

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) Сергій КОВБАСА

“ ____ ” _____ 2024 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Автоматизований електропривод поворотного механізму роторного
екскаватора

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-02
(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові) Левченко Гліб Георгійович (підпис)

Керівник доц. Теряєв Віталій Іванович (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

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

Рецензент доц. Реуцький М.О. (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				141.ЕП0210.009.БР		
	ПБ	Підп.	Дата	АЕП поворотного механізму роторного екскаватора Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Левченко Г. Г.				2	73
Керівн.	Теряєв В. І.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-02	
Консульт.						
Н/контр.	Теряєв В. І.					
Зав.каф.	Ковбаса С. М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Автоматизований електропривод поворотного механізму роторного
екскаватора

Київ – 2024 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Левченку Глібу Георгійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизований електропривод поворотного механізму роторного екскаватора,

керівник проекту _____ доц. Теряєв Віталій Іванович,

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

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

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2024
 р.

3. Вихідні дані до проекту напруга живлення 380 В, частота мережі 50 Гц, маса екскаватора 710 т, максимальна швидкість повороту 30 м/хв, висота копання 17 м, глибина копання 1,7 м; діаметр ротора, 6,6 м; продуктивність 1500 м³/год; радіус копання, 24,4 м.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. 1. Аналітичний огляд в області електроприводів роторних екскаваторів. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3. Вибір електродвигуна та силового обладнання. 4. Розробка

математичної моделі електроприводу. Розрахунок параметрів елементів електроприводу. 5. Синтез системи автоматичного керування. 6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. Аналіз результатів. 7. Спецчастина. Автоматизація електроприводу поворотного механізму. 8. Розробка схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Загальний вид установки, Схема електрична принципова. Структурна схема та результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

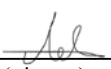
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. _____ Дата _____ видачі _____ завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд в області електроприводів роторних екскаваторів	20.04.24	
2	Визначення потрібної потужності електродвигуна	30.04.24	
3	Вибір електродвигуна та силового обладнання.	5.05.24	
4	Розробка математичної моделі електроприводу.	10.05.24	
5	Синтез системи автоматичного керування.	20.05.24	
6	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи.	25.05.24	
7	Спецчастина. Автоматизація електроприводу поворотного механізму.	31.05.24	
8	Розробка (опис) схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою.	5.06.24	
9	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	10.06.24	

Студент


(підпис)

Гліб ЛЕВЧЕНКО

Керівник проекту

Віталій ТЕРЯЄВ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з 70 сторінок пояснювальної записки, 35 рисунків, 12 таблиць, 4 додатків.

В даному дипломному проекті розглянуто систему керування електроприводом механізму повороту роторного екскаватора ЕР-1500. Проведено розрахунки для вибору двигуна та перевірено його за нагрівом та перевантаженням. Розроблено математичну модель електроприводу та розраховано параметри його елементів.

Створено модель в програмному середовищі MatLab/Simulink для дослідження статичних та динамічних режимів.

Обрано програмований логічний контролер та розроблено систему автоматизації поворотного механізму.

РОТОРНИЙ ЕКСКАВАТОР, МЕХАНІЗМ ПОВОРОТУ,
ЕЛЕКТРОПРИВОД, РЕГУЛЬОВАНИЙ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ,
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, НАВАНТАЖУВАЛЬНА ДІАГРАМА,
АВТОМАТИЗАЦІЯ

					141.ЕП0210.009.БР				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Левченко Г. Г.			Автоматизований электропривод поворотного механізму роторного екскаватора Реферат				
Керівн.		Теряєв. В. І.							
Реценз.									
Н. Контр.		Теряєв. В. І.							
Зав. каф		Ковбаса С. М.							
					Літ.	Арк.	Акрушів		
							6	73	
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-02				

SUMMARY

The diploma project consists of an explanatory note of a 70 page, 35 figures, 12 tables, and 4 appendices.

This diploma project considers the control system of the electric drive of the rotary excavator ER-1500. Calculations were made to select the motor and checked for heating and overload. A mathematical model of the electric drive was developed and the parameters of its elements were calculated.

A model was created in the MatLab/Simulink software environment to study static and dynamic modes.

A programmable logic controller was selected and a system for automating the rotary mechanism was developed.

ROTARY EXCAVATOR, ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY
CONVERTER, MATHEMATICAL MODEL, LOAD DIAGRAM,
AUTOMATION.

					141.EP0210.009.BW				
	letter	№ of document	Sign	Date					
Devel.		H. Levchrnko			Automated electric drive of the rotary excavator's rotary mechanism	L.	Page	Pages	
Checked		V. Teryayev					7	73	
Recension						NTUU "I. Sikorskiy KPI", FEA department AEMS-ED gr. EP- 02			
N. contr.		V. Teryayev							
Approved		S. Kovbasa							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РОТОРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ.....	12
1.1 Галузі використання та типові технічні рішення електроприводів роторних екскаваторів	14
1.2 Опис екскаватора та його системи електроприводу поворотного механізму.....	17
1.3 Формулювання вимог до електроприводу, системи автоматичного керування та автоматизації.....	20
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	24
2.1 Розрахунок потужності електродвигуна та побудова навантажувальної діаграми	24
3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.	27
3.1 Перевірка двигуна за нагрівом	27
3.2 Перевірка двигуна по перевантажувальній здатності	32
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	34
4.1 Базові принципи проектування алгоритму векторного керування.....	34
4.2 Алгоритм непрямого векторного керування АД	37
5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	40
5.1 Розрахунок номінальних даних двигуна	40
5.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	42
5.3 Дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД.....	45
5.4 Дослідження динамічних характеристик при при відпрацюванні нульової швидкості і зміні початкових умов потокозчеплення.....	50

5.5 Дослідження динамічних характеристик при відсутності компенсацій першої похідної швидкості	53
6 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОВОРОТНОГО МЕХАНІЗМУ	56
6.1 Вибір програмованого логічного контролера	56
6.2 Логічний синтез та розробка програми.....	58
7 РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ	64
7.1 Вибір перетворювача частоти	64
ВИСНОВКИ	70
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТОК А.....	75
ДОДАТОК Б.....	76
ДОДАТОК В.....	77
ДОДАТОК Г	78

ВСТУП

Гірничодобувне обладнання різноманітне за своїм функціональним призначенням у технологічному процесі і включає як типове для різних груп, так і специфічне обладнання, характерне тільки для конкретної групи. До першого відносяться насоси, вентилятори, компресори, конвеєри, підйомні машини та ін.; до другого - вугільні та прохідницькі комбайни, різноманітні екскаватори, бурові верстати, кар'єрний транспорт (автомобільний, тролейвозний) та ін.

Роторний екскаватор є складною машиною з безліччю рухомих частин, включаючи стрілу, яка повинна повертатися і підніматися, механізм повороту, гусениці для переміщення екскаватора вперед і роторне колесо, що обертається. Для нормальної роботи системи всі ці компоненти вимагають наявності електроприводів.

Специфіка роботи: велика потужність електроприводів та їх живлення від тимчасових ліній електропередач або автономних джерел; великі динамічні навантаження електроприводів та механізмів; часта робота механізмів на упор; необхідність забезпечення високої надійності. Для машин та механізмів, що застосовуються у наземних та підземних виробках, при виборі електрообладнання необхідно враховувати наявність пилу, вологи, можливість роботи у вибухонебезпечній атмосфері, обмеження розмірів електрообладнання за одночасної вимоги підвищення міцності.

Актуальність роботи: роторні екскаватори займають важливе місце у сучасному будівництві та видобутку корисних копалин. Тому дослідження електроприводу поворотного механізму, який є одним з головних компонентів, дозволить в майбутньому покращити хід технологічного процесу.

Мета роботи: дослідження можливості модернізації існуючої системи електроприводу механізму повороту на основі асинхронного двигуна з застосуванням векторного керування. Проведення розрахунків параметрів для

асинхронного електродвигуна та дослідження його характеристик шляхом моделювання.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РОТОРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

У сучасному гірничодобувному виробництві роторні екскаватори є важливою складовою, які відносяться до екскаваторних машин безперервної дії. Робочим органом таких екскаваторів є роторний ківш, тобто барабан з ковшем, що безперервно обертається, який збирає сипучу породу в одній точці циклу обертання і вивантажує її на конвеєрну стрічку в протилежній точці, де порода переміщується в секторі вивантаження [1].

Діаметр роторного барабана варіюється від 2 до 18 метрів. Більшість роторних екскаваторів оснащені гусеничним ходом, особливо великі екскаватори оснащені рейковим ходом.

Продуктивність роторних екскаваторів може досягати 15000 кубометрів на годину. Роторні екскаватори часто використовуються в кар'єрах для видобутку пухкої або середньої твердості породи. Роторні екскаватори, призначені для видобутку вугілля відкритим способом, можуть розвивати високі зусилля різання.

Роторні екскаватори складаються з наступних основних компонентів:

- роторне колесо - це обертовий елемент з ківшами, який захоплює ґрунт чи породу;
- стріла - довга конструкція, на кінці якої закріплений ротор;
- ковшовий ланцюг - система ківшів, яка розташована на роторному колесі та забезпечує захоплення матеріалу;
- конвеєрна система - транспортні стрічки для переміщення видобутого матеріалу до місця складування або подальшої обробки;
- ходова частина - механізм, що дозволяє екскаватору пересуватися по робочій зоні.

Типовий роторний екскаватор зображено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 - Загальний вигляд роторного екскаватора

Принцип роботи роторного екскаватора полягає в обертанні ротора, на якому закріплені ковші. Ковші захоплюють ґрунт або породу, після чого матеріал потрапляє на конвеєрну систему, яка транспортує його на складувальний майданчик або до дробарки [2].

Основні переваги:

- висока продуктивність - здатність переміщувати тисячі тонн матеріалу за годину;
- ефективність - знижені витрати на паливо та обслуговування в порівнянні з іншими видами екскаваторів;
- мінімізація ручної праці - повністю автоматизовані процеси видобутку;
- велика надійність, довговічність конструкцій та вузлів;
- безперервність робочого процесу.

При цьому вони мають наступні недоліки:

- високі початкові інвестиції - вартість покупки та установки дуже висока;
- обмежена мобільність - великі розміри ускладнюють транспортування між робочими зонами;

- потреба у великих просторах - ефективні лише на великих відкритих площах.

1.1 Галузі використання та типові технічні рішення електроприводів роторних екскаваторів

Роторні екскаватори використовуються в таких галузях:

- вугільна промисловість - для видобутку вугілля у великих відкритих кар'єрах;
- металургійна промисловість - для видобутку залізної руди та інших металів;
- будівництво - для переміщення великих обсягів ґрунту при створенні масштабних інфраструктурних проектів.

Екскаватори безперервної дії можна розділити на екскаватори з верхнім копанням (рис. 1.2), екскаватори з нижнім копанням (рис. 1.3) і комбіновані екскаватори (рис. 1.4) в залежності від способу виймання породи. Роторні екскаватори здебільшого виконують виїмку зверху, тоді як виїмка знизу є неглибокою, оскільки порода транспортується від робочого органу стрічковим конвеєром з обмеженим кутом нахилу. У ланцюгових багатоківшевих екскаваторах порода транспортується ковшами, тому ці екскаватори можуть працювати як на верхній, так і на нижній виїмці [3]. Для виїмки під землею ківш на роторі переставляють, повертаючи його на 180°, а ротор обертають у напрямку, протилежному попередньому, щоб здійснити виїмку. Після опускання стріли виїмка ґрунту здійснюється відповідно до описаного вище методу виїмки зверху. Для забезпечення транспортування ґрунту по крутопохилому впускному конвеєру використовується ущільнювальний конвеєр, встановлений над впускним конвеєром. Ґрунт переміщується між стрічками двох конвеєрів, що рухаються в одному напрямку.

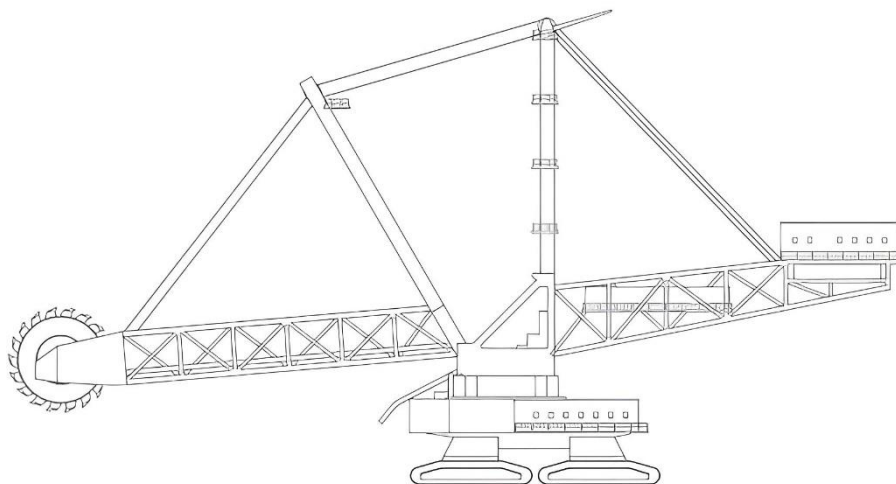


Рисунок 1.2 - Роторний екскаватор верхнього черпання

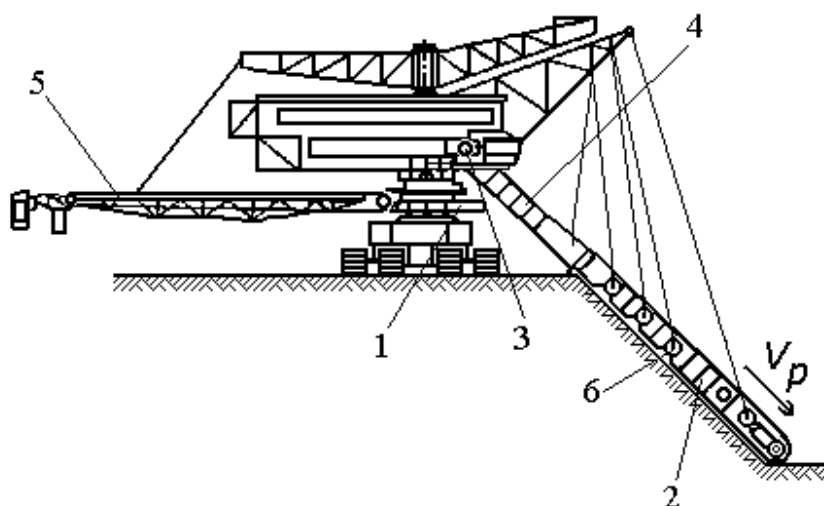


Рисунок 1.3 - Багаточерпаковий екскаватор нижнього черпання

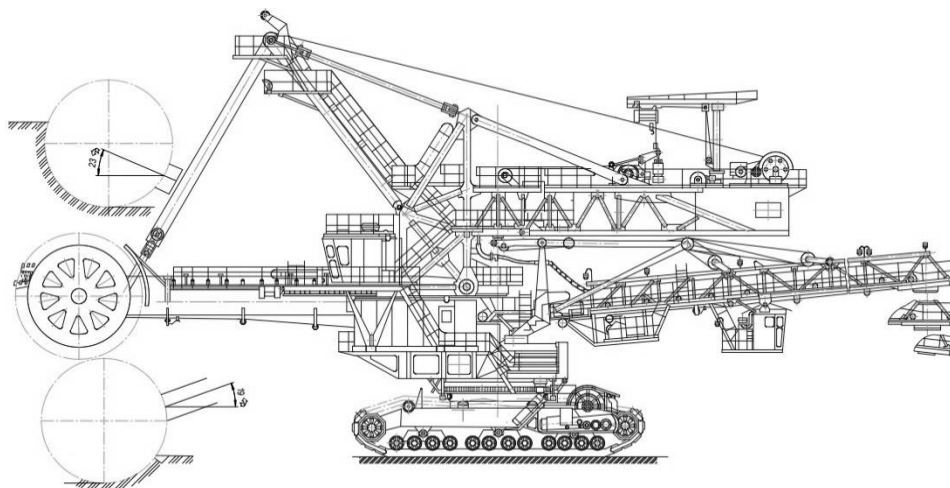


Рисунок 1.4 - Роторний екскаватор комбінованого черпання

Залежно від способу завантаження розрізняють екскаватори з боковим (консольним) розвантаженням і порталні екскаватори з бункерним обладнанням. Поширеним є використання комплексів, що складаються з декількох екскаваторів або роторних екскаваторів і конвеєрних ліній. Використання комплексу забезпечує безперервний процес видобутку і транспортування гірничої маси. Навантаження на конвеєр може бути консольним або козовим [4].

Конструкція робочого обладнання відрізняє гусеничні екскаватори від залізничних. Новокраматорський машинобудівний завод (НKMЗ) виготовляє екскаватори на кроково-рейковому ході.

Конструкція ковша роторно-колісного екскаватора повинна забезпечувати виконання операцій різання та наповнення ковша з мінімально можливими енерговитратами, а також відсутність злипання по периметру різання та у внутрішніх порожнинах. Корпус ковша може бути оснащений суцільною основою для виймання порід, які не відновлюють зв'язність після виймання (піщана порода, супіщана порода і шари породи з низьким вмістом води), і ланцюговою основою для виймання важкої, липкої породи (рис. 1.5). У верхньому положенні ковша на роторі ланцюг звисає всередину і струшує налиплу породу.

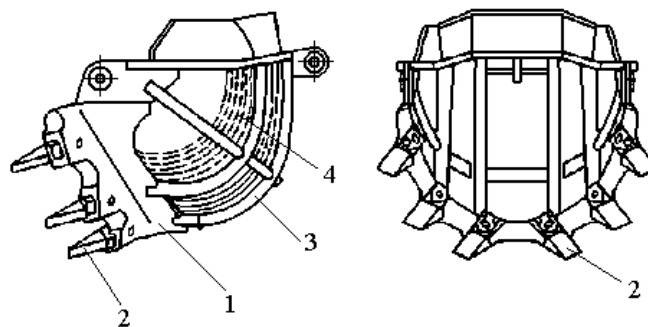


Рисунок 1.5 – Ковш роторного колеса

На рис. 1.5 позначено: 1 - аروحний козирок; 2 - зуб; 3 - каркасний корпус; 4 - ланцюгове днище.

