

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні

системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

На тему: «Автоматизований електропривод лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки»

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕП-п01

(шифр групи)

_____ Кипиченко Вадим Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник _____ доц. Теряєв Віталій Іванович

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

Консультант _____ доц. Реуцький Микола Олександрович

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

Рецензент _____

(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.

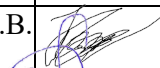
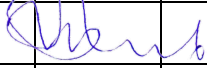
Студент _____

(підпис)

Київ – 2023 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.0003.030.БР	Пояснювальна записка	78	
3	A1	141.0003.030.БР	Креслення загального виду	1	
4	A1	141.0003.030.БР	Схема електрична принципова	1	
5	A1	141.0003.030.БР	Результати досліджень	1	

				<i>141.0003.030.БР</i>	
	ПІБ	Підп.	Дата	Лист	Листів
Розробн.	Кипиченко В.В.			2	80
Керівн.	Теряєв В.І.				
Консульт.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п01	

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

на тему: «Автоматизований електропривод лебідки спуско-підйомного
комплексу бурової установки»

**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
Кипиченко Вадиму Вячеславовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Автоматизований електропривод лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки»,

керівник проекту: Теряєв Віталій Іванович к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проекту: 08.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту: бурова лебідка: маса колони 160 т; максимальна глибина буріння 2500 м; діаметр барабану 0.5 м; довжина барабану 1.19 м; швидкість підйому 0.3 м/с; напруга живлення 660 В; частота мережі 50 Гц.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Аналітичний огляд в області електроприводів бурових установок. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна лебідки. 3. Вибір типу електродвигуна та силового обладнання. Опис силової схеми перетворювального пристрою. 4. Розробка математичної моделі електроприводу. Розрахунок параметрів елементів електроприводу. 6. Дослідження статичних та динамічних режимів

електромеханічної системи (шляхом моделювання). Аналіз результатів. 7. Спецчастина. Автоматизація електроприводу лебідки 8.Розробка схеми керування

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1. Загальний вид установки 2. Схема електрична принципова 3. Структурна схема і результати моделювання.

6.Консультанти розділів проекту*

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

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

7. Дата видачі завдання 25 березня 2023 р.

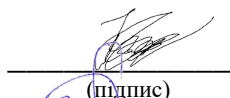
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

виконання дипломного проекту студентом групи ЕП-п01 Кипиченко В.В
на тему «Автоматизований електропривод лебідки спуско-підйомного
комплексу бурової установки»

Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Обсяг, с	Термін виконання	Позначки про виконання
1.Аналітичний огляд в області електроприводів бурових установок 1.1.Галузі використання та типові технічні рішення електроприводів бурових установок (з ілюстраціями, схемами) 1.2.Опис конкретного електроприводу лебідки та системи її автоматизації (спрошені кінематична та електрична схеми) 1.3.Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації (загальні вимоги та конкретні технічні дані)	15	30.04.23	
2.Визначення потрібної потужності електродвигуна лебідки 2.1.Розрахунок тягових зусиль електроприводу 2.2. Побудова навантажувальної діаграми, розрахунок потужності електродвигуна	10	10.05.23	
3.Вибір типу електродвигуна та силового обладнання. Розробка (опис) силової схеми перетворювального пристрою	10	15.05.23	

4.Розробка математичної моделі електроприводу (рівняння, структурна схема). Розрахунок параметрів елементів електроприводу	10	20.05.23	
5.Синтез системи автоматичного керування 5.1. Обґрунтування принципу керування електроприводом 5.2. Структурно-параметричний синтез системи керування 5.3. Розрахунок параметрів регуляторів і зворотних зв'язків	5	22.05.23	
6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи (шляхом моделювання). Аналіз результатів	10	25.05.23	
7.Спецчастина. Автоматизація електроприводу лебідки	5	31.05.23	
8.Розробка (опис) схеми керування	5	5.06.23	
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації		10.06.23	
Разом	70-90		

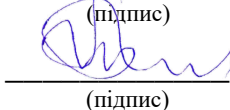
Студент



(підпис)

Вадим КИПИЧЕНКО

Керівник проекту



(підпис)

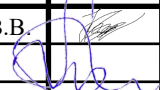

Віталій ТЕРЯЄВ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на 80 сторінках та вміщує 33 рисунків, 12 таблиць та 3 плакати А1.

В дипломному проекті проведено аналітичний огляд в сфері електроприводів спуско-підйомного комплексу бурових установок; виходячи з поставленої задачі електроприводу обрано досліджувану бурову лебідку. На основі розрахованих параметрів механічної частини електроприводу здійснено вибір асинхронного короткозамкненого двигуна, частотного перетворювача та іншого силового обладнання. Розглянуті рівняння асинхронного двигуна в різних системах координат та розраховані параметри його схеми заміщення. Проведено дослідження системи електроприводу методом математичного моделювання, в тому числі при дослідах з навантаженням та рекуперацією енергії. За спроектованим алгоритмом керування електроприводом бурової установки складено програму роботи програмованого логічного контролера, що дозволяє автоматизувати систему електроприводу лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ,
АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ЛЕБІДКА, БУРОВА
УСТАНОВКА, РОЗРОБКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА,
МОДЕЛЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОНТРОЛЕР

					<i>141.0003.030.БР</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизований електропривод лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки Реферат	Літ.	Лист	Акрушів
Розроб.		Кипиченко В.В.					7	80
Перевір.		Теряєв В.І						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Ковбаса С.М.			НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, ФЕА, гр. ЕП-п01			

SUMMARY

The diploma project is 80 pages and includes 33 figures, 12 tables and 3 A1 posters.

