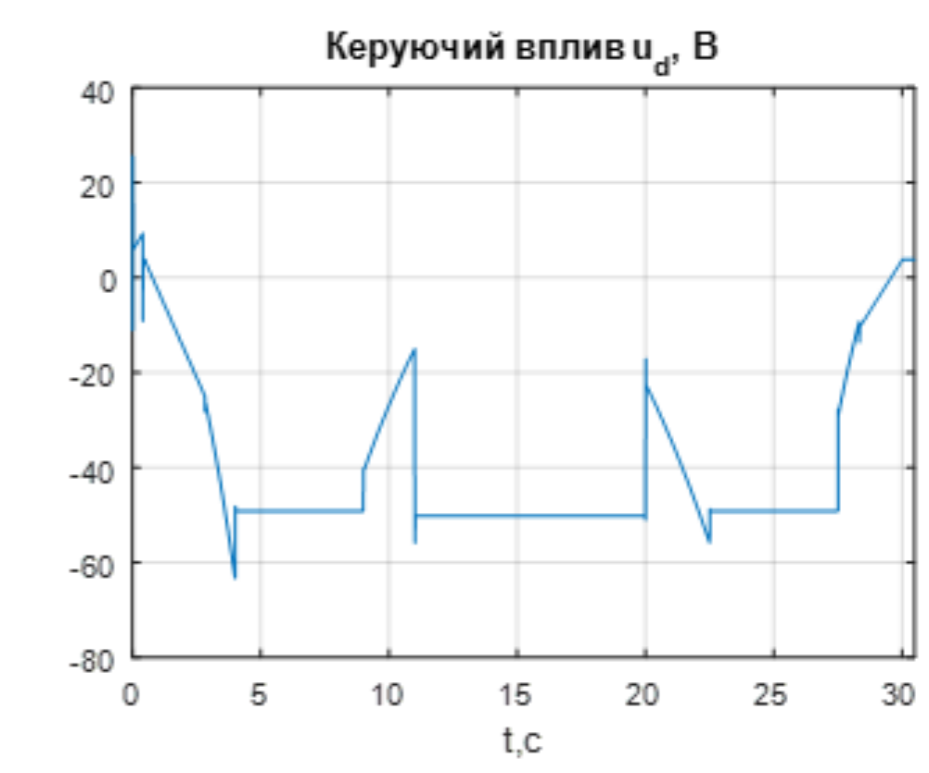
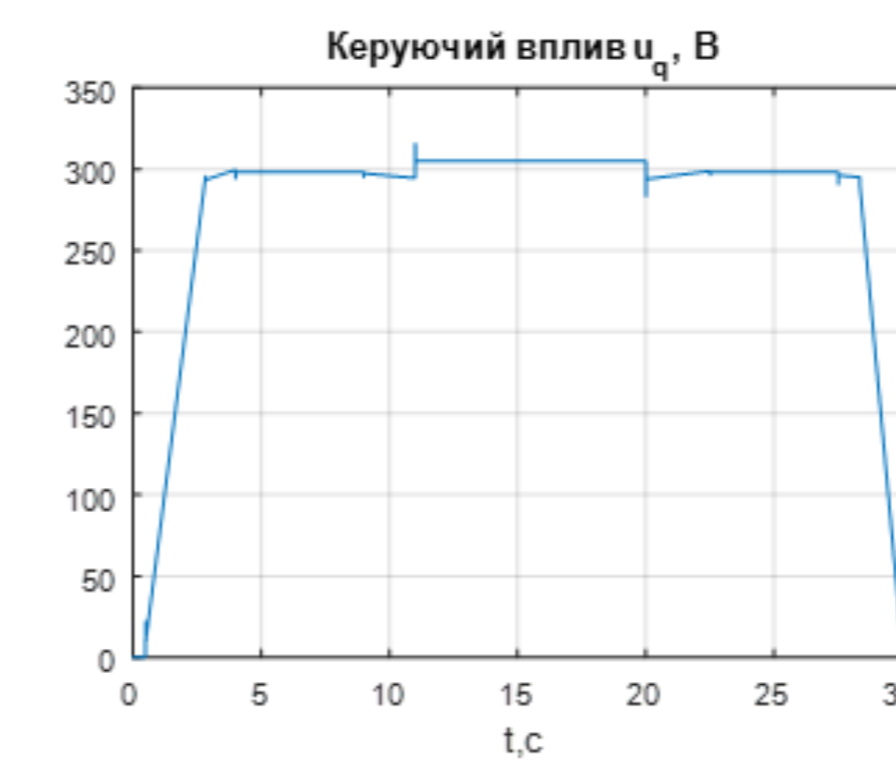
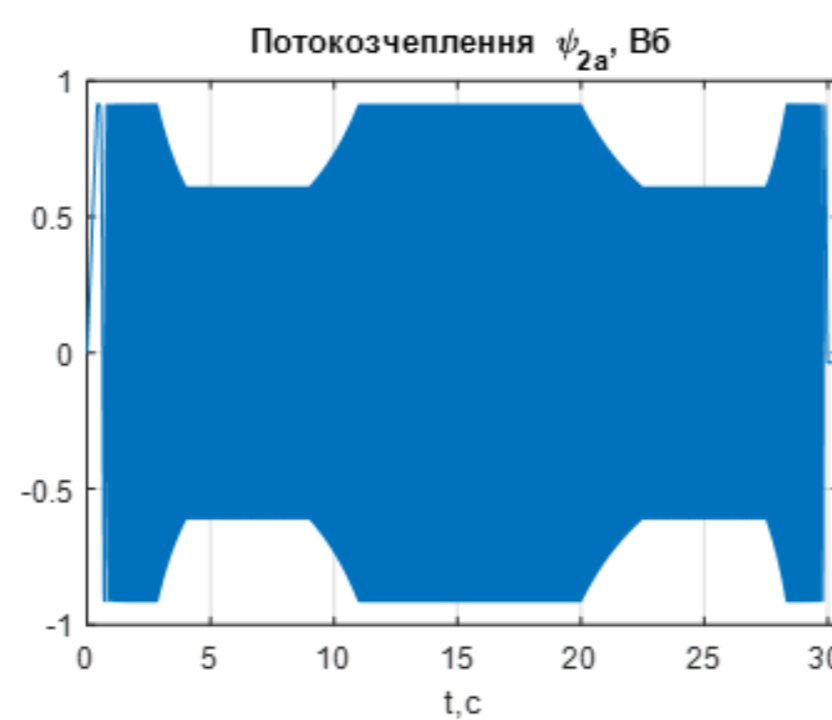
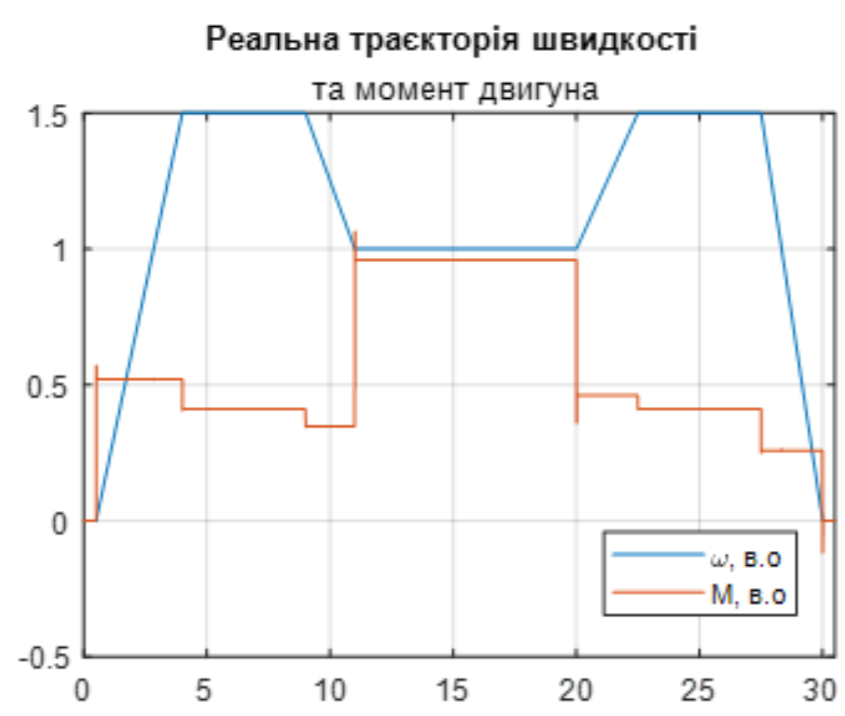
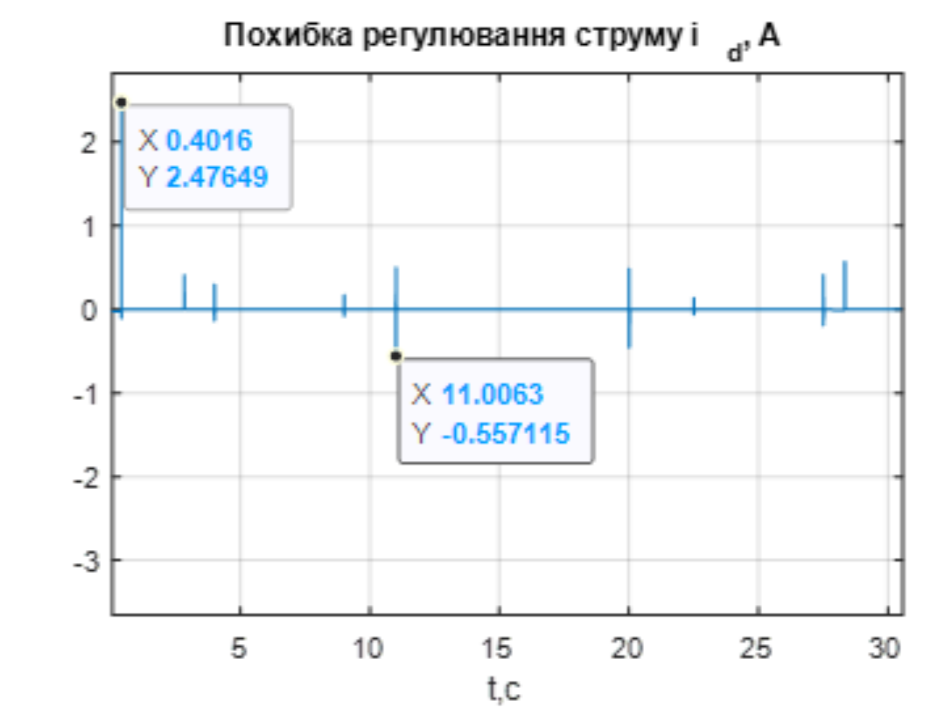
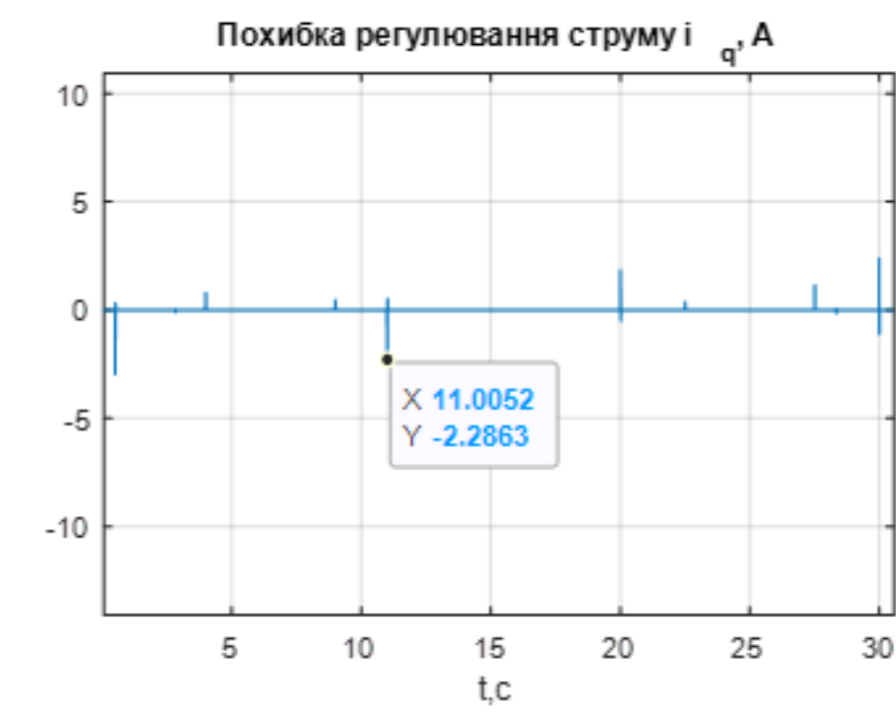
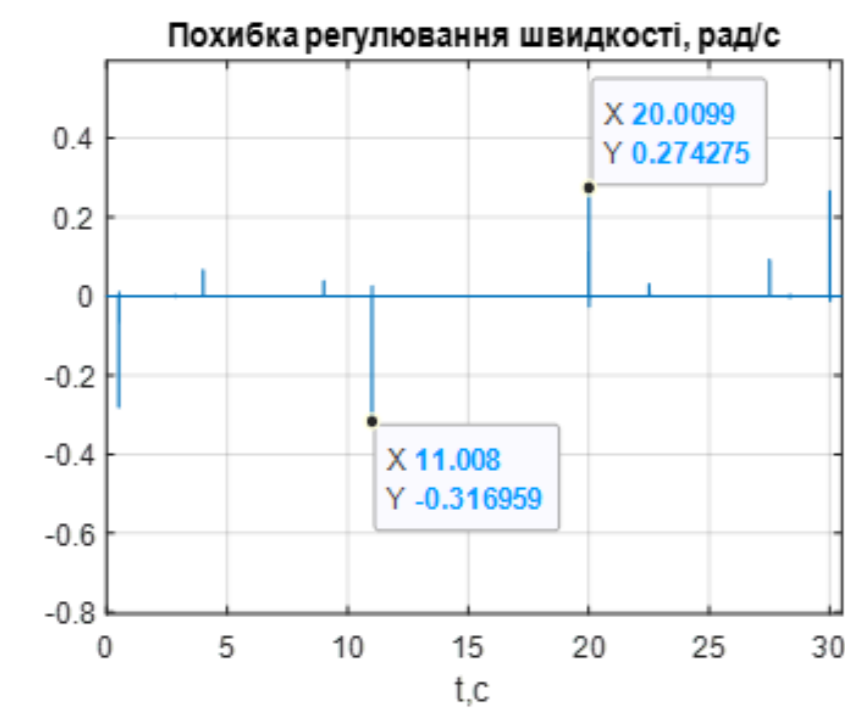