Рух робочого органу (роторного колеса) здійснюється за рахунок обертання верхньої платформи з роторною стрілою. Подача поворотної стріли або ковшового ланцюга на поверхню, а також підйом і опускання її для зняття нових шарів (стружки) здійснюються механізмами подачі і підйому з окремими приводами.

Електропривод обертання стріли роторних екскаваторів створюється генераторним збудженням від силового магнітного підсилювача або тиристорного пристрою збудження [6]. Електропривод має систему керування з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю та струмовою відсічкою. Через дуже великі геометричні розміри обертових частин екскаватора для обмеження динамічного навантаження електроприводу використовуються уставки швидкості та гнучкі зворотні зв'язки за напругою і струмом, що уповільнює перехідні процеси зміни крутного моменту і швидкості.

Сучасні роторні екскаватори мають фіксовану стрілу, а це означає, що центр повороту повинен зміщуватися на фіксований радіус, щоб видалити наступну стружку. В результаті стружка залишається на поверхні, що обертається, у вигляді серпа.

1.2 Опис екскаватора та його системи електроприводу поворотного механізму

В електроприводі механізму повороту якоря роторних екскаваторів використовуються двигуни постійного струму з незалежним збудженням, керовані зміною напруги в ланцюзі якоря. Для цього якір двигуна підключається до окремого перетворювача частоти (система УП-Д). В якості керуючого перетворювача може використовуватися генератор постійного струму (система Г-Д) або тиристорний перетворювач (система ТП-Д). Генератори постійного струму мають високу електромагнітну інерційність і, як правило, система Г-Д вимагає прискорення (форсування) процесів збудження [7].

Для виконання дипломного проекту в якості прототипу було обрано екскаватор типу ЕР-1500 українського виробництва з технічними характеристиками, наведеними в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики екскаватора ЕР-1500

Параметр	Значення
Теоретична продуктивність, м ³ /год	1500
Висота копання, м	16 - 17
Глибина копання, м	1,7
Радіус копання, м	24,4
Діаметр ротора, м	6,8
Число ковшів ротора, шт	12
Ширина транспортувальної стрічки, м	1,2
Швидкість руху стрічки, м/с	4,3
Швидкість руху машини, м/год	480
Тиск на ґрунт, кг/см ²	1,2
Підведена напруга, кВ	6
Потужність приводу ротора, кВт	320
Маса екскаватора, т	710
Максимальна швидкість повороту на максимальному радіусі, м/хв	30

Даний екскаватор вироблено на Новокраматорському машинобудівному заводі - найбільшому в Європі підприємстві важкої промисловості.

Обраний екскаватор відноситься до типу кар'єрних повноповоротних машин і призначений для ведення розкривних і видобуткових робіт на відкритих розробках корисних копалин. Забезпечує навантаження вилученої гірничої маси на транспортувальні машини безперервної дії (вибійний конвеєр, перевантажувач, відвалоутворювач), залізничний або автомобільний

транспорт. Екскаватор пристосований для круглорічних робіт в інтервалі температур від -40 до +35°C.

Конструкція машини з обертовою стрілою фіксованої довжини (не висувною) забезпечує надзвичайно міцну та надійну конструкцію з мінімальною вагою. Конструкція надбудови машини з центральним навантаженням (спільна вісь обертання для поворотного столу і вивантажувальної стріли) спрощує компонування машини і мінімізує кількість стрічкових конвеєрів. Лише два конвеєри, один на вході і один на виході, полегшують обслуговування процесу транспортування. Кабіна оператора обладнана пристроями управління та зв'язку. Машина має майстерню для регулярного технічного обслуговування. Екскаватор обладнаний необхідною кількістю вантажопідйомних пристроїв для проведення ремонтних робіт під час експлуатації, в тому числі барабанною лебідкою і консольною поворотною лебідкою з електроприводом. Електрообладнання розташоване на консолі противаги і в приміщенні поворотної платформи. Електрообладнання герметично закрито і надійно працює навіть в умовах підвищеної запиленості.

Все електроустаткування та кабелі допускають експлуатацію екскаваторів у діапазоні температур від -40 до +35°C.

Схема екскаватора ЕР-1500 зображена на рис.1.6, де позначено його габаритні розміри.

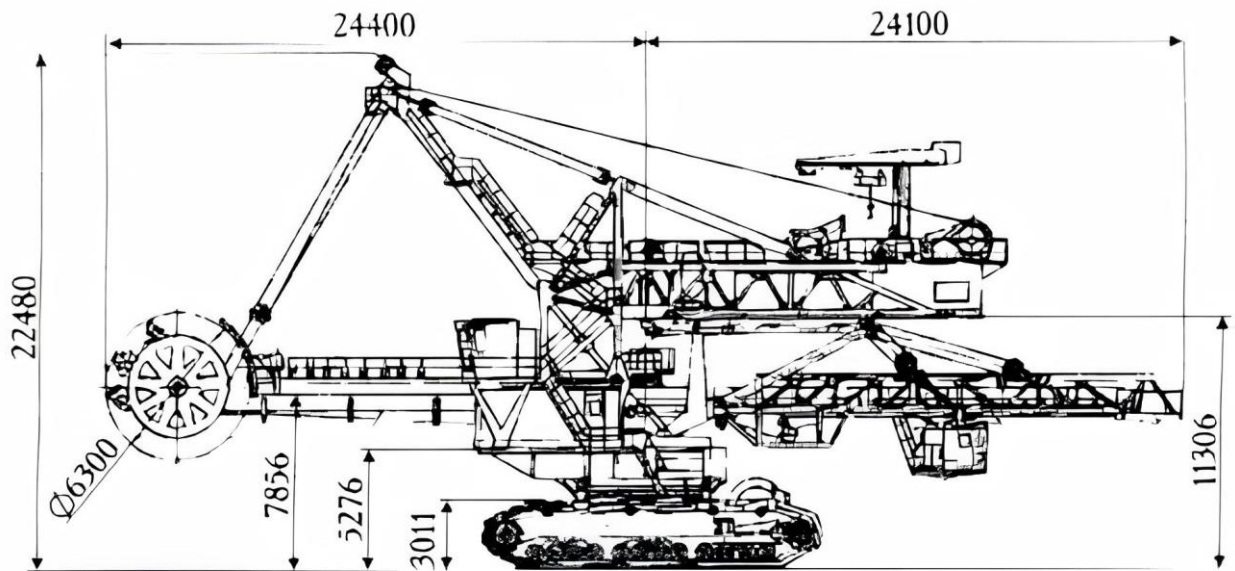


Рисунок 1.6 - Схема екскаватора EP-1500

1.3 Формулювання вимог до електроприводу, системи автоматичного керування та автоматизації

Крім вимог до електроприводу, зумовлених специфікою роботи електрообладнання багатоковшових екскаваторів в умовах відкритих гірничих розробок, до останнього пред'являється ряд додаткових вимог, що обумовлені характером роботи того чи іншого механізму [8].

Одна з вимог, що пред'являються до електроприводу повороту - це забезпечення перебігу перехідних процесів у мінімально можливий час з обмеженим прискоренням або уповільненням, особливо при гальмуванні. Така вимога викликана тим, що механізм повороту працює виключно у перехідних процесах пуску та гальмування.

Однак двигун постійного струму має суттєві недоліки: недостатня надійність, трудомісткість обслуговування, тому в даній роботі з метою модернізації існуючої системи буде проведено розрахунок та дослідження електроприводу механізму повороту на основі асинхронного двигуна із застосуванням системи векторного керування [9].

Кінематична схема (рис. 1.7) поворотного механізму складається з двоступінчастого редуктора та відкритої шестерної передачі з вінцевою

шестернею. На схемі наступні позначення: Д1, Д2 - двигуни; Р1, Р2 - регулятори; ВШ1, ВШ2 - вали-шестірні; ЗВ - зубчастий вінець; Б - база; П - поворотна платформа; РК - роликівне коло.

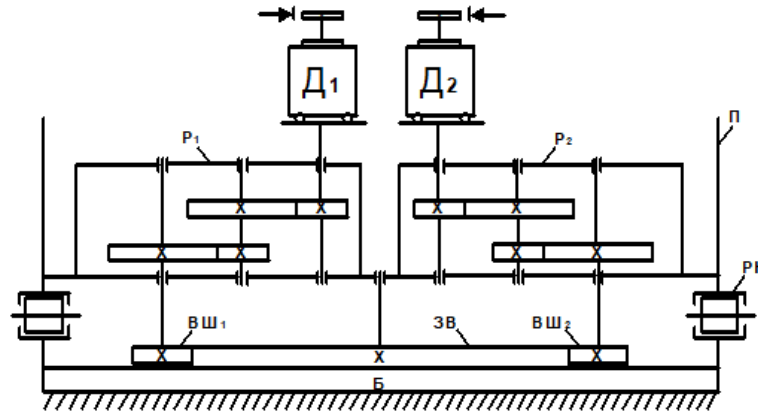


Рисунок 1.7 – Кінематична схема поротного механізму екскаватора

Кінематична схема приводу механізму повороту не враховує той факт, що всі елементи кінематичного ланцюга деформуються під навантаженням, тобто мають кінцеву жорсткість. Також, оскільки інерційні маси системи рухаються з різними швидкостями, моменти інерції елементів системи та сили і моменти, що діють на елементи, які рухаються з різними швидкостями, не можна безпосередньо порівнювати.

У цій схемі моменти інерції і моменти навантаження обертових елементів, маси і діючі сили елементів при поступальному русі, переміщення елементів і фактична жорсткість механічних зв'язків замінюються еквівалентними величинами, приведеними до однієї розрахункової швидкості. У багатьох випадках приведення здійснюється до частоти обертання валу двигуна [10].

Для електроприводу механізму повороту роторного екскаватора ЕР - 1500 необхідно врахувати наступні вимоги:

- напруга живлення повинна відповідати стандартам промислового живлення, зазвичай це трифазна напруга 380 - 400 В змінного струму частотою 50 Гц;

- захист від короткого замикання;
- захист від перевантаження по струму;
- захист від перегріву електродвигуна;
- захист від втрати фази;
- захист від перенапруги та заниженої напруги;
- діапазон регулювання швидкості повинен бути широким для забезпечення плавного запуску і зупинки механізму, а також для адаптації до різних умов роботи.

- точність регулювання швидкості повинна бути на рівні $\pm 2 - 5\%$ від встановленої швидкості для забезпечення стабільної роботи;

- величина перерегулювання повинна бути мінімальною, зазвичай не більше 10% для забезпечення плавності та стабільності робочого процесу;

- максимальна швидкість обертання роторного екскаватора повинна бути визначена з урахуванням робочих умов і не повинна перевищувати безпечних значень, зазвичай це близько 0.2 - 0.5 об/хв.

- максимальне прискорення повинно бути плавним і контрольованим, з урахуванням маси роторного органу та інерційних навантажень, щоб уникнути ривків і пошкоджень механізму.

Висновки до розділу

1. В даному розділі зроблено аналітичний огляд роторних екскаваторів як важливої частини гірничодобувної промисловості. Розглянуто основні різновиди та відмінності.

2. Електроприводи роторних та ланцюгових багаточерпакових екскаваторів досить різноманітні за виконанням силових схем і систем управління. У зв'язку з цим виникає проблема уніфікації та створення типових систем автоматизованого електропривода для основних механізмів екскаваторів.

3. Перспективним напрямом розвитку екскаваторних електроприводів є застосування регульованих електроприводів змінного струму на основі тиристорних перетворювачів частоти. Система управління доцільно будувати на базі мікропроцесорної техніки. Це дозволить забезпечити не тільки керування окремими електроприводами, а й загалом виробничими процесами виїмки ґрунтів, їх транспортування, відсіпання по рід розкриву у відвали тощо.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Для розрахунку використовуємо вхідні дані, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики екскаватора ЕР-1500

Параметр	Значення
Частота обертання поворотної платформи, об/хв	0,3
Момент інерції платформи з навантаженими ковшами, кг·м ²	16·10 ⁹
Момент інерції платформи з порожніми ковшами, кг·м ²	11·10 ⁹
Час розгону до усталеної швидкості, с	108
Час циклу, с	269

2.1 Розрахунок потужності електродвигуна та побудова навантажувальної діаграми

Знайдемо кутову швидкість платформи:

$$\omega_n = 0.105 \cdot n_o = 0.105 \cdot 0.3 = 0.0315 \text{ (рад / с)}, \quad (2.1)$$

де n_o - частота обертань поворотної платформи.

Знайдемо потужність приводу поворотного механізму за формулою, поданою нижче:

$$P_n = \frac{(J_c + J_n) \cdot \omega_n^2}{t_p} = \frac{(16 + 11) \cdot 10^9 \cdot 0.0315^2}{108} = 248 \text{ (кВт)}, \quad (2.2)$$

де J_z - момент інерції платформи з навантаженими ковшами, J_n - момент інерції платформи з порожніми ковшами, t_p - час розгону до усталеної швидкості.

Оскільки в даному механізмі використовуються 2 електродвигуна, то розрахункова потужність кожного двигуна $P_d = 124 \text{ кВт}$. Дводвигунна схема електропривода зображена на рис. 2.1 .

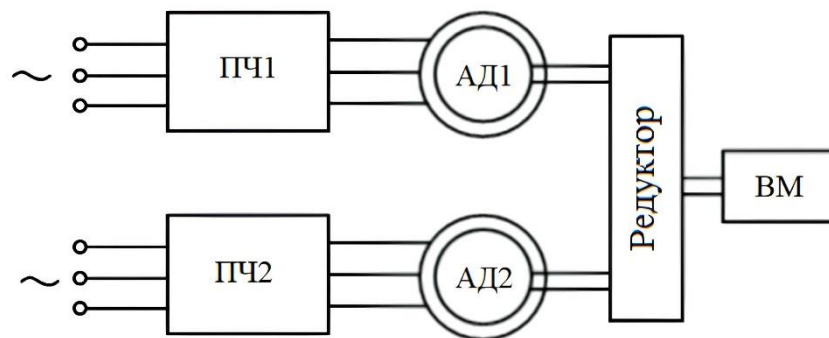


Рисунок 2.1 – Дводвигунний асинхронний електропривод.

На рис 2.1 позначено: ПЧ1, ПЧ2 – перетворювачі частоти; М1, М2 – електродвигуни; ВМ – виконавчий механізм

Даний електропривод повинен задовільняти умовам роботи для наступного циклу:

1. Копання та наповнення ковша: ротор з ковшами обертається та врізається у ґрунт, заповнюючи ковші матеріалом;
2. Поворот на розвантаження: поворотна платформа екскаватора обертається, переміщуючи наповнені ковші до місця розвантаження;
3. Розвантаження ковшів;
4. Повернення до місця копання: поворотна платформа повертається у вихідне положення для наступного циклу.

Висновки до розділу

1. В даному розділі прведено розрахунок потрібної потужності електродвигунів для електроприводу механізму повороту. Виходячи з розрахунків потрібно два двигуна потужністю від 124 кВт.
2. Розглянуто схему дводвигунного електроприводу механізму повороту та сформовано цикл роботи.

3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Виходячи з попередніх розрахунків обираємо двигун 4AM355S8Y3[11], паспортні дані якого наведені в табл. 3.1 .

Таблиця 3.1 – Технічні дані двигуна 4AM355S8Y3

Номінальна потужність, кВт	132
Синхронна частота обертання, об/хв	750
Швидкість обертання номінальна, об/хв	740
Номінальний струм, А	261
ККД, %	93,7
Співвідношення моментів M_p/M_n	1,8
Співвідношення моментів M_{max}/M_n	2
Відношення струму I_p/I_n	6,4
Момент інерції, $кг \cdot м^2$	7,9
Кількість полюсів	8
Перевантажувальна здатність	2,2
Коефіцієнт потужності	0,82

3.1 Перевірка двигуна за нагрівом

Після попереднього вибору двигуна він повинен бути перевірений по перевантажувальній здатності та за умовами нагрівання. Для цього необхідно побудувати його спрощену навантажувальну діаграму $M=M(t)$ з урахуванням динаміки електропривода. Зазначена навантажувальна діаграма визначається як статичними, так і динамічними режимами роботи відповідно до рівняння руху електропривода.

Розрахуємо номінальну кутову швидкість двигуна:

$$\omega_n = \frac{n_n \cdot \pi}{30} = \frac{740 \cdot \pi}{30} = 77.48 \text{ (рад / с)}. \quad (3.1)$$

Знаходимо номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{132000}{77.48} = 1703.67 (H \cdot m). \quad (3.2)$$

Обчислимо передаточне число редуктора:

$$i_p = \frac{n_n}{n_o} = \frac{750}{0.3} = 2500. \quad (3.3)$$

Сумарний момент інерції платформи з навантаженими ковшами розраховуємо за формулою:

$$J'_{\Sigma_{наб}} = \frac{J_{\Gamma}}{K \cdot i_p^2} + J_{\partial} = \frac{16 \cdot 10^9}{2 \cdot 2500^2} + 7.9 = 1287.9 (кг \cdot м^2), \quad (3.4)$$

де K - кількість двигунів.