In the diploma project, an analytical review was carried out in the field of existing drilling rigs, namely the drilling rig lifting complex, and the studied drilling winch was selected based on the task of the electric drive. On the basis of the calculated parameters of the mechanical part of the electric drive, an asynchronous squirrel-cage motor, a frequency converter, and other power equipment were selected. The equations of the induction motor in different coordinate systems are considered and its parameters of the substitution scheme are calculated. The results of the study of the electric drive system by the method of mathematical modelling in experiments with load and energy recovery are obtained. Based on the designed algorithm for controlling the electric drive of the drilling rig, a program for the programmable logic controller was developed, which allows automating the electric drive system of the winch of the drilling rig's downhole complex

ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, INDUCTION MOTOR,
VECTOR CONTROL, WINCH, DRILLING RIG, DEVELOPMENT,
AUTOMATION, MATHEMATICAL, MODEL, AUTOMATION,
CONTROLLER

					<i>141.0003.030.БР</i>							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Automated electric drive of the winch of the drilling rig lowering and lifting complex Summary			Літ.	Арк.	Акрушів		
Розроб.		Кипиченко В.В.										
Перевір.		Теряєв В.І.										
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Ковбаса С.М.			НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, ФЕА, гр. ЕП-п01							

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ БУРОВИХ УСТАНОВОК.....	12
1.1 Галузі використання та типові технічні рішення електроприводів бурових установок.....	12
1.2 Опис електроприводу бурової лебідки та системи її автоматизації	19
1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації	24
Висновок по розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЛЕБІДКИ.....	28
Висновок по розділу 2.....	32
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	33
Висновок по розділу 3.....	40
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	41
4.1 Алгоритм непрямого векторного керування АД.....	43
4.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення АД.....	45
Висновок по розділу 4.....	50
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	51
5.1 Дослідження динамічних характеристик в номінальному режимі	52
5.2 Дослідження динамічних характеристик при гальмуванні до нульової швидкості з відпрацюванням моменту.....	56
5.3 Дослідження режиму рекуперації	59
Висновок по розділу 5.....	64
РОЗДІЛ 6 СПЕЦЧАСТИНА. АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛЕБІДКИ	65
Висновок по розділу 6.....	74
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77
ДОДАТОК А	80

ВСТУП

У останні роки все більш популярними стають новітні технології буріння, зокрема похило спрямованих, горизонтальних та багатозабійних свердловин, що використовують гідравлічні вибійні двигуни, такі як турбобури та гвинтові забійні двигуни. Для успішного застосування цих технологій однією з ключових вимог є використання бурових установок з регульованим приводом основних виконавчих механізмів, зокрема спуско-підйомного комплексу. Це вимагає застосування точних методик розрахунку при виборі обладнання, оптимізації режимів його роботи та управління.

Розробка сучасних систем в сфері бурового обладнання є вкрай актуальною, оскільки Україна має значні запаси нафти та газу на східному та південному нафтогазоносних регіонах, налагоджений видобуток яких міг би забезпечити її відповідними енергоресурсами на десятки років. В цілому галузь бурових установок є необхідною для розвитку нафтогазового сектора країни, підвищення його конкурентоспроможності та забезпечення енергетичної безпеки. Дослідження у галузі бурових установок дозволяють вдосконалювати технології та процеси буріння, сприяючи підвищенню ефективності видобутку нафти та газу. Це дозволяє зменшити витрати на видобуток, збільшити витяг та максимізувати використання наявних ресурсів.

Метою даного проекту є модернізація приводу лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки шляхом впровадження регульованого асинхронного електроприводу. Оскільки він дозволяє забезпечити високу точність та контроль над процесами буріння. Сучасні системи стеження оснащені системами автоматичного регулювання та керування, що дозволяє досягати більш точних і передбачуваних результатів. Це особливо важливо в складних геологічних умовах та при виконанні спеціалізованих буріннь, таких як горизонтальне буріння. Застосування силової електроніки в системах електроприводу характеризується високою енергоефективністю, що дозволяє знизити споживання електроенергії. Це

важливо з точки зору оптимізації енергетичних витрат та зниження впливу на навколишнє середовище, а також може призвести до зменшення вартості буріння експедиційних та добувних скважин.

Сучасні системи електроприводу зазвичай потребують менше обслуговування та мають більш тривалий термін служби. Це дозволяє знизити витрати на їх підтримку та ремонт. Використання таких систем допомагає нафтодобувним компаніям виконувати регуляторні вимоги та стандарти, що є важливим фактором для отримання сертифікацій та дозволів на експлуатацію.

Узагальнюючи, використання сучасних систем електроприводу в бурових установках та модернізація старих установок є важливим для досягнення високої продуктивності, енергоефективності, безпеки та конкурентоспроможності в нафтогазовій галузі.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ БУРОВИХ УСТАНОВОК

1.1 Галузі використання та типові технічні рішення електроприводів бурових установок

Нафта та газ є одними з найбільш цінних природних ресурсів, які забезпечують необхідну енергію для розвитку глобальної економіки та побутових потреб населення. Щоб ефективно видобувати ці ресурси, необхідно використовувати спеціальні технології та обладнання. Бурові установки для видобутку нафти та газу є ключовими елементами нафтогазової промисловості.

У процесі розвитку нафтогазової галузі постійно з'являються нові технології та удосконалюються існуючі методи видобутку. Проте, основні елементи обладнання, такі як бурові установки, залишаються незмінними. Бурові установки для видобутку нафти та газу є складними механізмами, які вимагають високого рівня технічного знання та професійної кваліфікації персоналу [1].

За призначенням такі установки використовуються для:

- розробки свердловин для видобутку газу, нафти та супутніх компонентів;
- формування розвідувальних свердловин для підтвердження наявності нафти та отримання остаточних даних про запаси та розташування нафти для подальшої розробки;
- буріння оціночних свердловин для аналізу та прогнозування поведінки нафтових пластів, можливого зсуву земної кори та оцінки обсягів родовищ газу та нафти;
- пророблення свердловин для постійного контролю тиску на території видобутку корисних копалин;

– буріння отворів для спостереження та визначення обсягів викачаної та залишкової нафти, а також для оцінки змішування води, нафти, газу один з одним.

Залежно від типу виконуваних робіт, машини для буріння свердловин можна розподілити на наступні категорії:

– експлуатаційні машини. Їх використовують на етапі розвідки родовища і їх основна мета полягає в заборі проб ґрунту для отримання більш детальної інформації про геологію;

– розвідувальні машини. Таку техніку використовують для збору проб ґрунту з родовища з метою визначення значення промислового об'єкта;

– машини, призначені для буріння технічних свердловин, що знаходять широке застосування в будівельній галузі для створення отворів, необхідних для будівництва різних типів споруд і фундаментів. Ця категорія машин також включає бурові установки, що застосовуються в галузі нафти і газу.