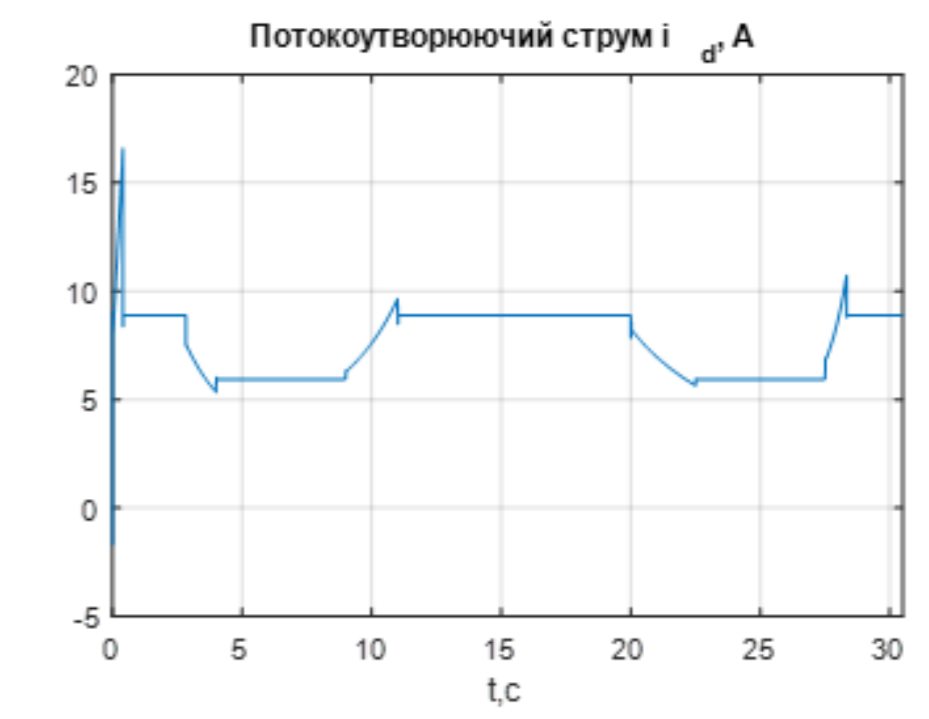
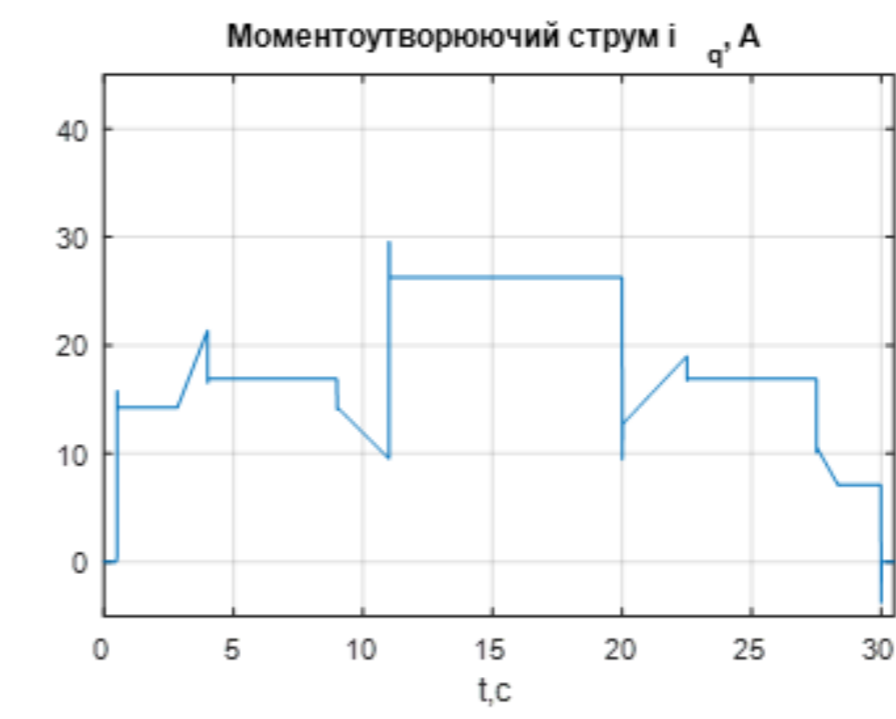
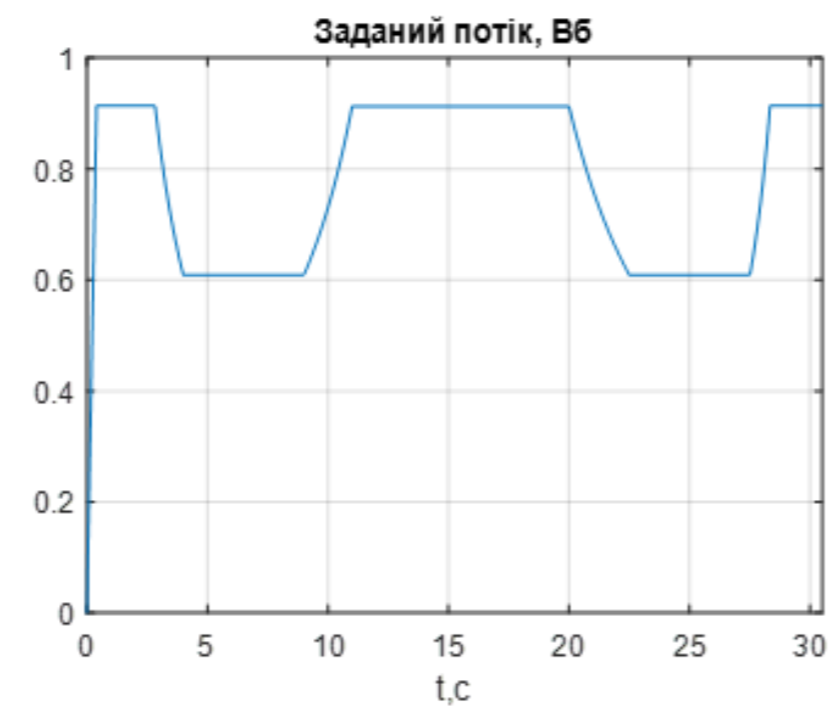
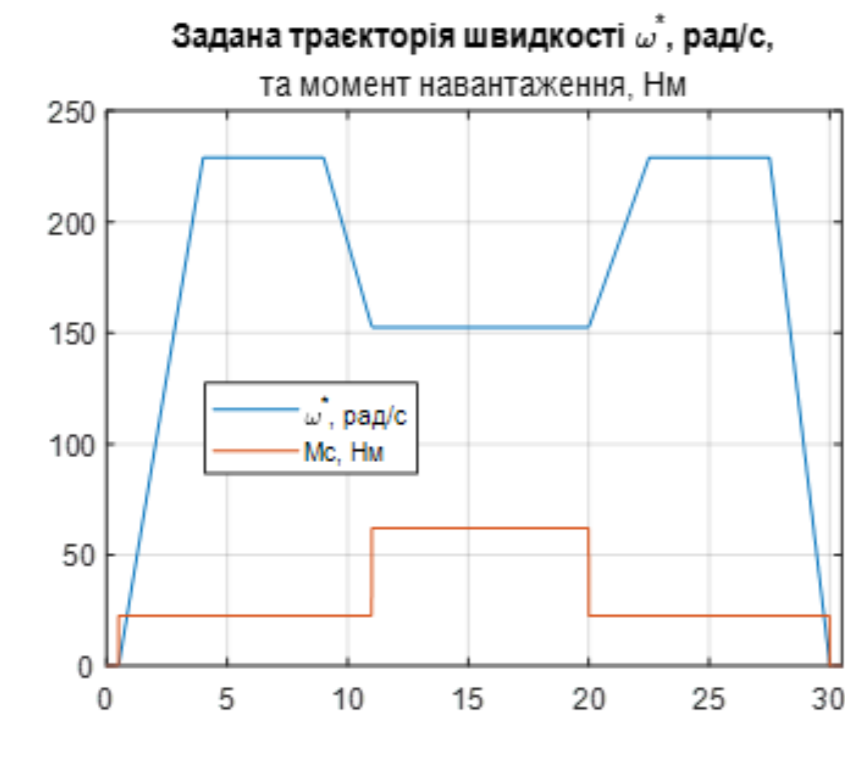
Контур регулювання струму id



Модель асинхронного двигуна в системі координат (d - q)

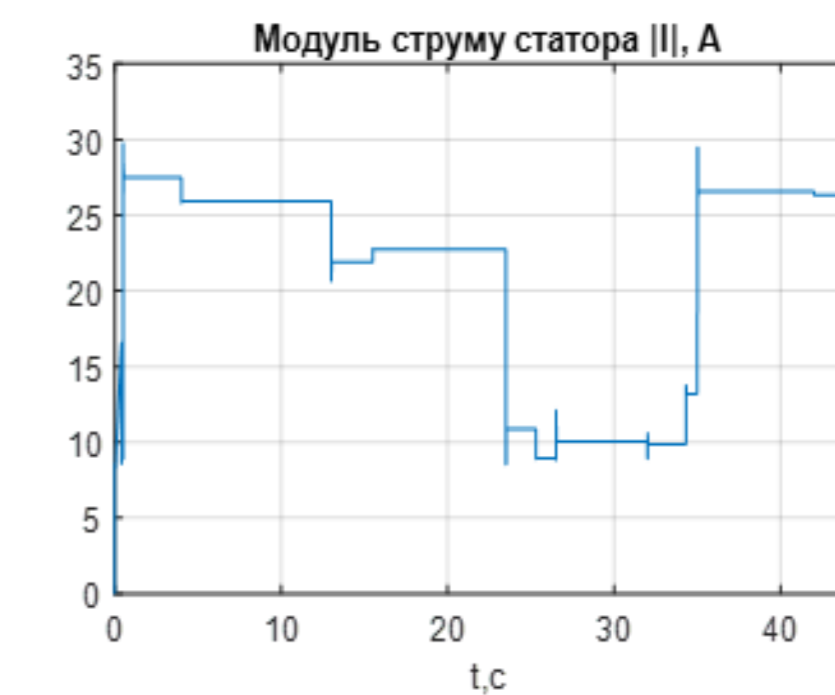
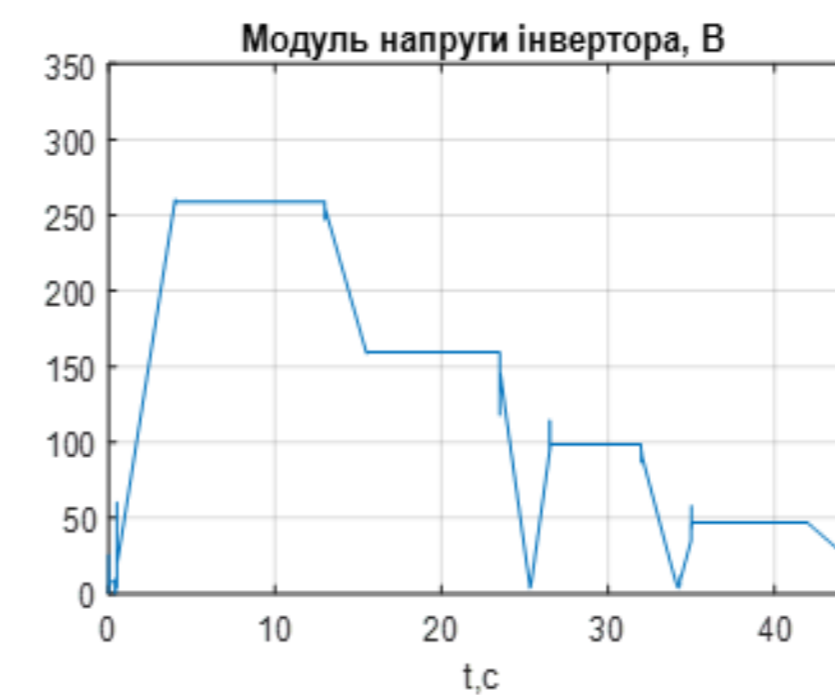