Сумарний момент інерції платформи з порожніми ковшами розраховуємо за формулою:

$$J'_{\Sigma_{пор}} = \frac{J_{\Gamma}}{K \cdot i_p^2} + J_{\partial} = \frac{11 \cdot 10^9}{2 \cdot 2500^2} + 7.9 = 887.90 (кг \cdot м^2). \quad (3.5)$$

Обчислимо запірний та відсічний моменти:

$$M_{зан} = 1.8 \cdot M_n = 1.8 \cdot 1703.67 = 3066.61 (H \cdot m); \quad (3.6)$$

$$M_{від} = 0.9 \cdot M_{зан} = 0.9 \cdot 3066.61 = 2759.95 (H \cdot m). \quad (3.7)$$

Статичний момент опору руху:

$$M_{cm} = 0.1 \cdot M_n = 0.1 \cdot 1703.67 = 170.37 (H \cdot m). \quad (3.8)$$

Динамічний момент при розгоні з порожніми та навантаженими ковшами:

$$\begin{aligned} M_{дин} &= (M_{від.} - M_{cm}) + \frac{M_{зан} - M_{від}}{2} = \\ &= (2759.95 - 170.37) + \frac{(3066.61 - 2759.95)}{2} = \\ &= 2742.91 (H \cdot m), \end{aligned} \quad (3.9)$$

Знайдемо середнє значення моменту двигуна при розгоні з порожніми та навантаженими ковшами:

$$M_{сер1} = \frac{M_{зан} + M_{від}}{2} = \frac{3066.61 + 2759.95}{2} = 2913.28 (H \cdot m). \quad (3.10)$$

Середнє значення моменту при сповільненні з порожніми та навантаженими ковшами буде обчислюватись як:

$$M_{сер2} = M_{зан.} - M_{cm} = 3066.61 - 170.37 = 2896.24 (H \cdot m). \quad (3.11)$$

Розрахуємо час розгону та сповільнення з навантаженими ковшами:

$$t_{роз} = J'_{\Sigma нав} \frac{\omega_n}{M_{дин}} = 1287.90 \frac{77.48}{2742.91} = 36.38 (с); \quad (3.12)$$

$$t_{спов} = J'_{\Sigma нав} \frac{\omega_n}{M_{сер2}} = 1287.90 \frac{77.48}{2896.24} = 34.45 (с). \quad (3.13)$$

Знайдемо прискорення при розгоні та сповільненні з навантаженими ковшами:

$$a_{роз} = \frac{\omega_n}{i_p \cdot t_{роз}} = \frac{77.48}{2500 \cdot 36.38} = 8.52 \cdot 10^{-4} (рад / c^2); \quad (3.14)$$

$$a_{спов} = \frac{\omega_n}{i_p \cdot t_{спов}} = \frac{77.48}{2500 \cdot 34.45} = 8.99 \cdot 10^{-4} (рад / c^2). \quad (3.15)$$

Тепер можливо обчислити кути повороту механізму при розгоні та сповільненні з навантаженими ковшами:

$$\alpha_{роз} = \frac{a_{роз} \cdot t_{роз}^2}{2} = \frac{8.52 \cdot 10^{-4} \cdot 36.38^2}{2} = 0.56 (рад); \quad (3.16)$$

$$\alpha_{спов} = \frac{a_{спов} \cdot t_{спов}^2}{2} = \frac{8.99 \cdot 10^{-4} \cdot 34.45^2}{2} = 0.53 (рад); \quad (3.17)$$

При переведенні в градуси отримаємо: $\alpha_{роз} = 32.09^\circ$, $\alpha_{спов} = 30.37^\circ$.

Для розрахунку параметрів після розвантаження примаємо кут повороту платформи на розвантаження рівним 90° . Тоді розрахуємо кут повороту з усталеною швидкістю та час за який платформа його пройде:

$$\alpha_{нов} = 90^\circ - (32.09^\circ + 30.37^\circ) = 27.54^\circ = 0.48 (рад); \quad (3.18)$$

$$t_{нов} = \frac{\alpha_{нов}}{\omega_n / i_p} = \frac{0.48}{77.48 / 2500} = 15.49 (c). \quad (3.19)$$

Розрахуємо час розгону та сповільнення з порожніми ковшами:

$$t'_{роз} = J'_{\Sigma пор} \frac{\omega_n}{M_{дин}} = 887.90 \frac{77.48}{2742.91} = 25.08 (c); \quad (3.20)$$

$$t'_{спов} = J'_{\Sigma нав} \frac{\omega_n}{M_{сер2}} = 887.90 \frac{77.48}{2896.24} = 23.75 (c). \quad (3.21)$$

Знайдемо прискорення при розгоні та сповільненні з навантаженими ковшами:

$$a'_{роз} = \frac{\omega_H}{i_p \cdot t'_{роз}} = \frac{77.48}{2500 \cdot 25.08} = 12.34 \cdot 10^{-4} (рад / c^2); \quad (3.22)$$

$$a'_{спов} = \frac{\omega_H}{i_p \cdot t'_{спов}} = \frac{77.48}{2500 \cdot 23.75} = 13.01 \cdot 10^{-4} (рад / c^2). \quad (3.23)$$

Обчислимо кути повороту механізму при розгоні та сповільненні з порожніми ковшами:

$$\alpha'_{роз} = \frac{a'_{роз} \cdot t'^2_{роз}}{2} = \frac{12.34 \cdot 10^{-4} \cdot 25.08^2}{2} = 0.39 (рад); \quad (3.24)$$

$$\alpha'_{спов} = \frac{a'_{спов} \cdot t'^2_{спов}}{2} = \frac{13.01 \cdot 10^{-4} \cdot 23.75^2}{2} = 0.37 (рад). \quad (3.25)$$

При переведенні в градуси отримаємо: $\alpha'_{роз} = 22.35^\circ$, $\alpha'_{спов} = 21.29^\circ$.

Кут повороту з усталеною швидкістю та час за який платформа його пройде:

$$\alpha'_{нов} = 90^\circ - (22.35^\circ + 21.29^\circ) = 46.36^\circ = 0.81 (рад); \quad (3.26)$$

$$t_{нов} = \frac{\alpha'_{нов}}{\omega_H / i_p} = \frac{0.81}{77.48 / 2500} = 26.14 (с). \quad (3.27)$$

Знайдемо еквівалентний момент двигуна:

$$M_E = \sqrt{\frac{M_{сер1}^2 \cdot t_{роз} + M_{ст}^2 \cdot t_{спов} + M_{сер1}^2 \cdot t_{нов} + M_{сер1}^2 \cdot t'_{роз} + M_{ст}^2 \cdot t'_{спов} + M_{сер1}^2 \cdot t'_{нов}}{t_y}} = \sqrt{\frac{2913.28^2 \cdot 36.38 + 170.37^2 \cdot 34.45 + 2913.28^2 \cdot 15.49 + 2913.28^2 \cdot 25.08 + 170.37^2 \cdot 23.75 + 2913.28^2 \cdot 26.14}{269}} = 1605.23 (Н \cdot м). \quad (3.28)$$

За умовою:

$$M_E \leq M_H; \quad 1605.23 < 1703.67. \quad (3.29)$$

Умова виконується, відповідно двигун проходить перевірку по нагріванню.

3.2 Перевірка двигуна по перевантажувальній здатності

За умови: $M_{\max} \leq \lambda M_H$, перевіряємо:

$$\begin{aligned} 3066.61 &\leq 2.2 \cdot 1703.67; \\ 3066.61 &< 3748.07. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Двигун проходить перевірку по перевантажувальній здатності.

Знаходимо коефіцієнт тривалості включення:

$$\begin{aligned} ПВ &= \frac{t_{\text{роб}} \cdot 100}{t_{\text{ц}}} = \frac{161 \cdot 100}{269} = 60\% \\ ПВ &\leq ПВ_{\text{н}} \\ 60\% &\leq 80\% \end{aligned} \quad (3.31)$$

Навантажувальна діаграма матиме наступний вигляд (див. рис. 3.1):

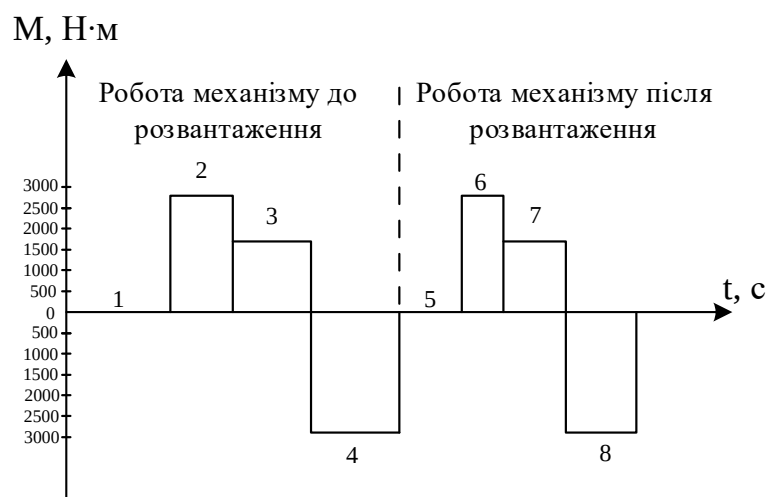


Рисунок 3.1 – Навантажувальна діаграма механізму повороту

На навантажувальній діаграмі (рис.3.1) зображені етапи: 1 - Момент при копанні; 2 - Момент при розгоні; 3 - Момент при повороті з усталеною швидкістю; 4 - Момент гальмування при завантажених ковшах; 5 - Момент при розвантаженні; 6 - Момент розгону з порожніми ковшами; 7 - Момент при повороті з усталеною швидкістю з порожніми ковшами; 8 - Момент гальмування з порожнім ковшом.

Висновки до розділу

1. В даному розділі було обрано двигун 4AM355S8Y3 та розраховані моменти в різних режимах роботи електропривода. Проведено перевірку двигуна за нагрівом методом еквівалентного моменту та по перевантажувальній здатності, виходячи з чого можна зробити висновок що обраний двигун відповідає умовам роботи.

2. Розраховано коефіцієнт тривалості включення за яким електродвигун відповідає умовам роботи. В другому розділі визначили параметри схеми, завдяки яким побудували навантажувальні діаграми на різних ділянках циклу. Отримані дані дозволяють здійснити проектування системи електроприводу.

4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Базові принципи проектування алгоритму векторного керування

Для моделювання систем керування АД використовується математична модель, що записується через вектори струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат (a-b):

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, M = \mu_1(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}); \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \psi_{2b}\omega + \frac{1}{\sigma}u_{1a}; \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \psi_{2a}\omega + \frac{1}{\sigma}u_{1b}; \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \psi_{2b}\omega + \alpha L_m i_{1a}; \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \psi_{2a}\omega + \alpha L_m i_{1b}.\end{aligned}\tag{4.1}$$

де ω – кутова швидкість, J – момент інерції двигуна, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження на валу двигуна, θ – кут повороту валу двигуна, v – коефіцієнт в'язкого тертя, (ψ_{2a}, ψ_{2b}) – компоненти вектора потокозчеплення ротора, (i_{1a}, i_{1b}) – компоненти вектора струму статора. Коефіцієнти, які враховують параметри двигуна визначені наступним чином:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \beta = \frac{L_m^2}{L_2 \sigma}, \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}, \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta.\tag{4.2}$$

де R_1 і R_2 – активні опори обмоток статора і ротора, L_1 і L_2 – індуктивні опори обмоток статора і ротора, L_m – індуктивний опір взаємодукції обмоток статора і ротора, p_n – число пар полюсів.

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проектуються та записуються в синхронній системі координат (d-q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , що показано на рис. 4..

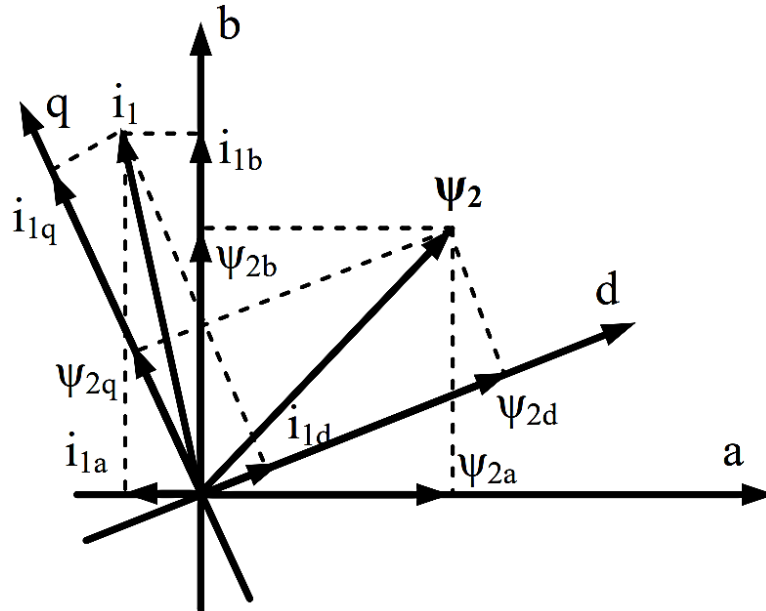


Рисунок 4.1 – Розташування векторів асинхронного двигуна

Перетворення координат здійснюється за наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab}, \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq}, \\ \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}; \mathbf{e}^{j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}; \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де $\mathbf{x}_{dq}$ та $\mathbf{x}_{ab}$ - двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b), оператори $\mathbf{e}^{-j\varepsilon_0}$ та $\mathbf{e}^{j\varepsilon_0}$ забезпечують координатні перетворення векторів з системи координат, що обертається в стаціонарну [11].

Задача відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формується наступним чином. Припустимо, що для моделі АД заданої рівняннями (4.1), виконується наступне:

1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання;
2. Параметри АД відомі і незмінні;
3. Момент навантаження M_c невідомий, постійний та обмежений;
4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого та непрямого векторного керування, які забезпечують:

1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0. \quad (4.4)$$

при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних:

$\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості,

$\tilde{\psi} = \psi - \psi^*$ – похибка відпрацювання потокозчеплення.

2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d = 0 \quad (4.5)$$

3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

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

Синтез алгоритмів векторного керування по вимірюваному виходу виконано в два етапи: спершу синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

4.2 Алгоритм непрямого векторного керування АД

Повний алгоритм непрямого векторного керування швидкістю АД, структурна схема якого показана на рис.4.2, містить:

- розімкнений регулятор модуля вектора потокозчеплення:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (4.6)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (4.7)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\psi^*}, \quad (4.8)$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно;

- регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора):

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (4.9)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d, u_{1d} – компонента вектора напруги статора по осі d, $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;

- регулятор кутової швидкості:

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + v \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \quad (4.11)$$

де ω^* , $\dot{\omega}^*$, $\ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно; $\mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \frac{1}{J}$;

- регулятор струму по осі q (моментної складової струму статора):

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (4.12)$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі q, u_{1q} – компонента вектора напруги статора по осі q

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

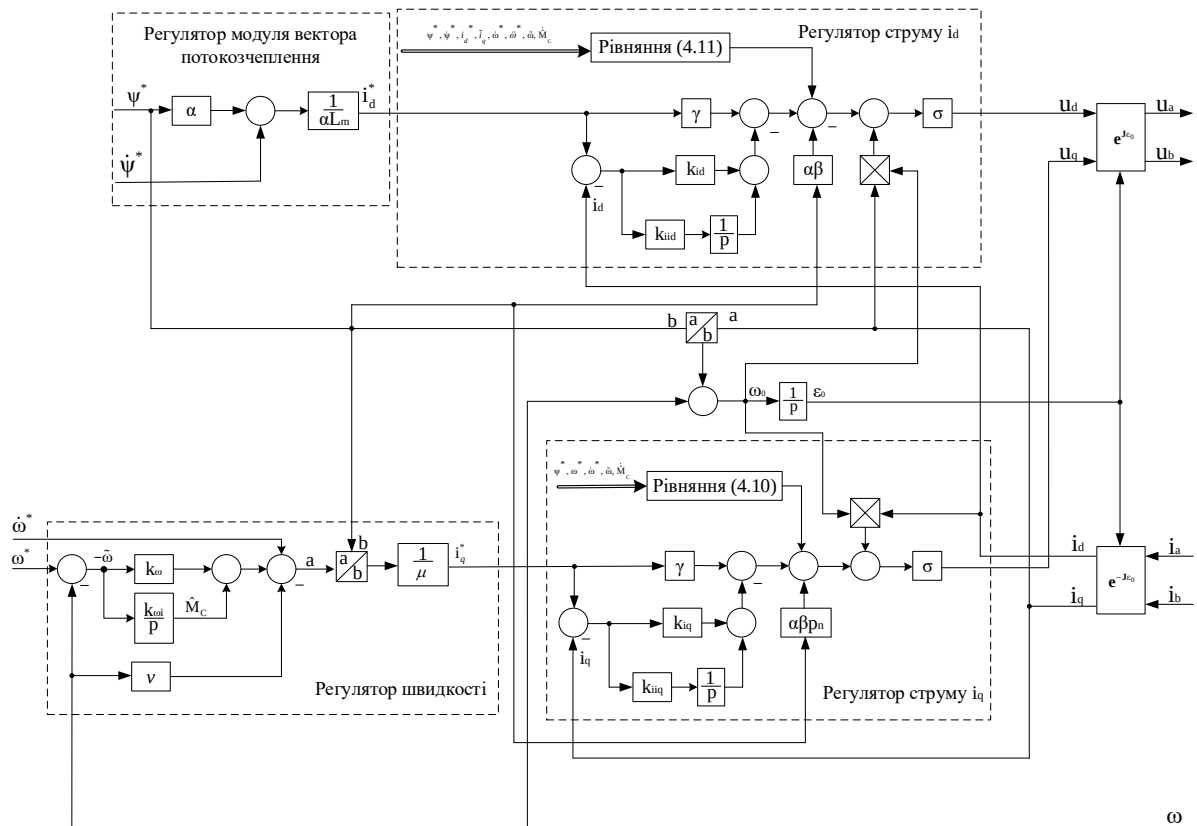


Рисунок 4.2 – Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування

Висновки до розділу

1. В даному розділі було розроблено математичну модель для дослідження системи керування електроприводом та розглянуто базові принципи проектування алгоритму векторного керування. Отримано алгоритм непрямого векторного керування швидкістю АД та розроблено відповідну структурну схему.