Класифікація за методом буріння:

– машини для обертального буріння використовуються для створення отвору та руйнування ґрунту або породи шляхом обертання спеціального інструменту, що щільно прилягає до дна свердловини. Долото або посилена коронка можуть використовуватись як породоруйнівний пристрій. Цей метод зазвичай застосовується для буріння неглибоких свердловин;

– установки з вібраційним бурінням використовують колонну та бурильну трубу, яка передає вібраційне навантаження. Основним елементом є віброзонд, а поверхневий пристрій слугує генератором вібрації. Цей метод підходить для буріння порід, які піддаються фізичному ущільненню;

– техніка розрядно-імпульсного буріння впливає на ґрунт електричними розрядами і може застосовуватися для глибокого ущільнення порід;

– машини для обертально-ударного буріння використовуються для пророблення отвору та руйнування ґрунту або породи за допомогою ударів по постійно обертаючомуся інструменту. Коронка або долото з посиленими вставками можуть використовуватися як породоруйнівний інструмент. Цей метод зазвичай використовується для свердловин глибиною до 2000 метрів. Техніка ударного буріння може використовувати падаючий снаряд або удари по встановленому в забої снаряду;

– техніка вогнеструминного буріння руйнує породу та проробляє свердловину за допомогою газових струменів високих температур. Цей метод застосовується для ґрунту і порід з кристалічною основою.

Класифікація скважин за глибиною:

- неглибокі – до 600 метрів;
- середньої глибини – до 6000 метрів;
- глибокі – більше 6000 метрів.

За способом пересування бурові установки бувають:

- самохідні. Установка має моторну раму та кабіну, що базуються на транспортному засобі з великою вантажопідйомністю;
- пересувні або мобільні бурові установки. Модульна структура установки забезпечена індивідуальною мобільною базою;
- стаціонарні. Установка має блокову систему, яка включає в себе елементи для монтажу та посиленних опор.

Бурова установка - це комплекс споруд та бурового обладнання, призначених для буріння свердловин обертальним способом. Завдяки їй здійснюються всі операції, пов'язані з процесом буріння. Склад комплексу установки, габаритні розміри, маса, спосіб транспортування і монтажу залежать від призначення і проектної глибини свердловини, способу руйнування породи, видів приводів і низки інших чинників, зокрема кліматичних і дорожніх. Для прикладу на рис. 1.1 показано загальний вигляд типової бурової установки [2].