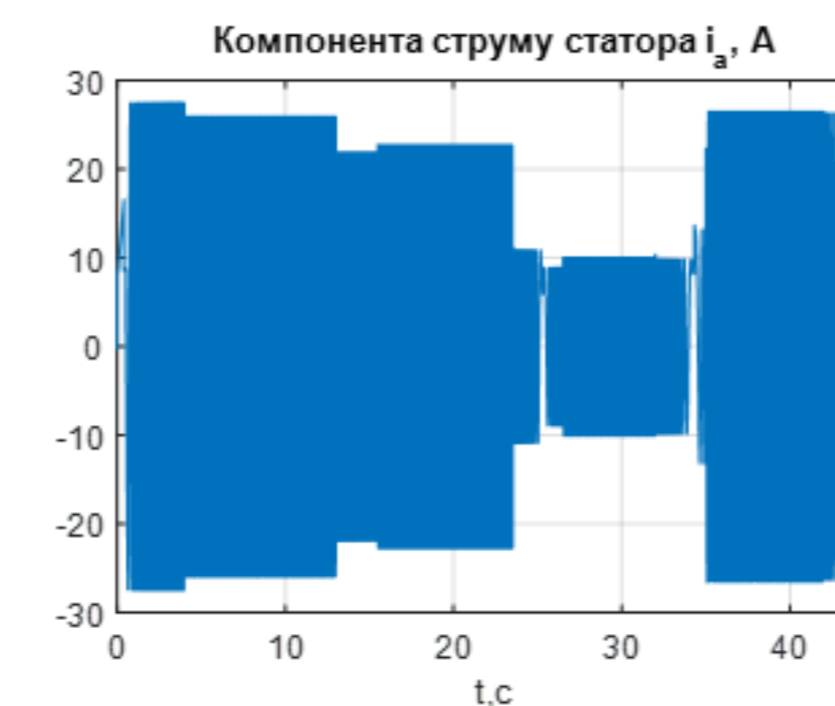
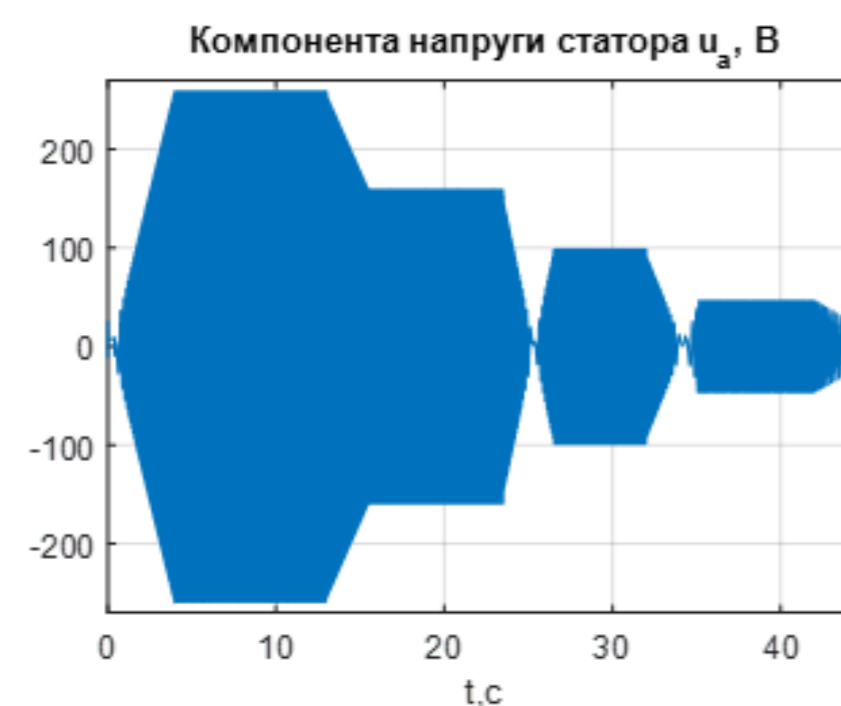
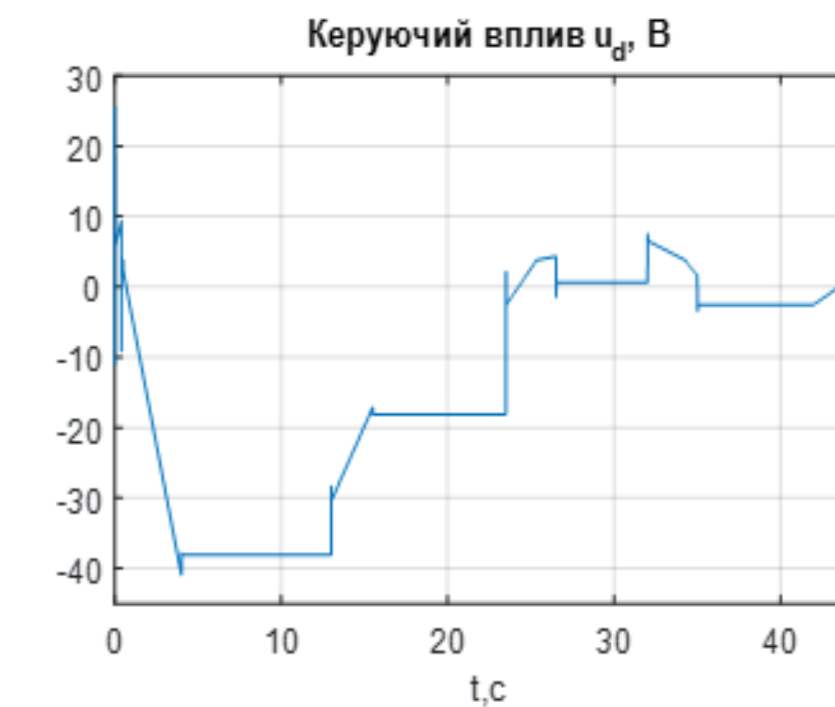
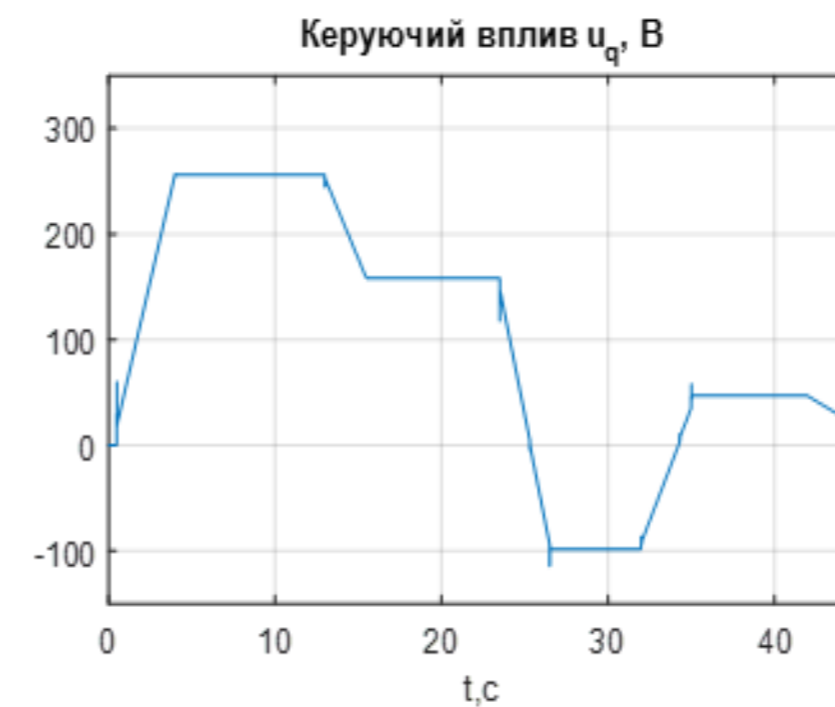
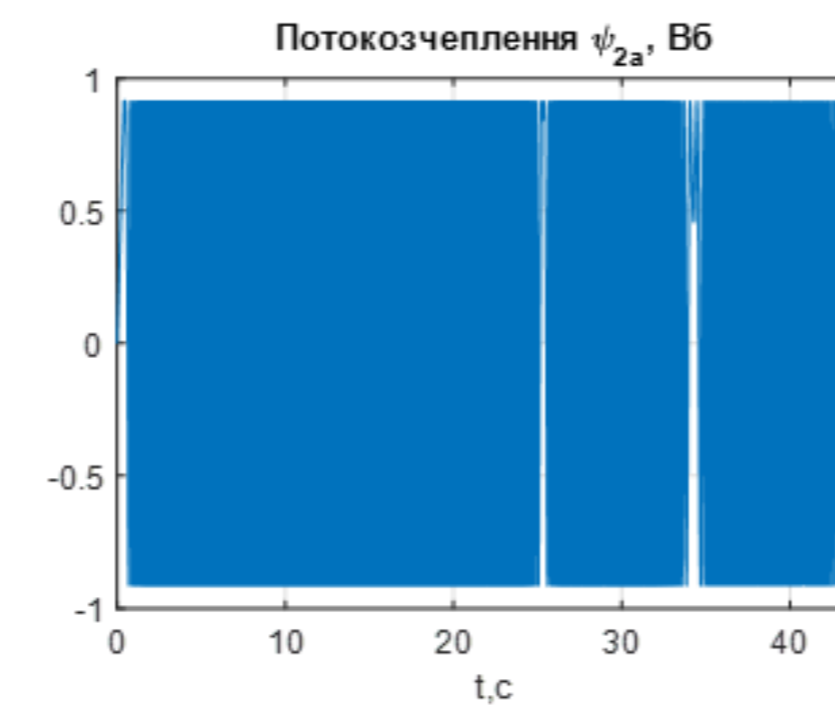
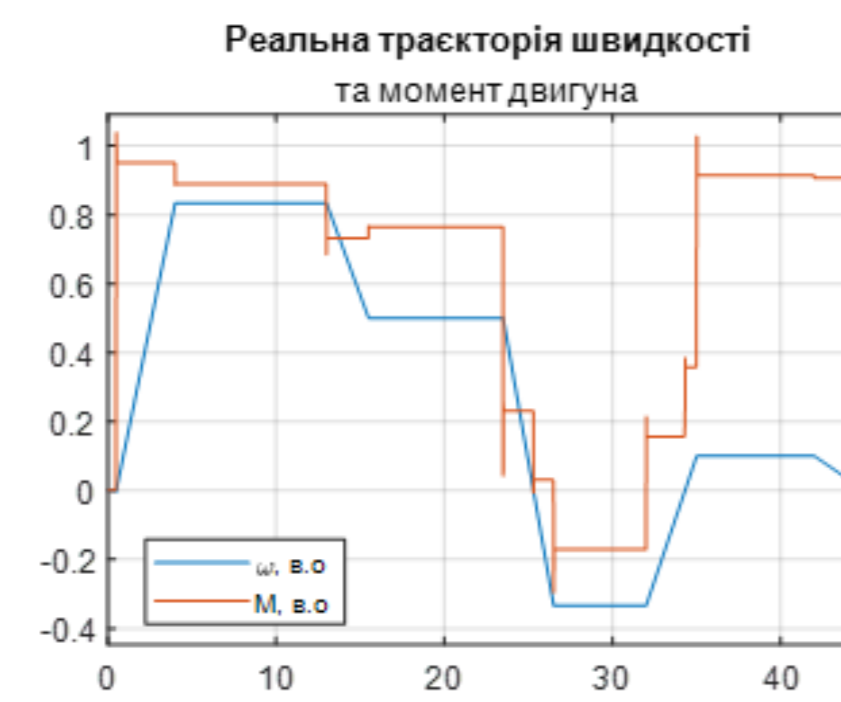
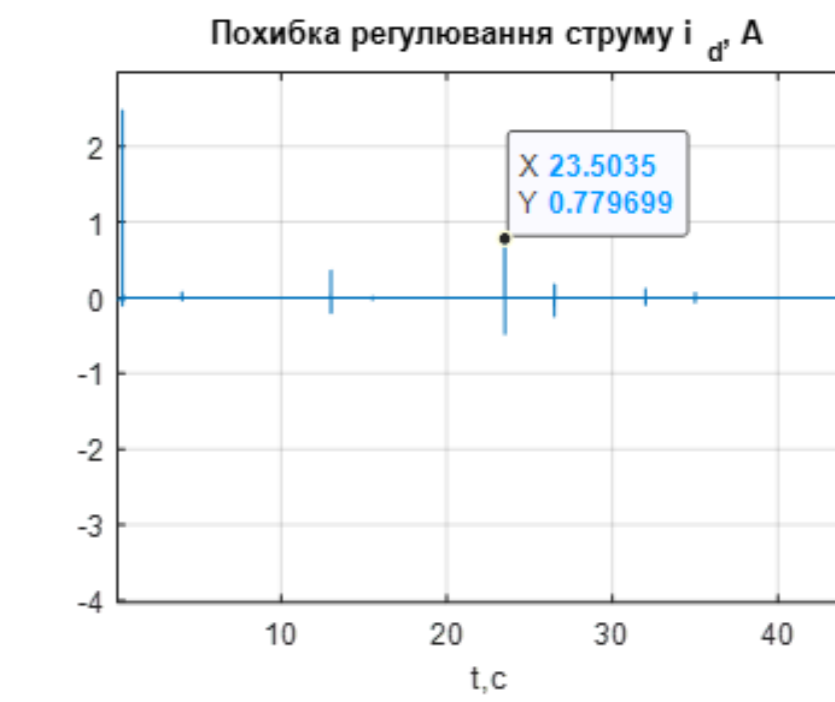