2. Синтез алгоритмів векторного керування по вимірюваному виходу виконано в два етапи: спершу синтезовано підсистему керування потокозчепленням, а потім підсистему керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Проводимо обчислення для двигуна 4А355S8У3. Вхідні дані для розрахунку параметрів асинхронного двигуна наведені у табл. 5.1 [10].

Таблиця 5.1 – Паспортні дані двигуна 4АМ355S8У3

Номінальна потужність	$P_{2n}=132$ кВт
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n}=380$ В
Число пар полюсів	$p_n=4$
Момент інерції	$J_d=7.9$ кг·м ²
Коефіцієнт корисної дії	$\eta=0.937$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi=0.82$
Перевантажувальна здатність	$\lambda=2.2$
Номінальне ковзання	$s_n=0.015$
Критичне ковзання	$s_k=0.07$
Номінальна частота напруги статора	$f=50$ Гц
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$x_1'=0.12$
Активний опір статора	$R_1'=0.023$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$x_2''=0.16$
Приведений активний опір ротора	$R_2''=0.017$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$x_\mu=2.9$

5.1 Розрахунок номінальних даних двигуна

Проведемо розрахунок номінальних даних двигуна.

Кутова частота напруги статора:

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

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.16}{4} = 78.54 (\text{рад} / \text{с}). \quad (5.2)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 78.54 (1 - 0.015) = 77.36 (\text{рад} / \text{с}). \quad (5.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{132 \cdot 10^3}{77.36} = 1706.3 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (5.4)$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = \lambda M_n = 2.2 \cdot 1706.3 = 3753.8 (\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (5.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

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

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos \varphi} = \frac{132 \cdot 10^3}{3 \cdot 219.4 \cdot 0.937 \cdot 0.82} = 261.02 (\text{А}). \quad (5.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310.3 (\text{В}), \quad (5.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 261.02 = 369.14 (\text{А}). \quad (5.9)$$

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

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310.3}{314.16} = 0.99(\text{Вб}).$$

(5.10)

5.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Виконаємо розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення [12].

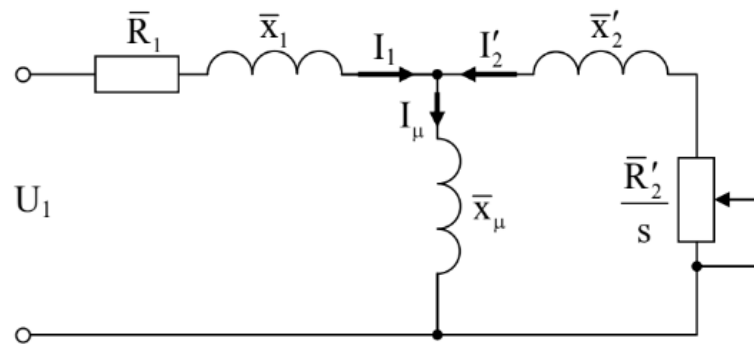


Рисунок 5.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

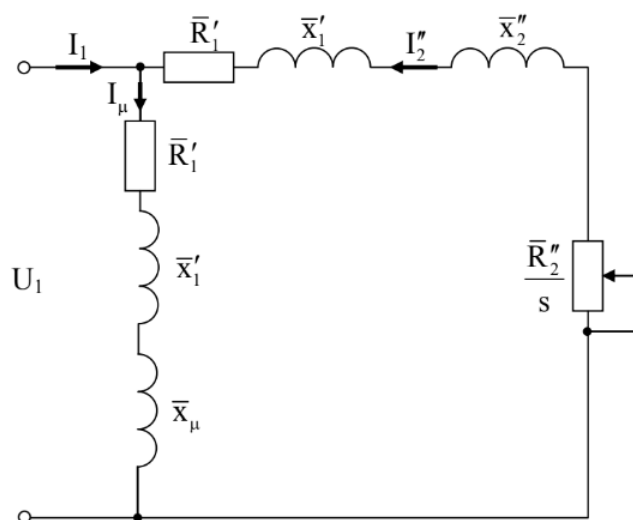


Рисунок 5.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1'\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{2.9 + \sqrt{2.9^2 + 4 \cdot 0.12 \cdot 2.9}}{2 \cdot 2.9} = 1.04. \quad (5.11)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_1'}{c_1} = \frac{0.12}{1.04} = 0.12, \quad (5.12)$$

$$\bar{x}_2' = \frac{\bar{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0.16}{1.04^2} = 0.15, \quad (5.13)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0.023}{1.04} = 0.022, \quad (5.14)$$

$$\bar{R}_2' = \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.017}{1.04^2} = 0.016. \quad (5.15)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.12 \cdot \frac{219.39}{261.02} = 0.09(\text{Ом}), \quad (5.16)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.02 \cdot \frac{219.39}{261.02} = 0.019(\text{Ом}), \quad (5.17)$$

$$x_2' = \bar{x}_1' \frac{U_n}{I_n} = 0.15 \cdot \frac{219.39}{261.02} = 0.12(\text{Ом}), \quad (5.18)$$

$$R_2 = \bar{R}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.016 \cdot \frac{219.39}{261.02} = 0.013(\text{Ом}), \quad (5.19)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 2.9 \cdot \frac{219.39}{261.02} = 2.44(\text{Ом}). \quad (5.20)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.09}{314.16} = 3.09 \cdot 10^{-4}(\text{Гн}), \quad (5.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{0.12}{314.16} = 3.96 \cdot 10^{-4}(\text{Гн}). \quad (5.22)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{2.44}{314.2} = 0.008(\text{Гн}). \quad (5.22)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.008 + 3.09 \cdot 10^{-4} = 0.0081(\text{Гн}), \quad (5.23)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.008 + 3.96 \cdot 10^{-3} = 0.0082(\text{Гн}). \quad (5.24)$$

На основі проведених розрахунків обчислюються значення наступних параметрів:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.013}{0.0082} = 1.62(\text{Ом} / \text{Гн}), \quad (5.25)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0081 \cdot \left(1 - \frac{0.008}{0.0081 \cdot 0.0082} \right) = 6.86 \cdot 10^{-4}(\text{Гн}), \quad (5.26)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0.008}{0.0082 \cdot 6.86 \cdot 10^{-4}} = 1.39 \cdot 10^3 (1 / \Gamma_H), \quad (5.27)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0.019}{6.86 \cdot 10^{-3}} + 1.62 \cdot 0.008 \cdot 1.39 \cdot 10^3 = 44.58 (\text{Ом} / \Gamma_H). \quad (5.28)$$

В таблиці 5.2 представлені розраховані параметри двигуна.

Таблиця 5.2 – Розраховані параметри двигуна 4AM355S8Y3

P_{2n} , кВт	132	J_d , кг·м ²	7.9
ω_{xx} , рад/с	78.54	R_1 , Ом	0.019
ω_n , рад/с	77.36	R_2 , Ом	0.013
M_n , Нм	1706.3	L_1 , Гн	0.0081
M_k , Нм	3753.8	L_2 , Гн	0.0082
λ	2.2	L_m , Гн	0.0078
I_{na} , А	369.14	α , Ом/Гн	1.62
ψ_{xx} , Вб	0.99	β , 1/Гн	$1.39 \cdot 10^3$
η	0.937	γ , Ом/Гн	44.58
$\cos \varphi$	0.82	σ , Гн	$6.86 \cdot 10^{-4}$

5.3 Дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД

Проведемо дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД при виконанні тесту, який включає наступні етапи:

- збудження двигуна за час 0 - 0.5 с;
- розгін у $t=0.6$ с до ω_n з 2-хкратним значенням моменту двигуна за траєкторією 1-го порядку;
- прикладання і скидання моменту навантаження, який дорівнює номінальному моменту двигуна, на ділянці руху з постійною швидкістю;
- гальмування до нульової швидкості за однаковою траєкторією 1-го порядку як при розгоні.

В'язким тертям знехтувано.

Розрахуємо додаткові необхідні параметри, які необхідні нам для моделювання:

1. Максимальна кутова швидкість:

$$\omega_{\max} = 77.36 \text{ (рад / с)}. \quad (5.29)$$

1. Максимальне прискорення, при якому двигун розганяється з 2-хкратним значенням моменту:

$$a_{\max} = \frac{2M_n}{J_{\Sigma}} = \frac{2 \cdot 1706.3}{2 \cdot 7.9} = 215.99 \text{ (рад / с}^2\text{)}. \quad (5.30)$$

2. Максимальний ривок $\rho_{\max}$ вибирається таким, щоб момент двигуна M наростав до максимального значення за декілька десятків мілісекунд. При цьому, знову ж таки, не можна перевищувати обмеження по напрузі інвертора[13]. Виходячи з вище викладених міркувань обираємо наступне значення максимального ривка:

$$\rho_{\max} = 3 \cdot 10^5 \text{ (рад / с}^3\text{)}. \quad (5.31)$$

Час руху з постійним ривком:

$$t_p = \frac{a_{\max}}{\rho_{\max}} = \frac{215.99}{3 \cdot 10^5} = 7.19 \cdot 10^{-4} \text{ (с)}. \quad (5.32)$$

Час руху з постійним (максимальним) прискоренням:

$$t_a = \frac{\omega_{\max}}{a_{\max}} - t_p = \frac{77.36}{215.99} - 7.19 \cdot 10^{-4} = 0.3575 \text{ (с)}. \quad (5.33)$$

Час руху з постійною швидкістю обирається також невеликим, щоб було зручно спостерігати усі перехідні процеси:

$$t_{\omega} = 1(\text{с}). \quad (5.34)$$

3. У блоці керування були використані наступні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} k_{\omega} &= 100, \\ k_{\omega i} &= \frac{k_{\omega}^2}{2} = 5000, \\ k_i &= 500, \\ k_{ii} &= \frac{k_{\omega}^2}{2} = 125000, \end{aligned} \quad (5.35)$$

Сформовані траєкторія кутової швидкості, потокозчеплення та профіль моменту навантаження [14], з урахування всіх вище розрахованих та обраних значень, зображені на рис.5.1. При моделюванні використано 4% від статичного моменту.

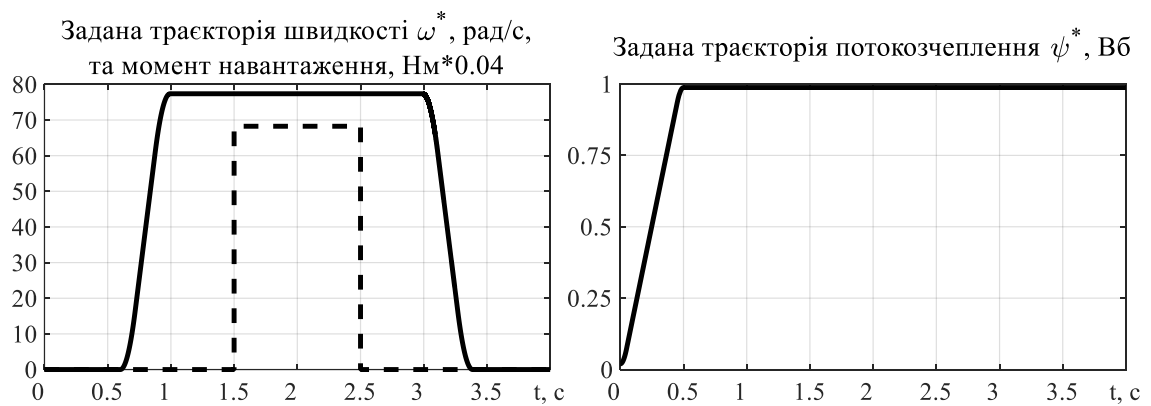


Рисунок 5.1 – Траєкторія кутової швидкості та потокозчеплення(перший порядок)

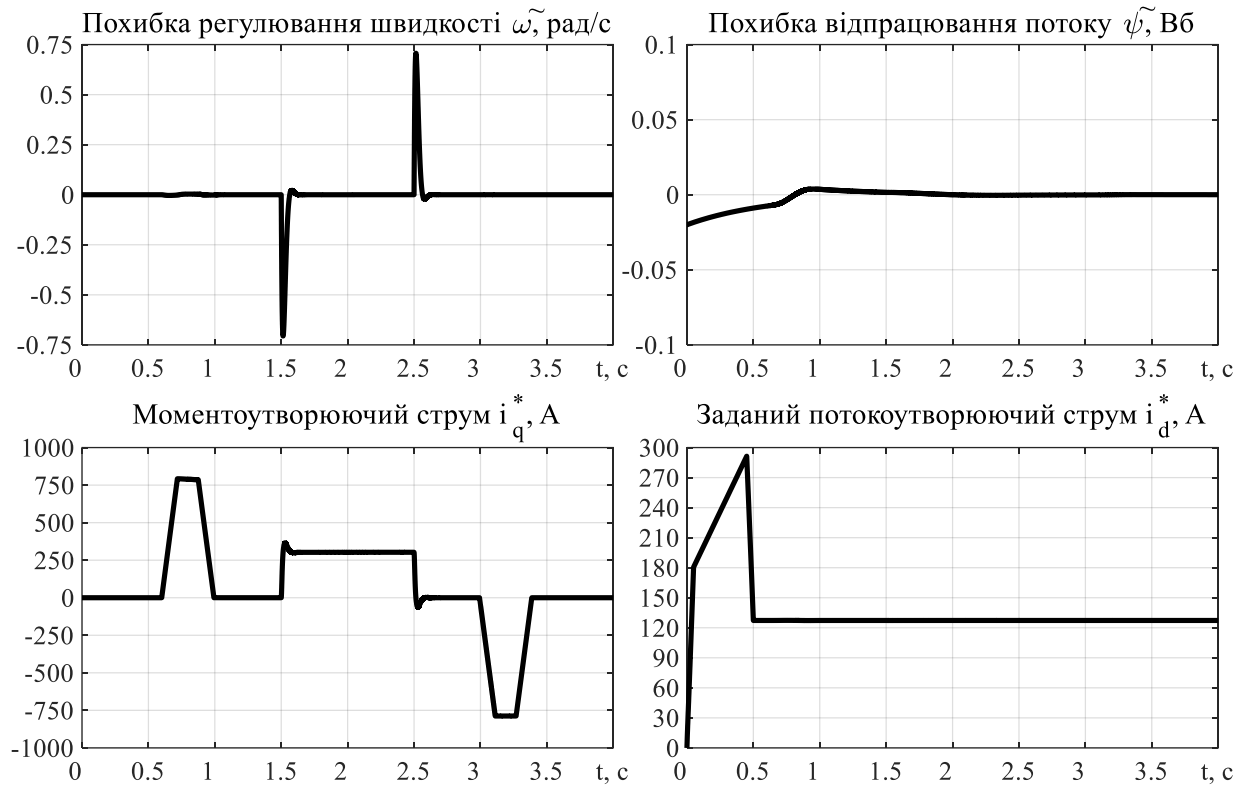
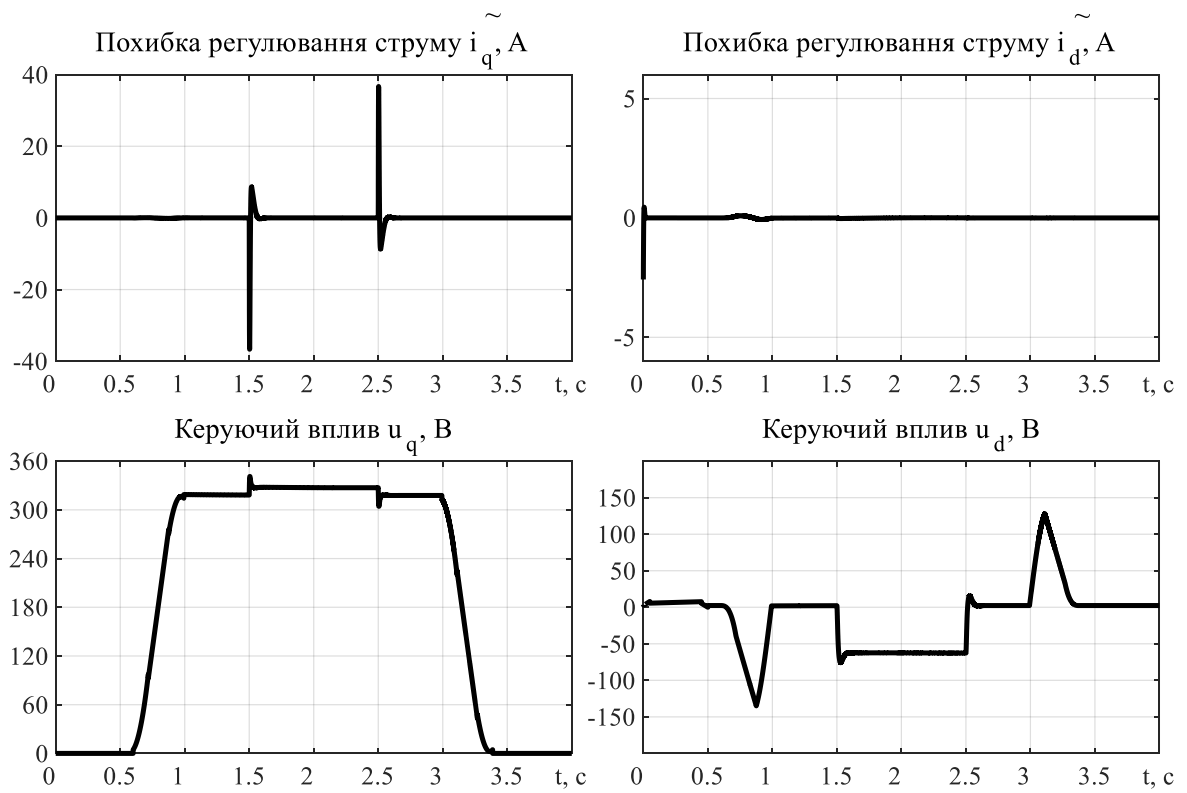