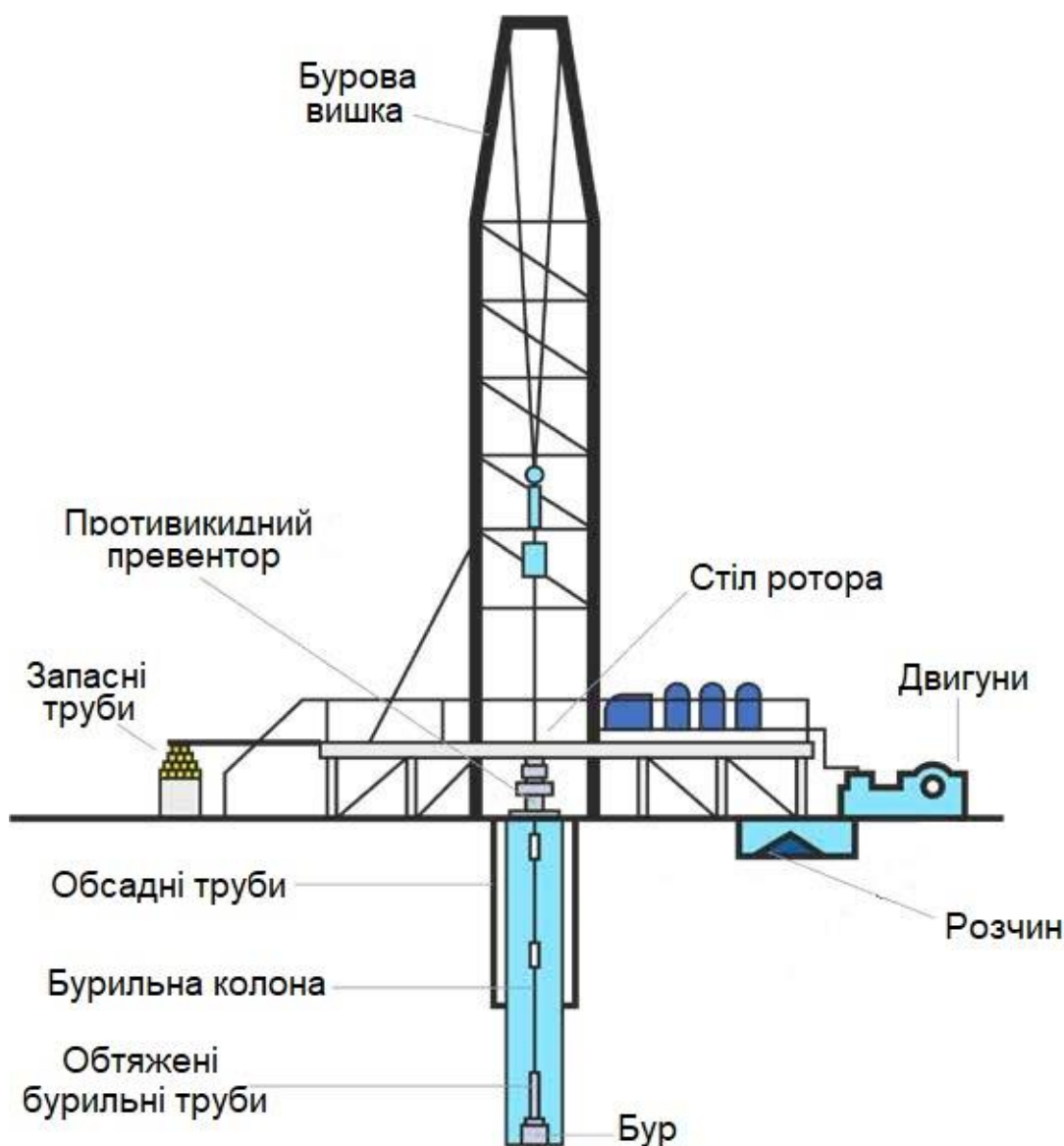


Рисунок 1.1 – Загальний вид типової бурової установки

Бурова вишка - це споруда з металевої конструкції, яка розташована над гирлом свердловини і служить для встановлення талевого механізму, механізації процесу спуско-підйому та розміщення бурильних свічок. Якість бурової вишки має значний вплив на монтаж та транспортабельність бурової установки, а також на ефективність та безпеку буріння. Надійність та міцність є найважливішими вимогами до бурових вишок, оскільки можливість їх відмови може мати серйозні наслідки.

Талева система виконує роль вантажонесучої частини бурової установки та складається з кронблока та талевого блока, які з'єднані сталевим канатом. Талевий блок має гак або автоматичний елеватор, який використовується для

підвішування бурильної колони та обсадних труб. Робочі струни каната розподіляють навантаження підвішеного вантажу. Ця система дозволяє зменшити зусилля в канаті, яке виникає від ваги вантажу під час підйому.

Для вводу бурового розчину в обертову бурильну колону використовується вертлюг. Під час процесу буріння його підвішують до автоматичного елеватора або гака талевого механізму і з'єднують з напірним трубопроводом бурових насосів за допомогою гнучкого шланга.

Буровий ротор, що є головним обладнанням для роторного буріння, використовується для обертання бурильної колони і утримання її над гирлом свердловини під час нарощування та спусково-підйомних операцій. Його привод здійснюється за допомогою ланцюгових, карданних і зубчастих передач, які підключаються до бурової лебідки, коробки передач або індивідуального двигуна.

Бурові насоси необхідні для забезпечення циркуляції бурових розчинів під час буріння свердловин. Це включає нагнітання бурового розчину в свердловину, утримання вибуреної породи в підвішеному стані, очищення стовбура шахти і вибою від шламу, а також охолодження долота в процесі буріння.

Противикидне обладнання має за мету запобігти відкритим викидам рідини або газорідинних сумішей та фонтанів, що можуть виникнути під час буріння, випробування, тестування і освоєння свердловини. Ці явища зазвичай виникають через перевищення пластового тиску над тиском промивної рідини, яка заповнює свердловину. Противикидне обладнання включає в себе такі компоненти, як превентори, гирлова хрестовина, надпревенторна котушка, роз'ємний жолоб, маніфольди та станції управління.

Бурова лебідка застосовується для опускання, піднімання та утримання в підвішеному стані бурильної колони, обсадних труб та іншого інструменту під час процесу буріння та закріплення свердловини. При підйомі, обертальний рух, переданий лебідці від приводу, перетворюється на прямолінійний рух за допомогою блока і каната. При спуску гальмівні

пристрої контролюють швидкість опускання блока, який опускається під впливом власної ваги та вантажу, що знаходиться на ньому. Бурові лебідки також використовуються для передачі обертання ротору, зтягування та відкручування бурильних і обсадних труб, підйому та натягування різних вантажів під час буріння свердловин, монтажу та ремонту установок.

У залежності від призначення та потужності, бурові установки обладнуються різними машинами та механізмами. Кожен механізм має свій власний привід, який складається з двигуна, передаточного пристрою та системи керування. Приводи бурової лебідки, насосів та ротора є особливо важливими. Серед найпоширеніших варіантів приводу зустрічаються дизельні, дизель-гідролічні та електричні приводи.

Раніше в установках для буріння на глибинах 2500 м і більше, а також на деякій частині бурових установок для буріння на глибину до 1600 м, основним видом регульованого електроприводу, що відповідав вимогам технологічного процесу буріння, був електропривод постійного струму за системою тиристорний перетворювач - двигун (ТП-Д). Ця система електроприводу забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості, а при потребі цей діапазон може бути розширений шляхом ослаблення магнітного потоку двигуна. Проте це напряму зменшує допустимий момент навантаження, також слід зауважити що тиристорні перетворювачі мають свої недоліки, такі як спотворення форми напруги в мережі живлення та зниження коефіцієнта потужності при зменшенні швидкості нижче номінального рівня під час регулювання.

Також існують рішення з використанням реостатного регулювання асинхронних двигунів з фазним ротором шляхом введення резисторів в коло ротора. Основний недолік такого способу - втрати енергії, пропорційні ковзанню, що є суттєвим, враховуючи потужність підйомних установок, яка досягає 300 - 1000 кВт. Тому цей спосіб не є пріоритетним і застосовувався по причині відсутності можливості якісного регулювання швидкості короткозамкнених асинхронних двигунів.

Сьогодні провідні електротехнічні компанії пропонують регульовані електроприводи, які комплектуються гнучко-програмованими системами автоматизації, що можуть бути адаптовані до різноманітних сфер застосування. Для регулювання швидкості електродвигунів у широкому діапазоні використовуються напівпровідникові перетворювачі, що базуються на силових напівпровідникових модулях. Для електроприводів за системою перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД) використовуються модулі IGBT до потужності 1 МВт, модулі GTO або IGCT - для потужностей понад 1 МВт. Ці електроприводи широко застосовуються в різних галузях промисловості, включаючи виконавчі механізми бурових установок для наземного і морського буріння.

Система ПЧ-АД має ряд переваг в порівнянні з системою ТП-Д:

- можливість використання векторних алгоритмів керування швидкістю та моментом;
- зменшення ваги та розмірів електрообладнання;
- простіше вирішується проблема забезпечення вибухозахисту електродвигуна;
- досягається вища точність при регулюванні швидкості;
- пряме керування моментом дозволяє досягати необхідних показників якості функціонування електропривода в динамічних режимах;
- можливість скорочення числа механічних передач лебідки, а відповідно покращення її надійності
- динамічні навантаження на передавальний механізм зменшуються, оскільки момент інерції ротора асинхронного короткозамкненого двигуна значно менший за момент інерції ротора двигуна постійного струму;
- забезпечення сполучення локальних систем автоматики з системою управління верхнього рівня стає простішим;
- підвищується надійність та довговічність електропривода, який працює у важких умовах експлуатації.