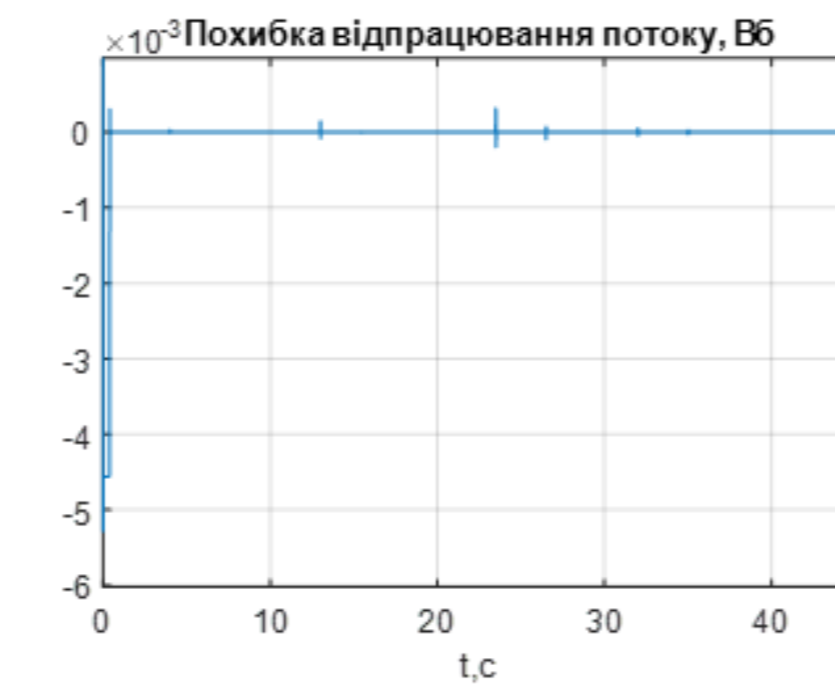
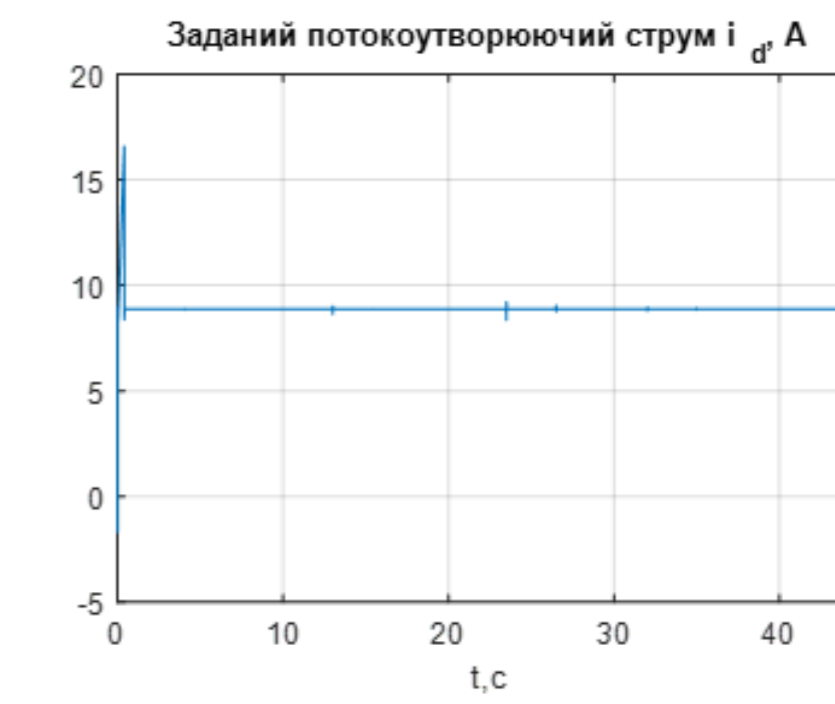
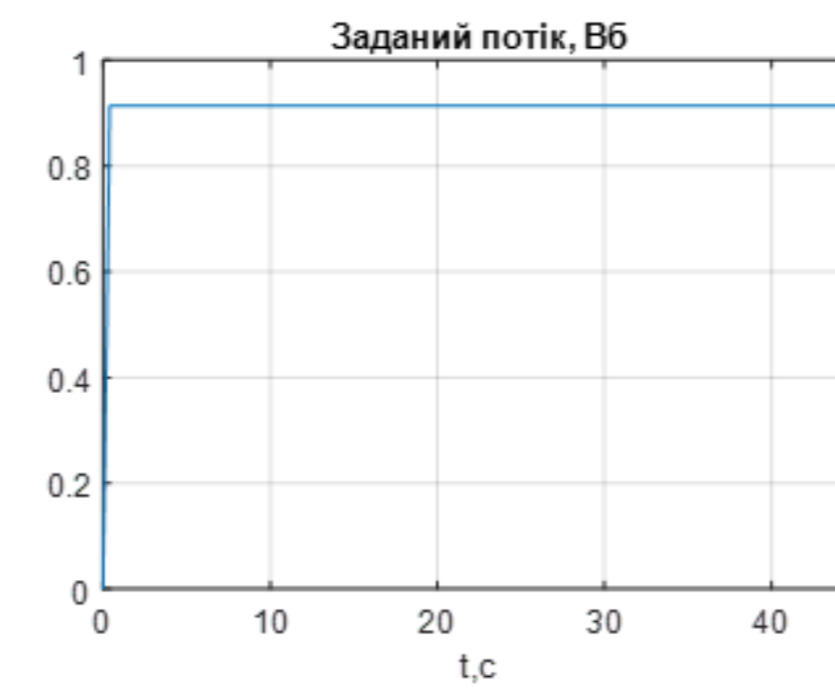
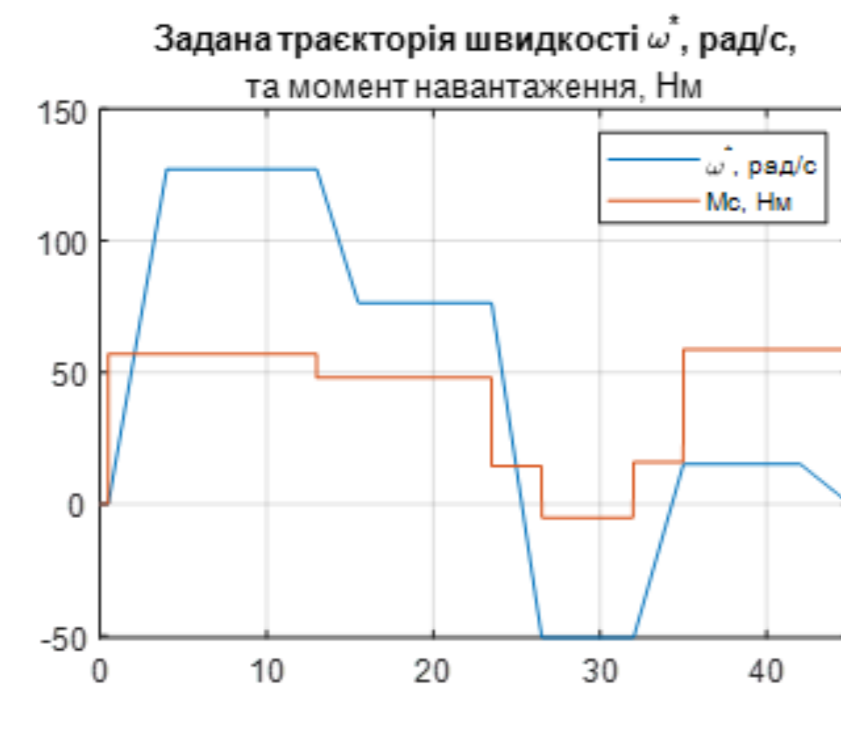
				141.4110.010 МД						
Змі.	Арх.	№ докум.	Піліс	Дата	Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки		Лит.	Маса	Масштаб	
Розроб.	Константино І.С.									1 : 1
Перевір.	Приймак Б.І.									
Г. Контр.										
Реценз.	Степаново І.С.					Фрагменти моделюючої програми в середовищі MATLAB/Simulink		НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41ми		
Н. Контр.										
Затверд.	Кобяк С.М.									

Додаток Д



				141.4110.010 МД				
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки Результати дослідів при роботі в першій зоні регулювання швидкості з виходом в другу зону			
Розроб.	Конструктор	Г.С.						
Перевір.	Проймак	Б.І.						
Г. Копр.	Степаново	І.С.						
Н. Копр.	Ковбася	С.М.						
Затверд.					Лит.	Маса	Масштаб	
							1:1	
					Арх.	1	Архив	1
					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41ми			

Додаток Е



				141.4110.010 МД				
Змі.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматичного керування електроприводом робота-косарки Результати дослідів при роботі на швидкостях нижче номіналу зі змінним моментом навантаження			
Розроб.	Конструктор	Користувач						
Перевір.	Привітний	Б.І.						
Реценз.	Степанів	А.С.						
Н. Копр.								
Затверд.	Кобяк	С.М.			Лит.	Маса	Масштаб	
							1:1	
					Арх.	1	Архив	1
					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41ми			