Рисунок 5.2 – Графіки перехідних процесів системи IFOC АД



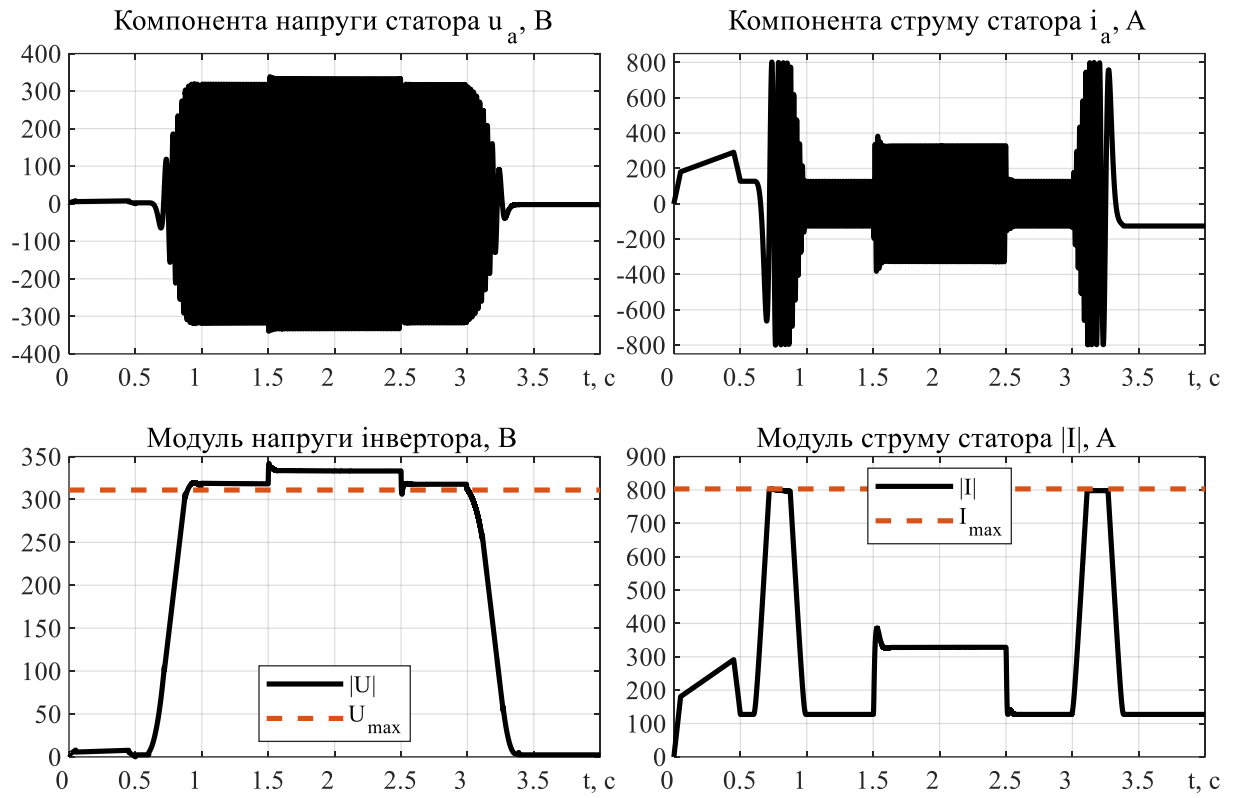


Рисунок 5.3 – Графіки перехідних процесів системи IFOC АД

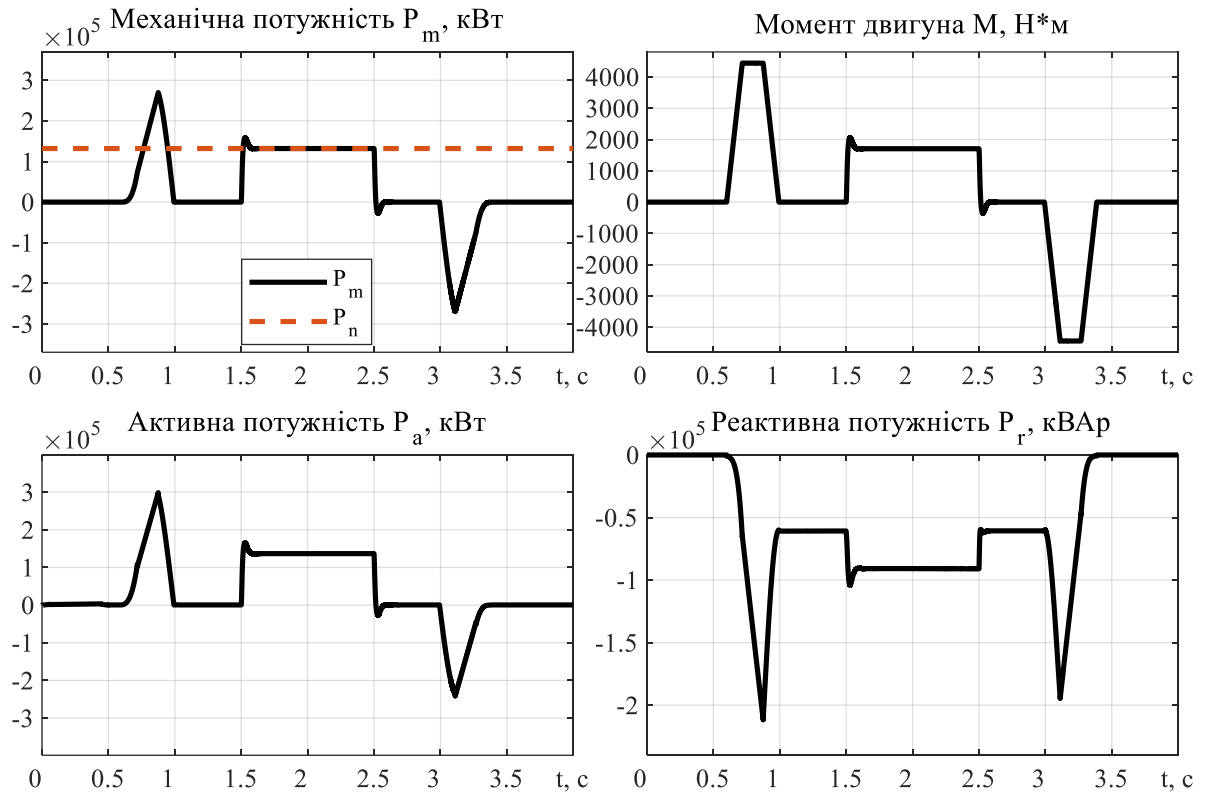


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів системи IFOC АД

Аналізуючи графіки перехідних процесів, а саме похибок регулювання струмів i_d , i_q та швидкості, можна побачити, що у системі відбувається асимптотичне полеорієнтування, тобто виконуються умови.

Задана траєкторія швидкості у системі IFOC відпрацьовується з невеликими похибками (максимальне значення 0.6 рад/с).

Розглянемо напруги двигуна у системах $(a-b)$ та $(d-q)$. У стаціонарній системі координат $(a-b)$ напруги мають форми функції синусоїди. У системі координат $(d-q)$ напруги мають вигляд постійних сигналів. Це пов'язано з тим, що система координат $(d-q)$ обертається синхронно з вектором потокозчеплення, відповідно вектором напруги і струму. Збудження двигуна відбувається по осі d (перед початком відпрацювання траєкторії швидкості $u_q = 0$, а u_d змінюється). По мірі того, як подається завдання швидкості зростає частота та амплітуда вектора напруги (це добре видно по осі q).

Струм i_q повністю повторює момент двигуна, тому що в системі з полеорієнтуванням нема компоненти $\psi_{2q}i_d$, а потік ψ_{2d} має постійне значення. Відповідно форма моменту і форма струму i_q однакові.

Струм i_d регулює потокозчеплення, тобто він використовується для збудження двигуна, коли ж струм i_q з'являється при відпрацюванні моменту.

З графіку моменту видно, що він не змінюється в усталених режимах, тобто має форму прямої лінії. Це пояснюється тим, що ми знехтували в'язким тертям.

5.4 Дослідження динамічних характеристик при відпрацюванні нульової швидкості і зміні початкових умов потокозчеплення

Проведемо дослід з нульовою швидкістю та початковим значенням потокозчеплення на рівні 10% (тобто $\psi_a(0) = \psi_b(0) = 0.1 \text{ Вб}$) від номінального значення (таким чином ми додаємо остаточну намагніченість). Результати математичного моделювання зображені на рис.5.5 - 5.6.

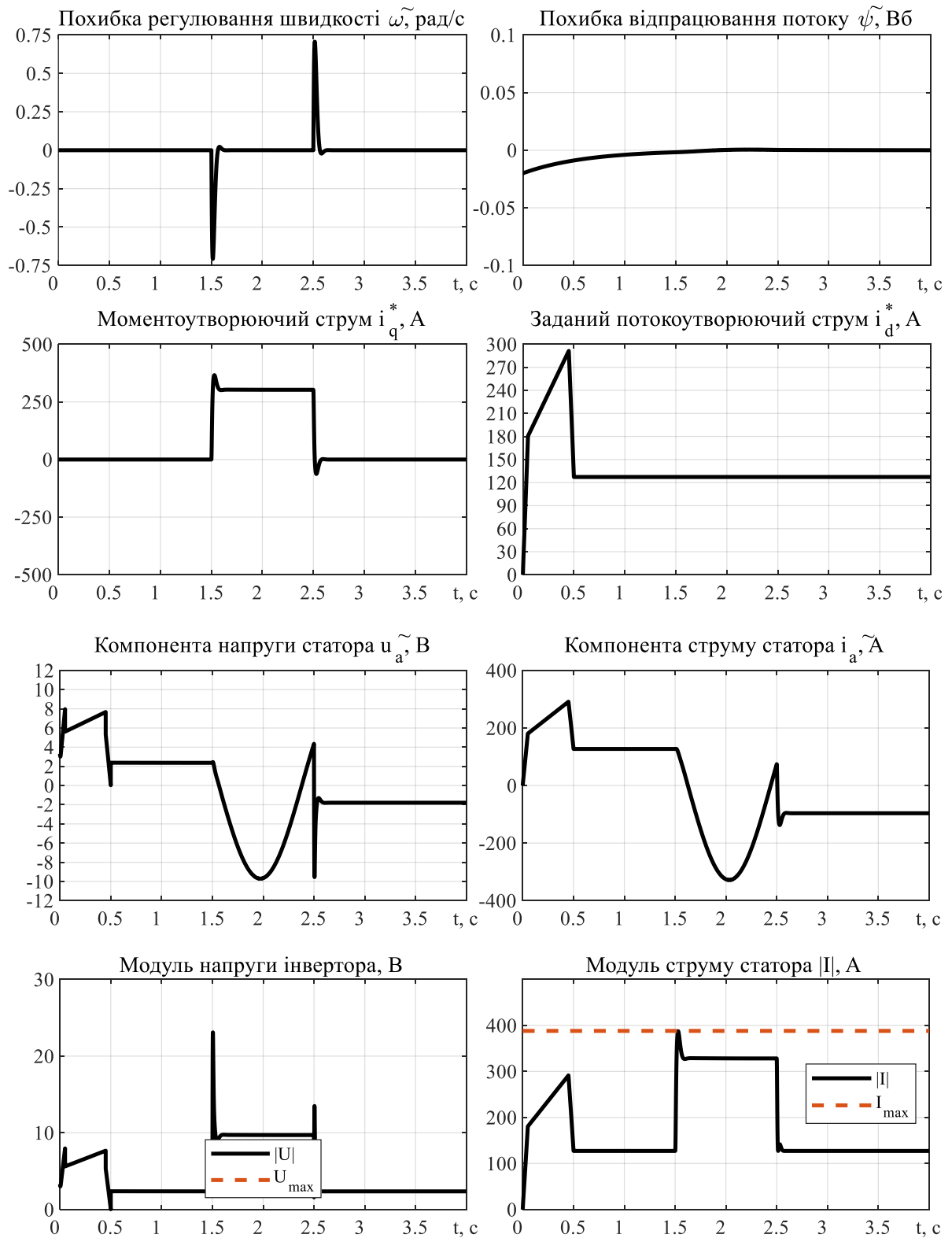


Рисунок 5.5– Графіки перехідних процесів системи IFOC

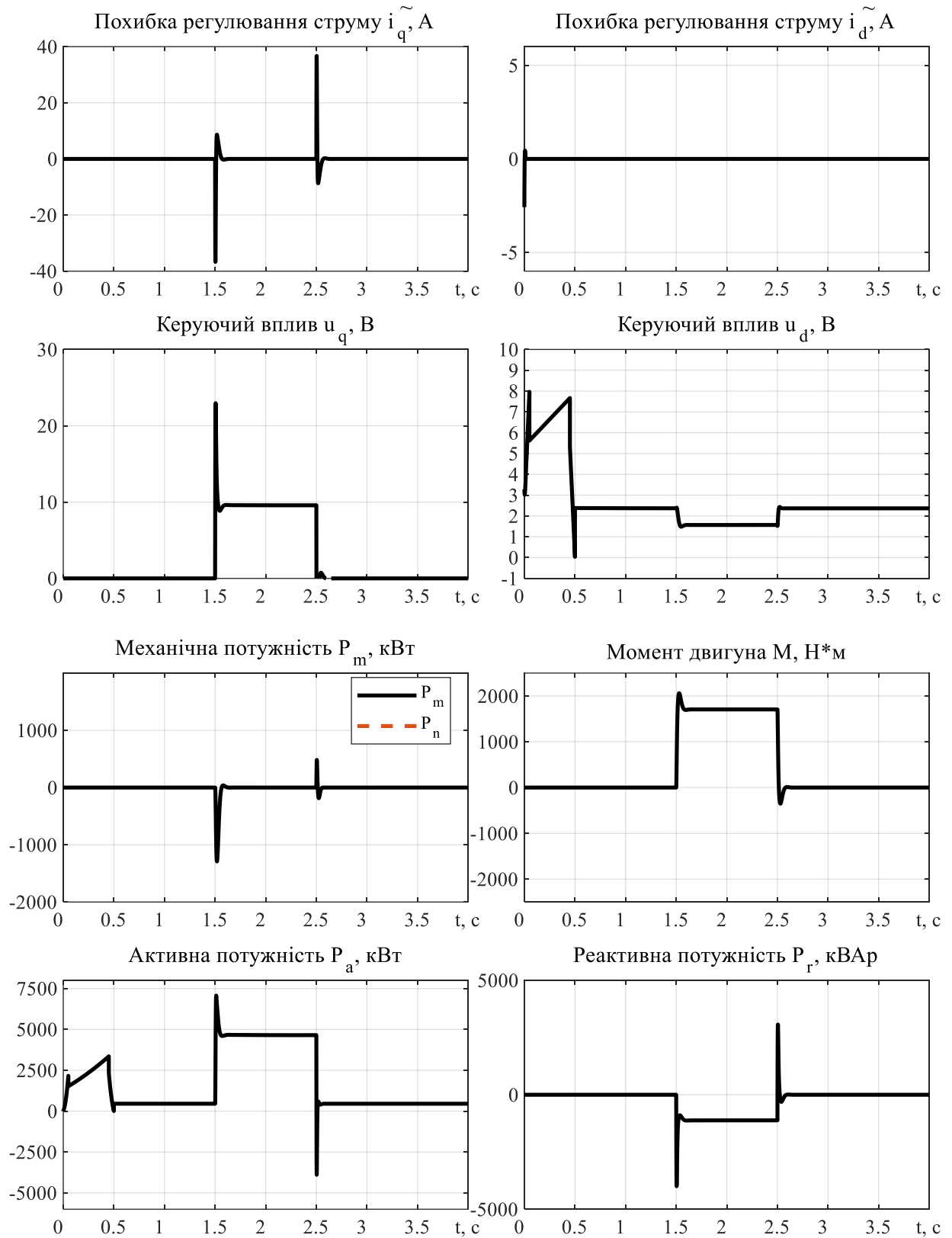


Рисунок 5.6– Графіки перехідних процесів системи IFOC

5.5 Дослідження динамічних характеристик при відсутності компенсації першої похідної швидкості

Проведемо дослід при відсутності компенсації першої похідної швидкості. Результати математичного моделювання зображені на рис.5.7 -5.8.