Окремо слід вказати на зменшення енергетичних втрат, за рахунок можливості рекуперації електроенергії в мережу. Ця властивість має бути ефективно використана в електроприводі бурової лебідки під час спуску інструменту на вибій.

1.2 Опис електроприводу бурової лебідки та системи її автоматизації

Спусково-підйомний комплекс (СПК) бурової установки складається з різноманітних механізмів, устаткування, систем управління та будівельних споруд, які призначені для здійснення таких операцій, як спуск, підйом та утримання у висячому положенні бурильної колони та обсадних колон [3]. Також для виконання необхідних технологічних маніпуляцій з цими елементами під час процесу буріння свердловини, використовується для таких видів робіт:

- заміна зношеного породоруйнівного інструменту шляхом підйому та спуску бурильної колони. Навантаження на СПК при цьому не перевищує номінальну вантажопідйомність бурової установки.

- часткове зменшення навантаження на бурильну колону під час буріння шляхом подавання бурильного інструменту зі швидкістю, що відповідає швидкості руйнування гірської породи на вибої. Навантаження на СПК менше ваги бурильної колони на величину, що дорівнює навантаженню на долото.

- переміщення бурильної колони в свердловині для видалення затягувань інструменту під час обробки ствола свердловини, а також під час підготовки свердловини для спуску обсадних колон. Навантаження на СПК майже рівне вазі бурильної колони.

- виконання додаткових технологічних та аварійних робіт, пов'язаних з підйомом, спуском та переміщенням обсадних колон, ліквідацією прихватів інструменту та колон у свердловині, роботою у викривлених і горизонтальних ділянках стовбура свердловини. Навантаження на СПК при

цьому перевищує вагу бурильної колони і може наблизитися до максимальної вантажопідйомності СПК.

В ході виконання даного проекту досліджується СПК бурової лебідки, кінематична схема якої наведена на рис.1.2.

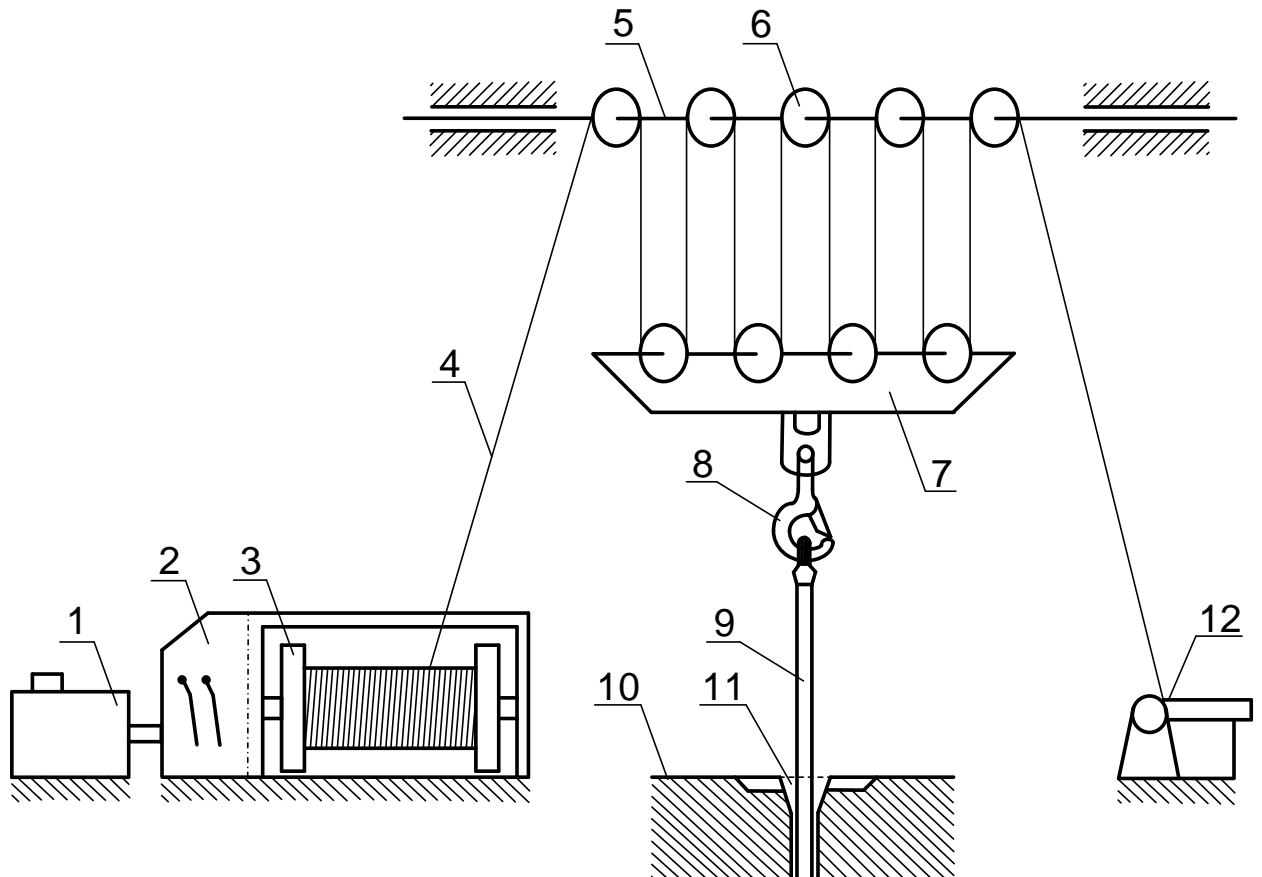


Рисунок 1.2 – Структурна схема спуско-підйомного комплексу бурової установки. 1 – двигун; 2 – коробка перемикання передач; 3 – лебідка; 4 – талевий трос; 5 – кронблок; 6 – шків талевої системи, 7 – талевий блок; 8 – гак талевого блоку; 9 – бурова колона; 10 – стіл ротора; 11 – гирло свердловини ; 12 – механізм кріплення нерухомої гілки троса