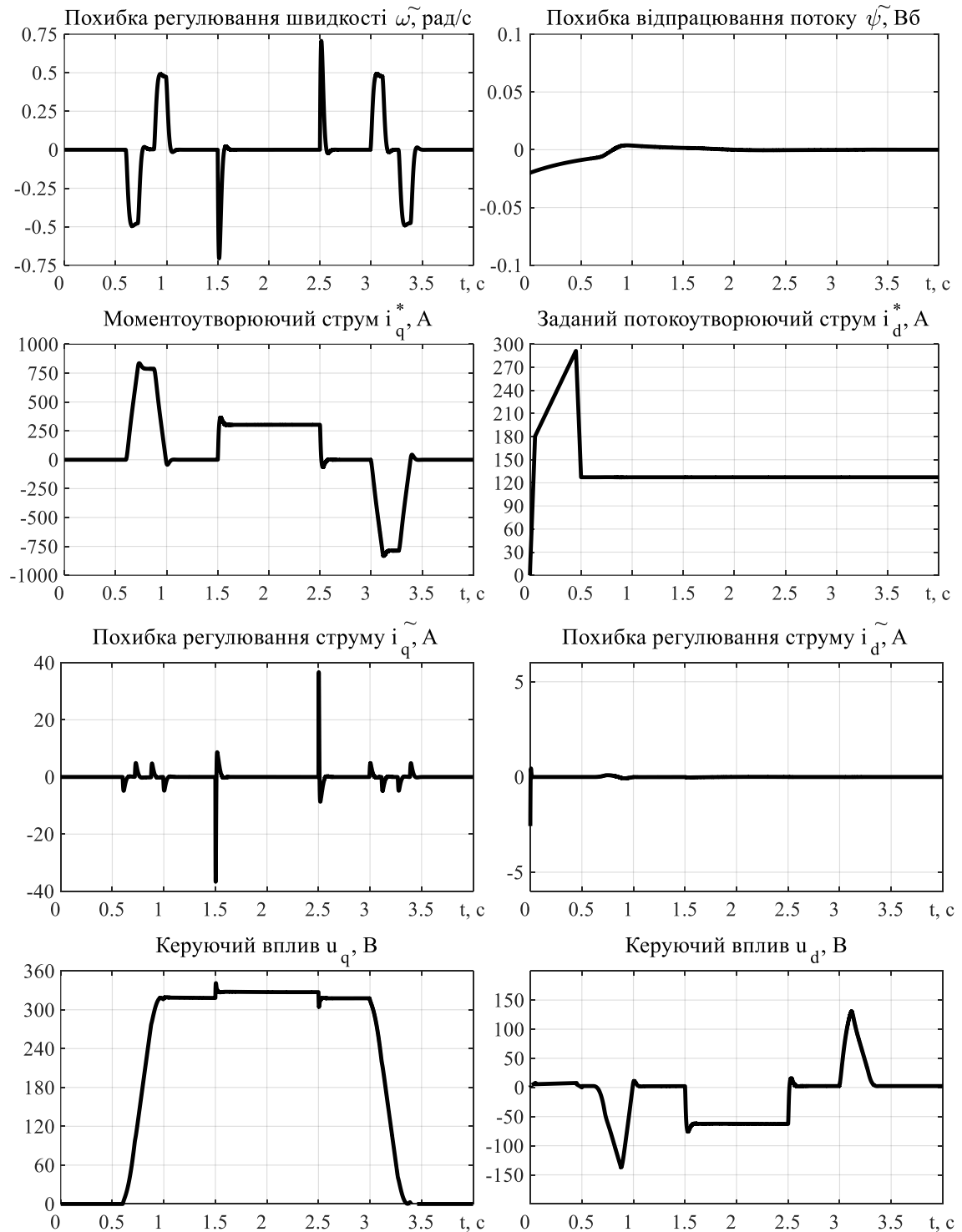


Рисунок 5.7 – Графіки перехідних процесів системи

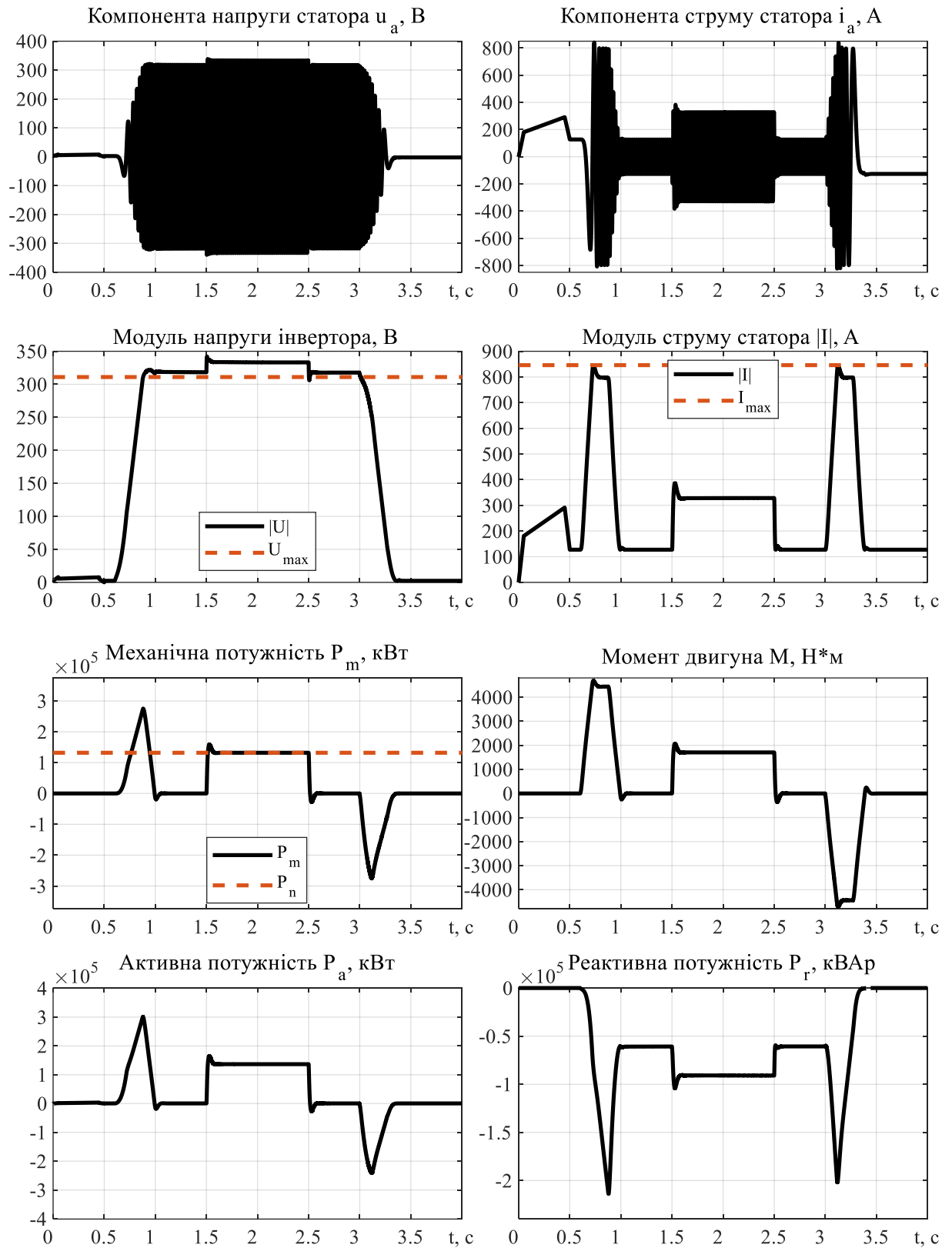


Рисунок 5.7 – Графіки перехідних процесів системи

При порівнянні отриманих графіків ми бачимо, що при відсутності компенсації першої похідної по швидкості зростають похибки відпрацювання по швидкості та по струму. Можемо зробити висновок, що компенсація забезпечує регулювання кутової швидкості та асимптотичне відпрацювання системи.

Висновки до розділу

1. В даному розділі розраховано номінальні дані та параметри схеми заміщення двигуна 4AM355S8Y3 після чого проведено дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД.

2. Створено набір програм для дослідження систем векторного керування методом математичного моделювання, завдяки чому проведено повноцінне дослідження динамічних та статичних характеристик електроприводу, що підтвердило його працездатність та ефективність.

3. Якщо порівнювати скалярну систему керування та IFOC можна відзначити, що у системі IFOC відсутні коливання моменту. Також відсутня похибка відпрацювання швидкості під навантаженням. Важливо відмітити, що потік двигуна не реагує на зміну моменту, тобто у системі векторного керування було досягнуто окремого регулювання потоку та моменту (при використанні скалярного методу відсутня стабілізація потоку, тобто потокозчеплення зменшується при накиданні навантаження, система не забезпечує полеорієнтування за вектором потокозчеплення).

6 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОВОРОТНОГО МЕХАНІЗМУ

Метою даного розділу є розробка системи автоматизації на основі використання програмованого логічного контролера для спрощення роботи схеми та мінімізації людської праці з метою підвищення енергоефективності та поліпшення рівня безпеки персоналу.

Цикл роботи роторного екскаватора включає такі етапи:

1. Копання та наповнення ковша в положенні 1.
2. Поворот на розвантаження до положення 2.
3. Розвантаження ковшів.
4. Повернення до місця копання.

В наступних пунктах це буде враховано як початкові умови роботи схеми.

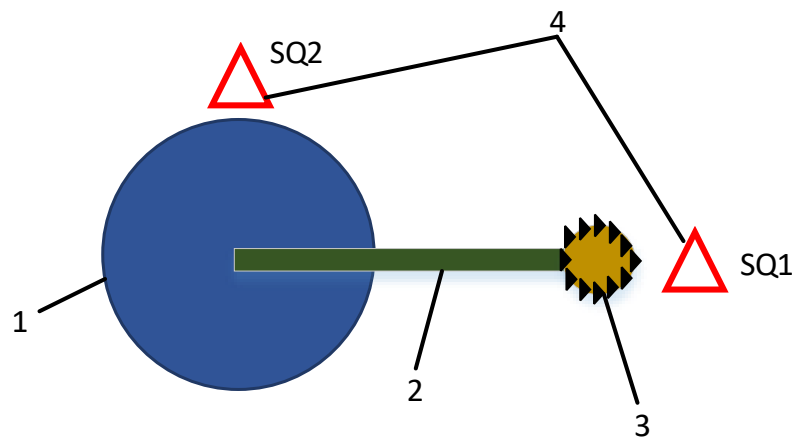


Рисунок 6.1 - Технологічна схема автоматизованої системи керування з датчиками

На схемі прийняті наступні позначення: 1 - основа екскаватора, 2 - стріла, 3 - роторне колесо, 4 - датчики положення (SQ1) та (SQ2).

6.1 Вибір програмованого логічного контролера

Запишемо сигнали для синтезу та складання програми.

Вхідні сигнали:

a - Пуск;

b - Стоп;

c - Напівавтоматичний режим (при натисканні кнопки «Пуск» схема має працювати до натискання кнопки «Стоп», або до кінця циклу. Для повторного запуску схеми потрібно знов натискати кнопку «Пуск»);

d - Автоматичний режим (при натисканні кнопки «Пуск» схема має працювати до натискання кнопки «Стоп»).

Сигнали таймерів:

T1 - Таймер на ділянці з розвантаженням ковшів екскаватора;

T2 - Таймер на ділянці повороту з наповненими ковшами екскаватора;

T3 - Таймер на ділянці з завантаженням ковшів екскаватора;

T4 - Таймер на ділянці повороту з порожніми ковшами екскаватора.

Вихідні сигнали:

f1 - Робота двигуна поворотного механізму;

f2 - Робота двигуна роторного колеса.

f3 - поворот з навантаженими ковшами

f4 - поворот з порожніми ковшами

Виходячи з кількості вхідних/вихідних сигналів оптимальним варіантом програмованого логічного контролера буде Zelio Logic SR2B201B[15].

Даний контролер має наступні характеристики:

- напруга живлення 24В АС;
- 12 цифрових входів;
- 8 релейних виходів;
- споживана потужність 6В·А .

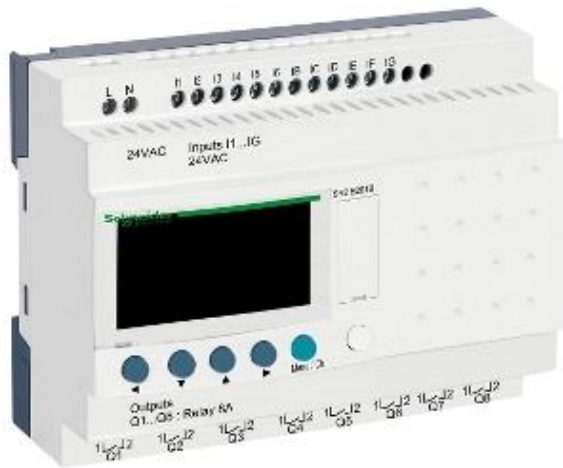


Рисунок 6.2 - Програмований логічний контролер Zelio Logic SR2B201B

6.2 Логічний синтез та розробка програми

Для заданих умов роботи схеми був обраний синтез методом графопереходів.

Графоперехід - це графічне представлення умов роботи багатотактної логічної схеми, який складається з 2^n вершин, де n – кількість тригерів (проміжних змінних), що будуть використовуватися для побудови логічної схеми. Елементами графопереходу є вершини та ребра. Ребра з'єднують вершини між собою. Кожна вершина відповідає окремому стану схеми. На ребрі позначають вхідні сигнали під дією яких схема переходить з одного стану в інший.

Графоперехід роботи схеми зображено на рис. 6.3.

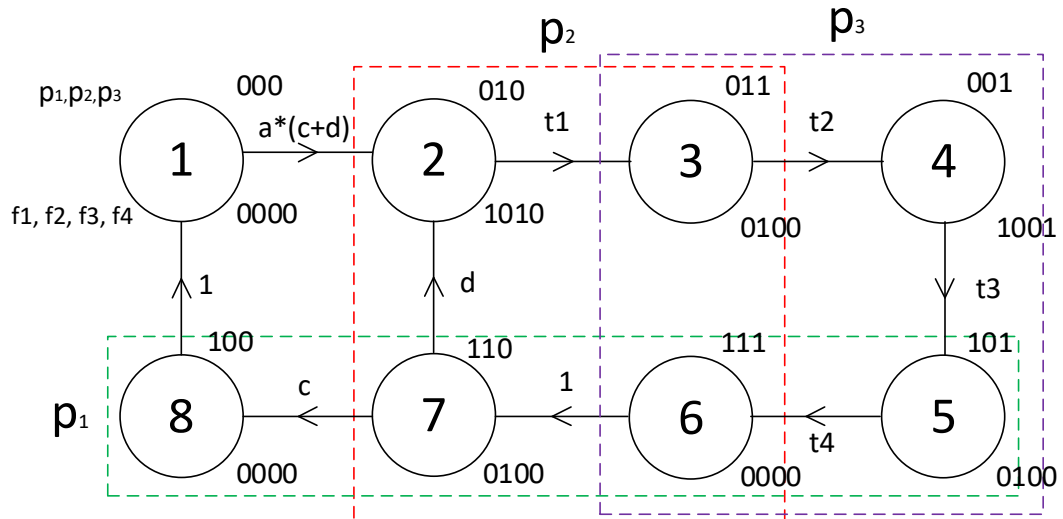


Рисунок 6.3 - Графоперехід за умовами роботи схеми

Рівняння для встановлення та скидання тригерів:

$$Sp_1 = \overline{t_3} \overline{p_2} p_3 \quad (6.1)$$

$$Sp_2 = a(c + d) \overline{p_1} \overline{p_3} + t_4 p_1 p_3 \quad (6.2)$$

$$Sp_3 = \overline{t_1} \overline{p_1} p_2 \quad (6.3)$$

$$Rp_1 = \overline{p_2} \overline{p_3} + p_2 \overline{p_3} + b \quad (6.4)$$

$$Rp_2 = \overline{t_2} \overline{p_1} p_3 + c p_1 \overline{p_3} + b \quad (6.5)$$

$$Rp_3 = p_1 p_2 + b \quad (6.6)$$

Рівняння для таймерів:

$$T1 = \overline{p_1} \overline{p_2} \overline{p_3} \quad (6.7)$$

$$T2 = \overline{p_1} p_2 p_3 \quad (6.8)$$

$$T3 = \overline{p_1} \overline{p_2} p_3 \quad (6.9)$$

$$T4 = p_1 \overline{p_2} p_3 \quad (6.10)$$

Рівняння для вихідних змінних:

$$f1 = \overline{p_1} \overline{p_2} \overline{p_3} + \overline{p_1} p_2 p_3 \quad (6.11)$$

$$f2 = \overline{p_1} p_2 p_3 + p_1 \overline{p_2} p_3 \quad (6.12)$$

$$f3 = \overline{p_1} p_2 \overline{p_3} \quad (6.13)$$

$$f4 = \overline{p_1} \overline{p_2} p_3 \quad (6.14)$$

Адресація змінних:

Вхідні змінні a, b, c, d - відповідно I1, I2, I3, I4;

Проміжні змінні p1, p2, p3 - відповідно M1, M2, M3;

Таймери T1, T2, T3, T4 - відповідно T1 - T4;

Вихідні змінні f1, f2, f3, f4 - відповідно Q1, Q2, Q3, Q4.

Програма у середовищі ZelioSoft зображена на рис. 6.4 - 6.5.

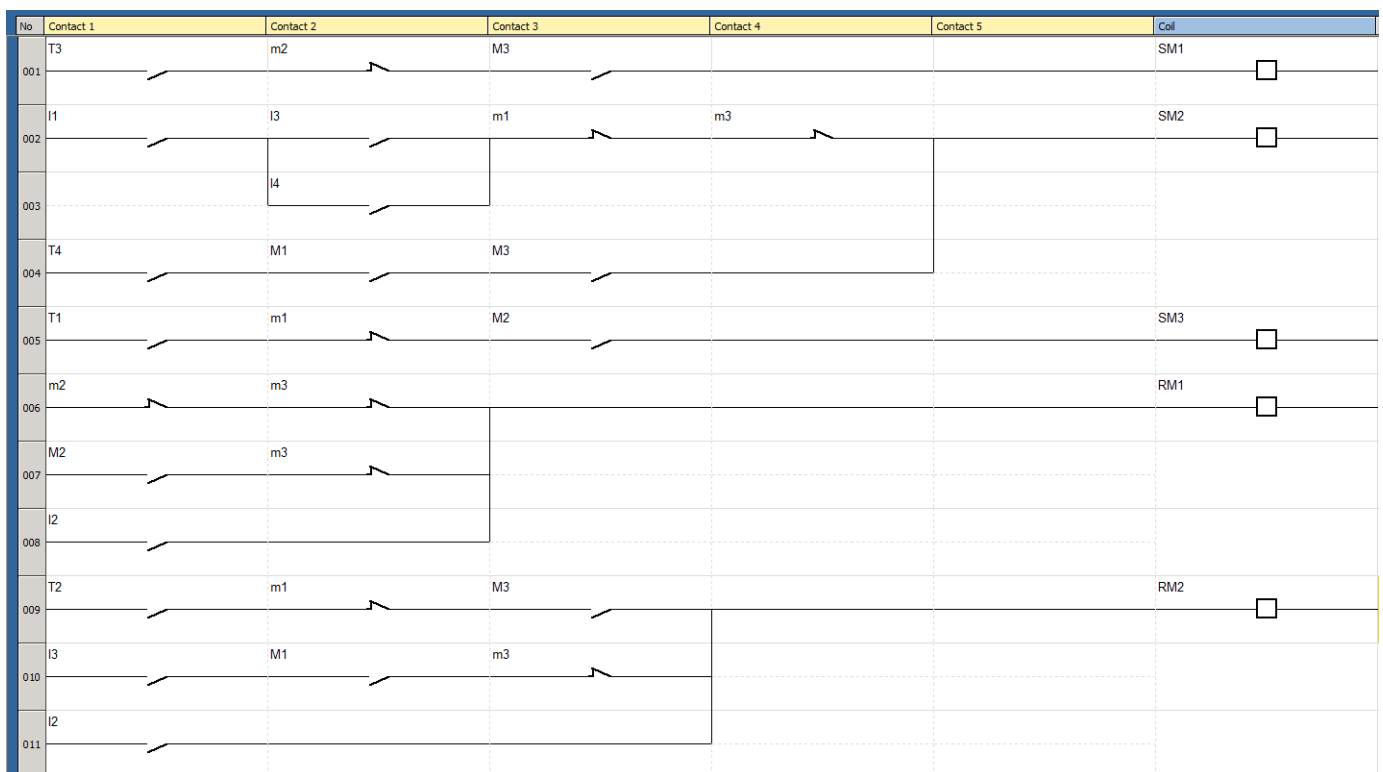


Рисунок 6.4 - Програма у середовищі ZelioSoft

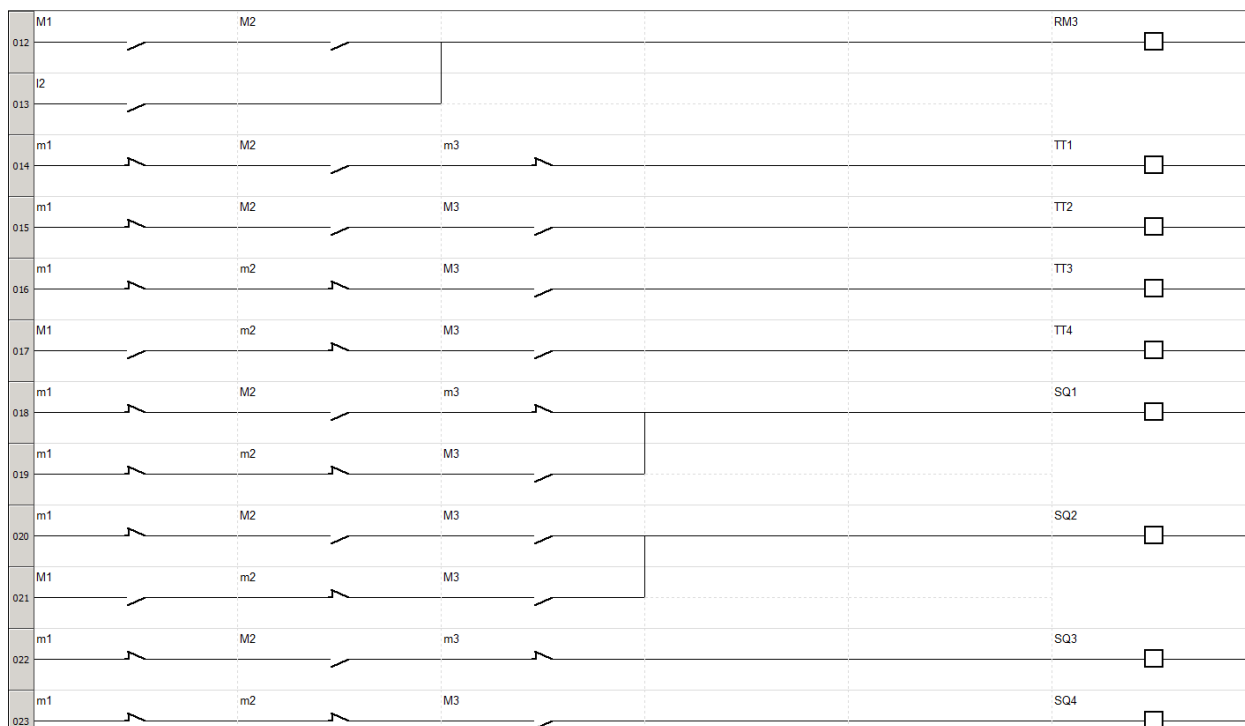


Рисунок 6.5 - Програма у середовищі ZelioSoft

Візуалізація технологічного процесу розроблена в середовищі CoDeSys на рис. 6.6 - 6.10 .

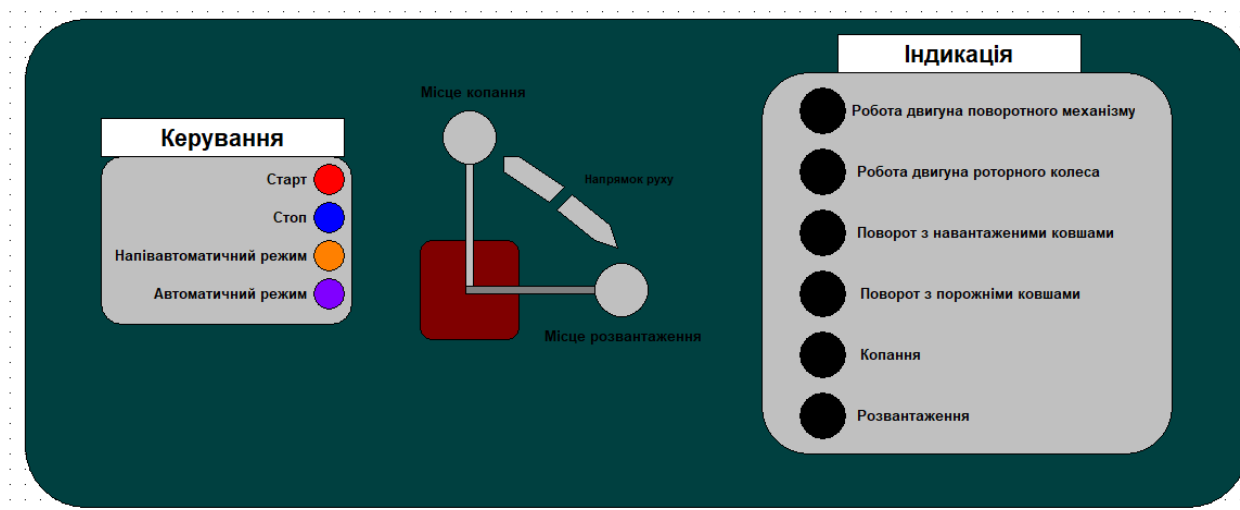


Рисунок 6.6 - Схема в середовищі CoDeSys в неактивному стані

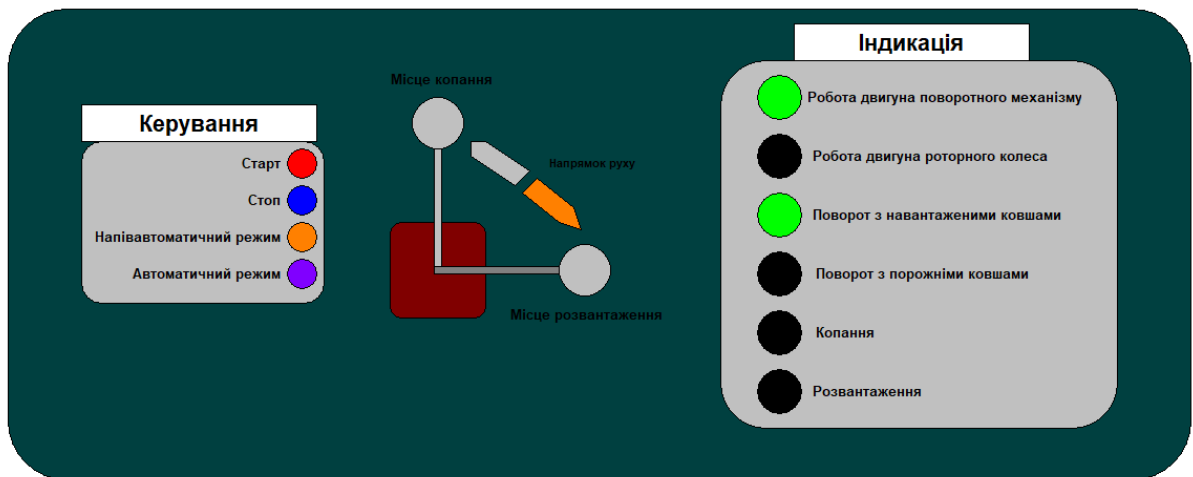


Рисунок 6.7 - Схема в в середовищі CoDeSys при повороті на розвантаження

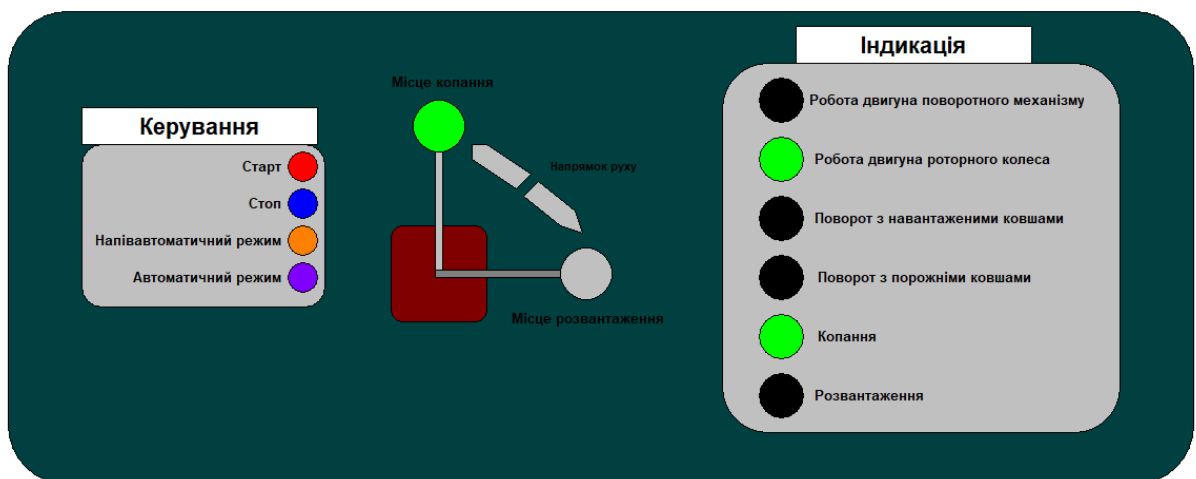


Рисунок 6.8 - Схема в в середовищі CoDeSys при копанні

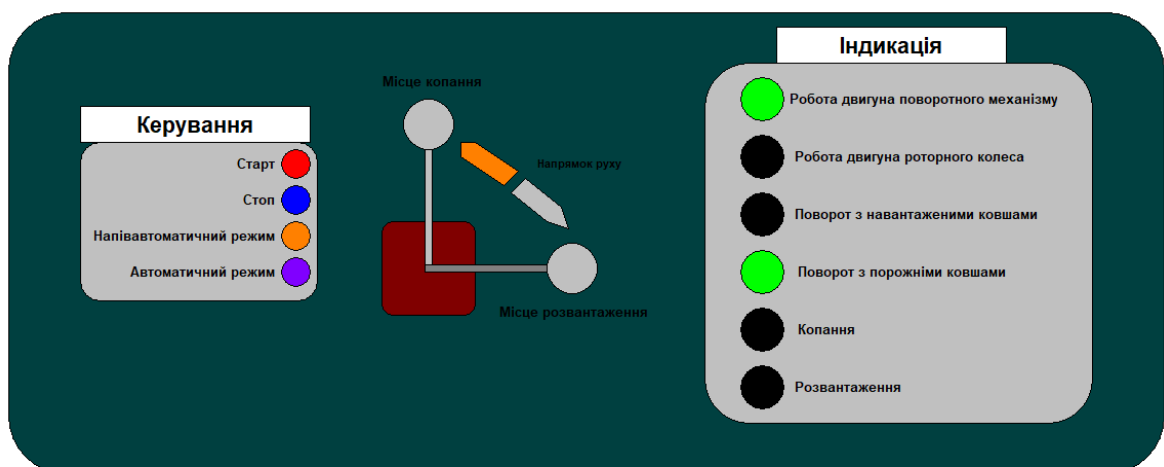


Рисунок 6.9 - Схема в в середовищі CoDeSys при повороті з порожніми ковшами

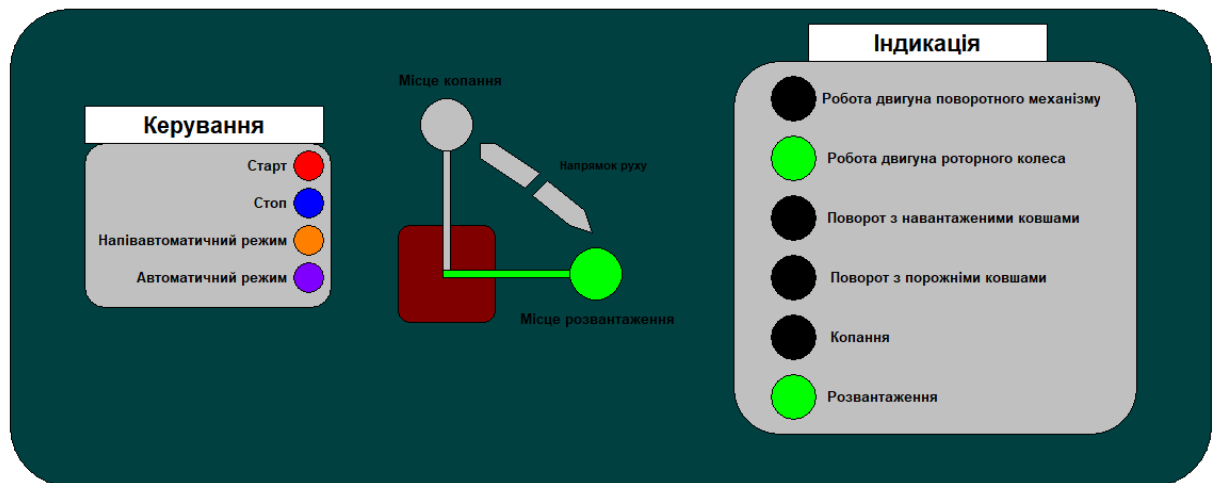


Рисунок 6.10 - Схема в в середовищі CoDeSys при розвантаженні

Висновки до розділу

1. В даному розділі зроблено вибір програмованого логічного контролера виходячи з кількості вхідних та вихідних сигналів. За даними умовами підійшов Zelio Logic SR2B201B. Виконано логічний синтез за заданим алгоритмом роботи схеми та складено програму в середовищі Zelio Soft. Розроблена візуалізація в програмі CoDeSys. Реалізовано два режими роботи: автоматичний та напівавтоматичний.

2. Програмовані логічні контролери (ПЛК) дозволяють легко змінювати та налаштовувати логіку управління, що робить їх надзвичайно гнучкими у застосуванні. Якщо процес виробництва або обладнання змінюється, програму ПЛК можна оновити, не замінюючи апаратні компоненти.

7 РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

В даному розділі буде обрано обладнання для складання схеми електричної принципової (Додаток А), а саме: перетворювач частоти для керування двигуном, гальмівний резистор для розсіювання надлишкової енергії, автоматичні вимикачі для захисту обладнання, блок живлення для ПЛК, який знижуватиме рівень напруги до необхідного ПЛК, сигнальні лампи для індикації та кнопки для керування.

7.1 Вибір перетворювача частоти

Обираємо частотний перетворювач ACS580-01-246A-4 [16], параметри якого наведені в табл. 7.1.



Рисунок 7.1 - перетворювач частоти ACS580-01-246A-4

Таблиця 7.1 - Характеристики перетворювача частоти ACS580-01-246A-4

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	132

Номінальна напруга, В	380 - 415
Номінальний струм, А	246
Максимальний вихідний струм, А	350

Схема електроприводу зображена в Додатку В.

Для вибору гальмівного резистора потрібно провести розрахунок максимальної потужності гальмування на кожній ділянці:

$$P_{R_{\max 1}} = \frac{J'_{\Sigma_{\text{нав}}} \omega_n^2}{t_{\text{роз}}} = \frac{1287.90 \cdot 78.50^2}{37.34} = 212.54 (\kappa Bm); \quad (7.1)$$

$$P_{R_{\max 2}} = \frac{J'_{\Sigma_{\text{нав}}} \omega_n^2}{t_{\text{спов}}} = \frac{1287.9 \cdot 78.50^2}{35.37} = 224.38 (\kappa Bm); \quad (7.2)$$

$$P_{R_{\max 3}} = \frac{J'_{\Sigma_{\text{нор}}} \omega_n^2}{t'_{\text{роз}}} = \frac{887.90 \cdot 78.50^2}{25.75} = 212.48 (\kappa Bm); \quad (7.3)$$

$$P_{R_{\max 4}} = \frac{J'_{\Sigma_{\text{нор}}} \omega_4^2}{t'_{\text{спов}}} = \frac{887.90 \cdot 78.50^2}{24.38} = 224.42 (\kappa Bm). \quad (7.4)$$

Знайдемо опір гальмівного резистора, використовуючи найбільше значення максимальної потужності гальмування:

$$R_r = \frac{450000}{P_{R_{\max}}} = \frac{450000}{224380} = 2.01 (Om). \quad (7.5)$$

Обираємо гальмівний резистор Siemens I6SL3000-1BE32-5AA0 (табл 7.2)[17].



Рисунок 7.2 - Гальмівний резистор Siemens I6SL3000-1BE32-5AA0

Таблиця 7.2 - Характеристики гальмівного резистора Siemens I6SL3000-1BE32 5AA0

Параметр	Значення
Максимальна потужність розсіювання, кВт	250
Опір, Ом	2,2

Обираємо автоматичний вимикач ABB 1SDA066561R1 (табл.7.3) [18], виходячи з максимального вихідного струму перетворювача частоти.