Основним компонентом спуско-підйомного комплексу бурової установки є бурова лебідка, яка виконує різні функції, пов'язані з підйомом і спуском різних елементів [4]. Головним завданням лебідки є створення потрібного тягового або гальмівного зусилля у тросі, що є основним рухомих елементом. Вона використовується для підняття та спуску бурильної колони, невантаженого елеватора, обсадних колон, утримання нерухомої колони у висячому положенні або для повільного опускання її при бурінні або розширенні свердловини. Додатково, вал котушковий і пневморозчеплювач

часто застосовується для згвинчування і розгвинчування з'єднань обсадних і бурильних труб. Лебідка також може бути використана для підтягування і підйому труб та інших вантажів, а також для монтажу вишок для буріння і обладнання на них.

Бурові лебідки можна монтувати або на рівні підлоги, або під нею, і кожен з цих способів має свої переваги та недоліки. Якщо лебідка монтується над підлогою бурової, то забезпечується вільний доступ до всіх вузлів для їхнього обслуговування та ремонту, і не потрібно монтувати допоміжну лебідку для доступу до котушкового валу. Крім того, конструктивно привод від лебідки до ротора спрощується. З іншого боку, якщо лебідка монтується під підлогою бурової, то значно зменшується висота і маса блокової основи, що спрощує монтаж і демонтаж, а також допомагає скоротити терміни будівництва бурових.

Бурова лебідка складається з міцної звареної металевої рами, яка виступає основною основою, на якій розташовані ключові компоненти. Ці компоненти включають підйомний вал з барабаном для намотування талевого каната, котушковий вал і трансмісійний вал. Всі ці вали мають кінематичну зв'язку між собою, що досягається за допомогою ланцюгових передач. Це дозволяє передавати крутний момент від коробки передач і регулювати швидкість обертання валів залежно від потреби. Лебідки також мають кінематичне з'єднання з коробками передач і приводними двигунами, яке здійснюється за допомогою ланцюгових або карданних передач.

Бурильна колона вимагає значної потужності для підняття, тоді як для спуску використовується її власна вага. Тому, щоб поглинути енергію спуску, лебідки повинні мати потужний привод та надійну гальмівну систему. Протягом підйому колони її вага зменшується, що дозволяє зменшити витрати потужності. Щоб збільшити навантаження на двигуни, рекомендується збільшувати швидкість підйому колони. Тому, щоб забезпечити ефективне використання потужності приводу, лебідки повинні мати багатошвидкісний або регульований електропривод.

Для підйому елеватора без навантаження лебідка повинна мати окрему підвищену швидкість. Швидкість підйому "на холостому ході" повинна бути легко та плавно регульована, що можливо забезпечити встановленням подвійної ланцюгової передачі для приводу підйимального валу. Перемикання на підвищену швидкість повинно відбуватися швидко і безперебійно, що досягається за допомогою фрикційних муфт, якими керують за допомогою пульта бурильника. При підйомі колони зі змінною масою, швидкості в коробці передач періодично перемикаються.

Основні вимоги до бурових лебідок залежно від їхнього призначення та умов експлуатації можна сформулювати наступним чином:

- кінематична схема бурової лебідки та регулювання швидкостей механізмів повинні бути такими, щоб забезпечувати оптимальне використання потужності приводу та досягати високого коефіцієнта корисної дії для всього агрегату в цілому;
- для підйому елеватора, що не є навантаженим, в кожній лебідці необхідно передбачити можливість вмикання підвищеної швидкості на підйомному валу, щоб забезпечити ефективну роботу при піднятті легкого навантаження;
- конструкція бурової лебідки повинна бути такою, що забезпечує безперебійну роботу до моменту капітального ремонту або випуску з експлуатації. Вона також повинна мінімізувати час, необхідний для монтажу та демонтажу, а також мати надійний захист агрегату;
- конструкція лебідки повинна дозволяти здійснювати дрібний поточний ремонт навіть в умовах активного буріння;
- гальмівна система має бути надійною, і кожен бурову лебідку слід оснащувати подвійною гальмівною системою для забезпечення додаткової безпеки та запобігання можливим аварійним ситуаціям;
- кінематична схема бурової лебідки повинна передбачати передачу руху на механізм подачі долота і ротор, щоб забезпечити відповідні функції під час буріння.

Виходячи з завдання було обрано бурову лебідку, кінематична схема якої наведена на рис. 1.3.

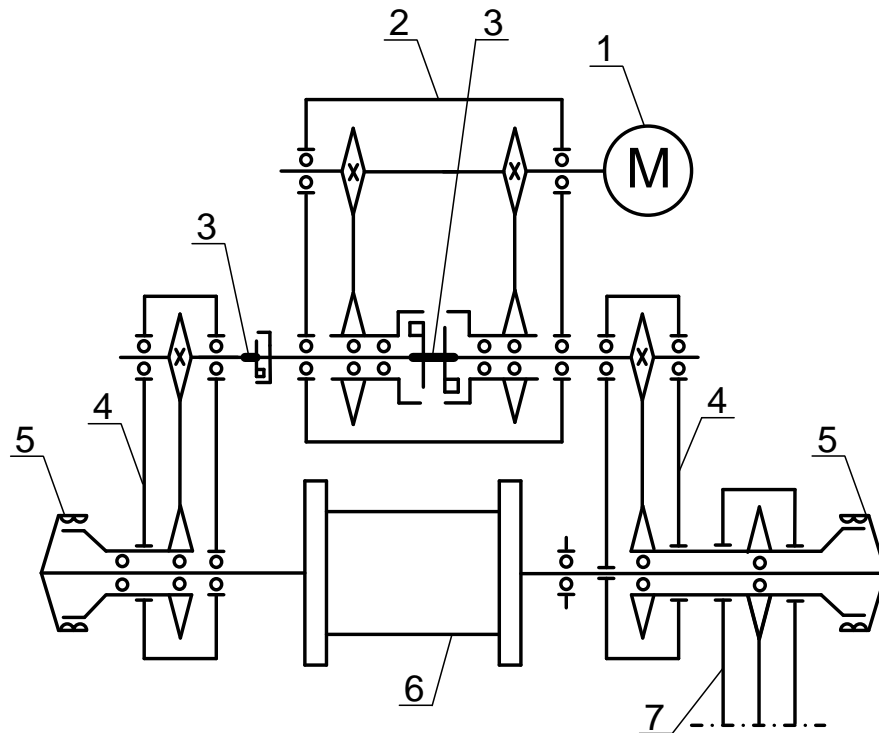


Рисунок 1.3 – Спрощена кінематична схема лебідки ЛБУ-600. 1 – двигун; 2 – коробка перемикачів передач; 3 – зубчаста муфта; 4 – ланцюгова передача; 5 – шинно-пневматична муфта; 6 – барабан лебідки