Рисунок 7.3 - Автоматичний вимикач ABB 1SDA066561R1

Таблиця 7.3 – Характеристики автоматичного вимикача ABB 1SDA066561R1

Параметр	Значення
Номінальний струм, А	400
Характеристика відключення	C
Гранична розривна здатність, кА	36
Номінальна напруга автомата / ПЗВ, В	230/400 AC

Вибираємо кнопки керування LAY5-EC21 АСКО-УКРЕМ(табл. 7.4)[19].



Рисунок 7.4 - Кнопка LAY5-EC21

Таблиця 7.4 – характеристики кнопки LAY5-EC21 АСКО-УКРЕМ

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення, В	230, 380
Номінальний струм, А	4

Обираємо сигнальні лампи XB7V03BP3(табл. 7.5)[20].



Рисунок 7.5 - сигнальна лампа XB7EV03BP3

Таблиця 7.5 – характеристики сигнальних ламп XB7EV03BP3

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення, В	24
Номінальний струм, А	0,027

Оберемо блок живлення Mean Well LPH-18-24(табл 5.6)[21] для зниження напруги до необхідного рівня живлення ЛК та інших елементів схеми.



Рисунок 7.6 - Блок живлення Mean Well LPH-18-24

Таблиця 7.6 – Характеристики блока живлення Mean Well LPH-18-24

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення, В	110/220 AC
Вихідна напруга, В	24 DC
Струм на виході, А	0,75

Обираємо автоматичний вимикач ВА 47-29М (табл.7.7)[22], для захисту ПЛК.



Рисунок 7.7 - Автоматичний вимикач ВА 47-29М

Таблиця 7.7 – Характеристики автоматичного вимикача ВА 47-29М

Параметр	Значення
Номінальний струм, А	1
Характеристика відключення	C
Гранична розривна здатність, кА	4,5
Номінальна напруга автомата / ПЗВ, В	230/400 АС

Обравши всі необхідні елементи переходимо до побудови схеми електричної принципової, яка зображена в Додатку А.

Висновки до розділу

1. В даному розділі було з здійснено вибір технологічного обладнання, з урахуванням якого була розроблена схема електрична принципова та специфікація.

2. Розраховано максимальні потужності гальмування на кожній ділянці та опір, завдяки чому був обраний гальмівний резистор до перетворювача частоти ACS580-01-246A-4.

ВИСНОВКИ

В даній роботі проведено аналітичний огляд роторних екскаваторів, розглянуто основні типи та відмінності. Розглянуто області застосування та основні елементи конструкції даних машин. Обрано конкретний тип екскаватора та наведено його основні параметри. Побудовано кінематичну схему та сформовано вимоги до електроприводу механізму повороту.

Проведено розрахунок потужності електродвигуна та сформовано цикл роботи механізму. Розглянуто схему дводвигунного електроприводу, який складається з перетворювачів частоти, асинхронних двигунів, та виконавчого механізму.

Обрано двигун 4AM355S8Y3, виходячи з попередніх розрахунків. Після вибору двигуна проведено перевірки по перевантажувальній здатності та по нагріванню, згідно з якими двигун відповідає умовам роботи схеми. Побудовано навантажувальну діаграму, з якої видно, що максимальний момент досягається під час гальмування при русі з навантаженими ковшами.

Розроблено математичну модель для моделювання систем керування та розглянуто базові принципи проектування алгоритму векторного керування. Проведено дослідження алгоритму непрямого векторного керування асинхронними АД, які мають підвищену стійкість та можливість адаптації до змін активного опору ротора, що є важливим у контексті створення електромеханічних систем з високою динамікою та ефективністю.

Створено набір програм для дослідження систем векторного керування методом математичного моделювання, завдяки чому проведено дослідження динамічних та статичних характеристик систем.

Математичне моделювання показало, що система непрямого векторного керування IFOC забезпечує працездатність системи на як нульовій так і не на нульовій швидкості з низкою похибкою відпрацювання траєкторії швидкості. Однак можна відзначити й недоліки системи IFOC, а саме система не здатна

адекватно працювати при введенні варіації активного опору ротора. Щоб позбутися цього недоліку використовується робастифікація системи.

Розроблено систему автоматизації для циклу роботи схеми, сформованого в попередніх розділах. Після чого проведено синтез методом графопереходів та обрано програмований логічний контролер Zelio Logic SR2B201B, який задовільняє умовам роботи схеми. Створено програму в середовищі ZelioSoft та розроблено візуалізацію технологічного процесу завдяки програмному забезпеченню CoDeSys.

Здійснено вибір технологічного обладнання з урахуванням якого розроблена схема електрична принципова та специфікація до неї.

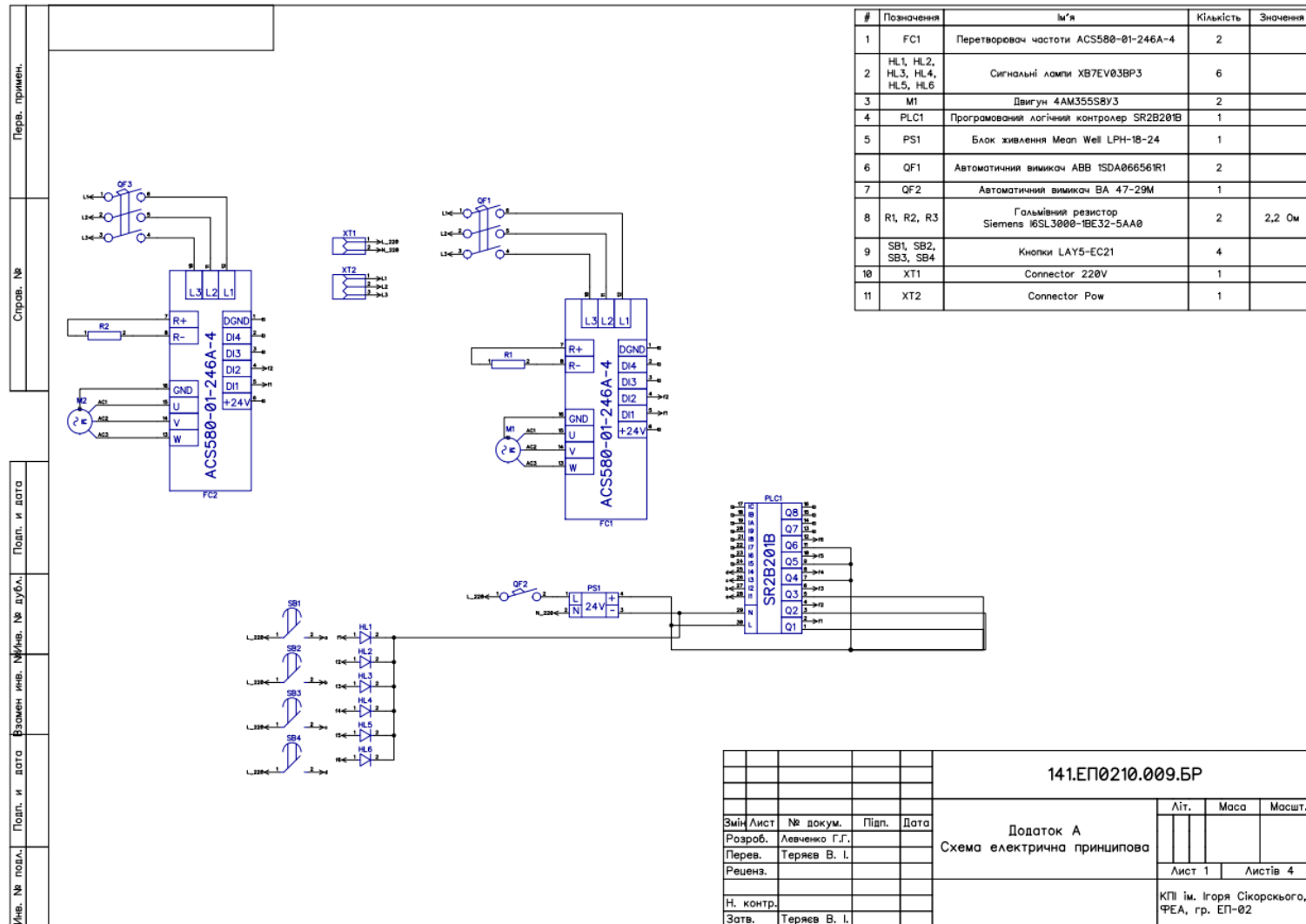
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машины для земляных работ: Навчальний посібник / Хмара Л.А., Кравець С.В., Нічке В.В.| Назаров Л.В.) Скоблюк М.П., Нікітін В.Г. Під загальною редакцією проф. Хмари Л.А. та проф. Кравця С.В. Рівне - Дніпропетровськ - Харків. - 2010. - 576 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Будівельна техніка» / А. О. Качура, А. О. Атинян; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 108 с.
3. Гаврюков А. В. “Роторний екскаватор поперечного копання з телескопічною стрелою”, Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Краматорськ, Україна, 2015. – 74 с.
4. Гладчук Е.А. “Технологічні можливості оптимізації енергоспоживання технічної системи дискретної дії на прикладі смугового прокатного стану”, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя - Тернопіль: ТНТУ, 2015. – 47 с.
5. Зайцева Ю. В. “Вибір раціональної структури системи управління позиційним електроприводом головних механізмів роторного екскаватора”, кафедра автоматизації та управління електротехнічними комплексами ІЕЕ НТУУ «КПІ», м. Київ, 2012. - 7 с.
6. Mueller M. Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems [Text] / M. Mueller. – Woodhead Publishing, 2003. – 280 p.
7. Hughes A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications [Text] / A. Hughes, B. Drury. – Newnes, 2013. – 440 p.
8. Курочкин Н. С. “Обмеження динамічних навантажень електроприводах кар'єрних екскаваторів методами комбінованих оптимальних систем керування”, м. Львів, 2019 р. - 164 с.
9. Коренькова Т. В., Ковальчук В. Г., Калінов А. П. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів. Практикум і тестові завдання, Навчальний посібник, Кременчук - 2023. - 191 с.

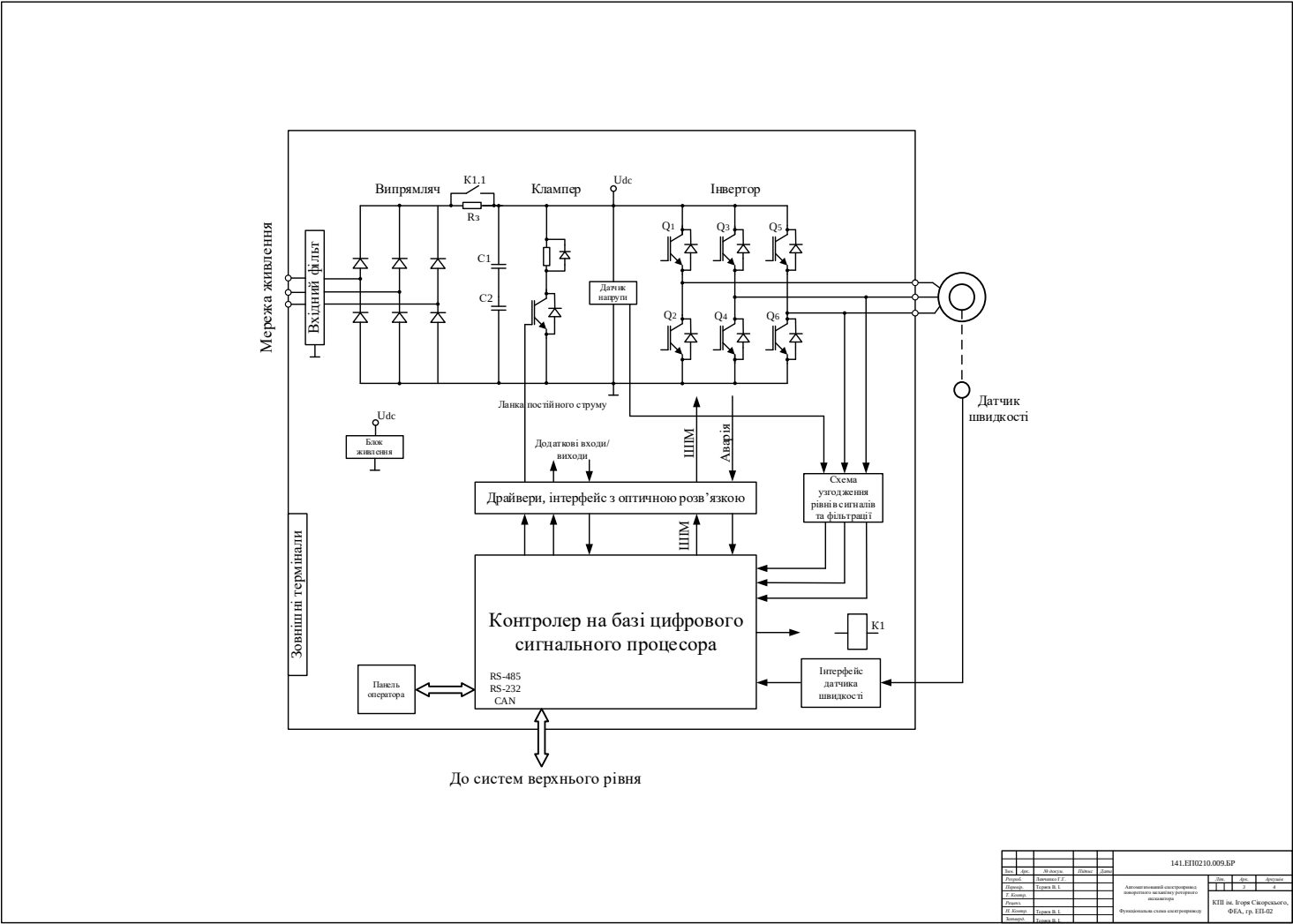
10. Кравчик А.Е. Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник. - : Енерговидат, 1982. - 504 с.
11. Пересада С. М., Ніконенко Є. О. Курсовий проект з керування електроприводами [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 58 с.
12. Ковбаса С.М., Пересада С.М. Теорія мехатронних систем розрахунково-графічна робота: навч. посіб. Київ, 2019. - 95с.
13. Пересада С.М., Пушкар М.В. Основи мехатроніки: навч. посіб. Київ, 2020. - 136 с.
14. Толочко О. І. Моделювання та аналіз електромеханічних систем в MATLAB: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. - 275 с.
15. Програмованіє логічне реле Zelio Logic SR2B201B. URL: <https://www.se.com/ua/ru/product/SR2B201B/zelio-logic-> .
16. ABB machinery drives / 2020. – 44 с. URL: <https://new.abb.com/products/3AUA0000080507/acs580-01-246a-4>]
17. Зовнішній гальмівний резистор 6SL3000-1BE32-5AA0. URL: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6SL3000-1BE32-5AA0>
18. Автоматичний вимикач ABB 1SDA066561R1. URL: <https://new.abb.com/products/1SDA066561R1/a3n-400-tmf-400-4000-3p-f-f> .
19. Кнопки LAY5-EC21 АСКО-УКРЕМ. URL: <https://001.com.ua/uk/knopka-grybok-d-40-mm-bez-fiksatsiyi-1nv-chorna-lay5-ec21-asko-ukrem> .
20. Сигнальні лампи XB7EV03BP3. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/XB7EV03BP3> .
21. Блок живлення Mean Well LPH-18-24. URL: <https://meanwell.kiev.ua/ua/p500355847-lph-blok-pitaniya.html> .

22. Автоматичний вимикач ВА 47-29М. URL:
https://amperok.com.ua/%20avtomatychnyj_vymykach_va_47-29m_1p_01a_iek_mva_20-1-001-c .

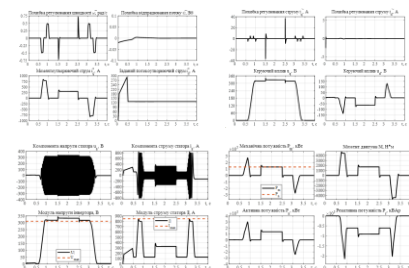
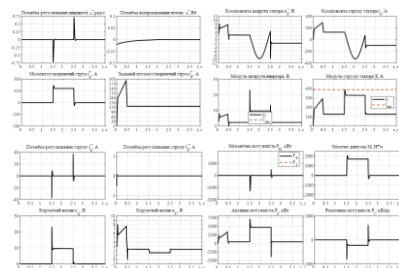
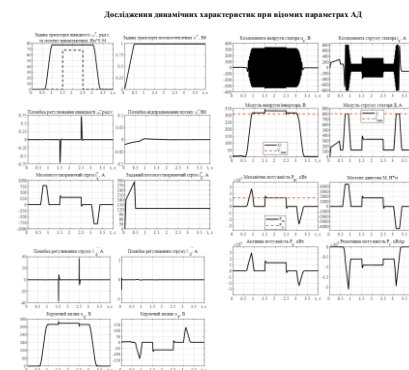
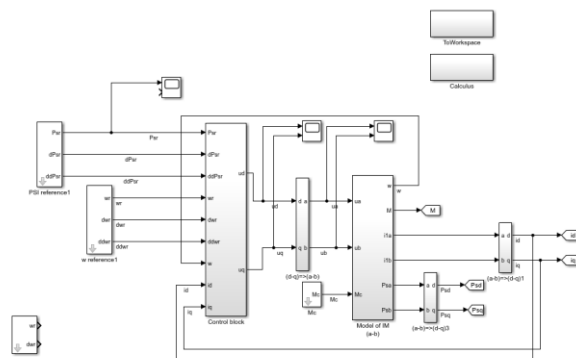
ДОДАТОК А



ДОДАТОК В



ДОДАТОК Г



						141.ЕП102.10.009.БР		
Знак	Форм.	М. автор	Підпис	Дата		Знак	Форм.	Адрес
Регістр.	Державний Г. Г.							
Підпис	Турчак В. І.							
Г. Кошар.								
Регістр.								
Г. Кошар.	Турчак В. І.							

Додаток Г

Результати досліджень

КІП ім. Іоанна Скорняка		
Феога, гр. ЕП-02		