У цієї лебідки для передачі обертання на барабан і котушковий вал застосовано зубчастий редуктор, який приводить у дію і трансмісію ротора. Передача моменту з редуктора на лебідку здійснюється двома карданними валами.

Перемикачі швидкостей і ввімкнення прямого і зворотного ходу розташовані безпосередньо в коробці швидкостей. Для забезпечення оперативного управління швидкістю підйому і спуску гака, так само, як і в одновальній лебідці, використовують дві фрикційні пневматичні муфти якими вмикають "тиху" швидкість - одну з чотирьох заздалегідь встановлених у КПП, інша ж муфта перемикає прямий або зворотний хід зі "швидкою" швидкістю.

Перемикач швидкостей зосереджене безпосередньо в коробці швидкостей, а ввімкнення шинно-пневматичних муфт, кулачкової муфти і фрикційної котушки - на пульті бурильника.

1.3 Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації

Вимоги до електроприводу бурової установки дуже важливі, оскільки вони визначають правильне функціонування установки і забезпечують високу продуктивність та безпеку працівників [5].

Недостатньо потужний електропривод може призвести до зниження продуктивності та небезпечних ситуацій. Наприклад, якщо бурова головка недостатньо потужна, щоб здійснювати буріння на певній глибині, то це може привести до затримок у роботі та погіршення якості роботи.

Також недостатня безпека електроприводу може призвести до небезпечних ситуацій для працівників, наприклад, до пожежі чи виходу з ладу механічних частин, які є рухомими. Тому дотримання вимог щодо захисту та безпеки праці є критично важливим.

Крім того, виконання вимог до електроприводу забезпечує довготривалу роботу обладнання, оскільки правильно підібраний електропривод дозволяє зменшити знос та підвищити ефективність роботи установки.

Сформулюємо загальні вимоги до електроприводу, як до системи, що забезпечує кероване електромеханічне перетворення енергії. Визначимо основні показники, що характеризують ефективність електроприводу.

Ефективність: ефективність для електродвигуна вимірюється відношенням електричної потужності, що споживається електродвигуном, до корисної механічної потужності, що віддається лебідці. Висока ефективність забезпечує економію електроенергії та зменшення навантаження на систему живлення.

Надійність: надійність електродвигуна повинна бути достатньою для забезпечення безперебійної роботи протягом тривалого періоду часу. Надійність може бути забезпечена за допомогою вибору надійних компонентів, добре продуманої конструкції та належного обслуговування.

Приймаємо стандартні показники: термін експлуатації – 10 років, напрацювання на відмову – 5000 год.

Монтаж та обслуговування: Система електроприводу повинна мати належну конструкцію для легкого монтажу та обслуговування. Це дозволяє легко встановити та замінити компоненти що вийшли з ладу у разі потреби.

Економічність: Електродвигун повинен мати мінімальну вартість та бути економічним у експлуатації, що дозволить зменшити витрати на обслуговування, енергоспоживання та збільшити економічну доцільність застосування даної системи електроприводу в порівнянні з аналогами.

Відповідність стандартам: Електродвигун повинен відповідати вимогам національних та міжнародних стандартів з електробезпеки та енергоефективності, що дозволяє забезпечити сумісність додаткового обладнання та запобігти виникненню аварій та надійну роботу лебідки.

Технічні вимоги до приводу бурової лебідки залежать від її призначення та технологічних особливостей, які пов'язані з її роботою в складі спусково-підйомного агрегату. Це означає, що електричний привід бурової лебідки повинен відповідати наступним вимогам:

1. Забезпечувати повторно-короткочасний режим роботи, оскільки колона бурильних труб переміщується дискретно на довжину однієї свічки;
2. Працювати від мережі 660 В, що використовується для роботи двигунів призначених для гірничої промисловості, на металургічних підприємствах, та інших галузей важкої промисловості
3. Регулювати швидкість при зміні кількості свічок у колоні бурильних труб за умови постійної потужності;
4. Мати широкий діапазон регулювання швидкості близько 20:1, де максимальна швидкість у 20 разів більша за мінімальну. Стала швидкість колони номінальної маси визначається з умови відбору від двигуна номінальної потужності і дорівнює 0.3 - 0.5 м/с.

5. Обмежувати швидкість переміщення колони бурильних труб залежно від її маси. Під час спуску колони двигун працює в режимі рекуперації, використовуючи власну масу колони для її переміщення;

6. Для підвищення продуктивності підйомно-спускних операцій при невеликих навантаженнях, необхідно, щоб двигун мав систему реверсування, або ж реверс має забезпечуватись конструкцією лебідки;

7. Електричний привод має бути реверсивним;

8. Система електричного приводу повинна забезпечувати перевантаження в межах 1,8 - 2,2 від номінального моменту, щоб забезпечити інтенсивне прискорення;

9. Механічні характеристики повинні мати достатню жорсткість, щоб статичне зниження швидкості не перевищувало 5 - 8% від номінальної швидкості; при цьому повинна бути забезпечена можливість різкого зниження жорсткості при роботі “на упор”;

10. Система електричного приводу повинна забезпечувати зупинку гака талевої системи з точністю 30-40 мм, щоб уникнути ударів свічки об колону бурильних труб і правильного позиціонування ключа, який згвинчує і розгвинчує колону.

11. Система електропривода повинна мати всі необхідні захисти такі як струмові захисти, захисти від перенапруг, температур, перевантажень, перенатягів в тросах талевої системи та інші. Також всі важливі вузли вихід з ладу яких призведе до поломки устаткування, порушенню процесу, загрози життя працівників та навколишнього середовища, мають дублюватися, або мати значний коефіцієнт запасу.

Висновок по розділу 1

1. В даному розділі представлено аналітичний огляд бурових установок, розглянуто основні види установок та їх систем електроприводу, а також класифіковано їх за різними критеріями.

2. Розглянуто кінематичну схему досліджуваної бурової лебідки та принцип її роботи, що дозволить реалізувати систему електроприводу спуско-підйомного комплексу бурової установки.

3. Визначено основні вимоги та особливості електроприводу бурової лебідки, які слід враховувати при виборі силових компонентів системи електроприводу. Обґрунтовано застосування регульованого електроприводу змінного струму.

РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЛЕБІДКИ

Швидкість, з якою талевий канат намотується та звивається на барабані лебідки, змінюється в залежності від потрібної швидкості руху гака та кількості струн у талевій системі. Під час підйому бурильної колони, швидкість руху гака зазвичай становить 0,3 - 0,5 м/с, тоді як для ненавантаженого елеватора ця швидкість може досягати 1,7 - 2 м/с. Використання вищих швидкостей підйому не призводить до істотних збільшень продуктивності, а тільки погіршує умови намотування каната на барабан лебідки. Відповідно при спуску швидкість бурильної колони зазвичай не перевищує 3 м/с, а для спуску обсадних колон швидкість може знижуватися до 0,2 м/с [6].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики бурової лебідки ЛБУ-600-ЕТ

Найменування параметрів	ЛБУ-600-ЕТ
Максимальна вантажопідйомність, т	160
Діаметр талевого каната, мм	28
Оснащення	4x5
Число швидкостей обертання підйомного вала	2
Розміри підйомного барабана, мм	
діаметр	500
довжина	1190
Розмір гальмівного шківів, мм	
діаметр	730
ширина	250
Габаритні розміри, мм	
довжина	3320
ширина	2935
висота	2155
Маса, кг	19930

Розрахунок передаточного числа талевого механізму (кратність поліспасти):

$$i_{тс} = \frac{v_{\delta}}{v_{\Gamma}} = 2n = 2 \cdot 4 = 8. \quad (2.1)$$

де v_{δ} – лінійна швидкість тягової струни, що намотується на барабан, v_r – швидкість гака, n – число шківів талевого блоку.

Розрахунок коефіцієнта корисної дії талевого механізму здійснюється за формулою [7]

$$\eta_{tc} = \frac{\beta^{2n} - 1}{2n\beta^{2n}(\beta - 1)} = \frac{1.02^{2 \cdot 4} - 1}{2 \cdot 4 \cdot 1.02^{2 \cdot 4} (1.02 - 1)} = 0.9. \quad (2.2)$$

де $\beta = 1/\eta$ – коефіцієнт опору обертанню шківів;

$\eta = 0.98$ – відповідно ККД шківів.

Величину статичного моменту на валу барабана при підйомі бурильної колони визначаємо, як:

$$M_{\delta} = \frac{k_{зан} \cdot G \cdot D_{\delta}}{2 \cdot i_{tc} \cdot \eta_{tc} \cdot \eta_t} = \frac{0.85 \cdot 1569.06 \cdot 0.5}{2 \cdot 8 \cdot 0.9 \cdot 0.85} = 54.481, \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (2.3)$$

де $k_{зан} = 0.85$ – коефіцієнт втрати маси при зануренні колони в буровий розчин;

G – номінальна маса колони в повітрі, кН;

D_{δ} – діаметр барабана бурової лебідки, м;

i_{tc}, η_{tc} – передаточне число та ККД талевої системи;

$\eta_t = 0.85$ – коефіцієнт що враховує тертя між колоною та стінками свердловини.

Кутова швидкість обертання барабана пов'язана зі швидкістю бурильної колони відношенням:

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot v_{уст} \cdot i_{tc}}{D_{\delta}} = \frac{2 \cdot 0.3 \cdot 8}{0.5} = 9.6, \text{ рад / с}, \quad (2.4)$$

де $v_{уст}$ – усталена швидкість підйому бурильної колони.

Приведена швидкість та момент до валу:

$$\omega_c = \omega_{\delta} \cdot i_p = 9.6 \cdot 16 = 153.6, \text{ рад / с}; \quad (2.5)$$

$$M_c = \frac{M_{\delta}}{i_p \cdot \eta_p} = \frac{54.481}{16 \cdot 0.97} = 3.51, \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (2.6)$$

Для аналізу руху механічних частин спуско-підйомного комплексу бурової установки складемо розрахункову механічну схему, в якій враховуємо моменти інерції та моменти навантаження обертових елементів, маси та діючі сили елементів, що рухаються поступально, а також замінюємо реальні значення механічних зв'язків на еквівалентні величини, які приводяться до однієї розрахункової швидкості. Приведення виконується до швидкості валу двигуна.

Момент інерції барабана отримаємо з формули моменту інерції для пустотілого циліндра:

$$J_6 = \frac{\pi \rho h}{2} (R_2^2 - R_1^2) (R_2^2 + R_1^2) =$$

$$= \frac{3.14 \cdot 7800 \cdot 1.19}{2} (0.25^2 - 0.22^2) (0.25^2 + 0.22^2) = 22.8, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.7)$$

Приведене значення моменту інерції барабана отримаємо як:

$$J'_6 = \frac{J_6}{i_p^2} = \frac{22.8}{16^2} = 0.089, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.8)$$

Приведене значення моменту інерції бурильної колони:

$$J'_k = m \cdot (\rho)^2 = 160000 \cdot (0.00195)^2 = 0.61, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.9)$$

де ρ – радіус інерції, розраховується за наступною формулою:

$$\rho = \frac{v_{уст}}{\omega_c} = \frac{0.3}{153.6} = 0.00195. \quad (2.10)$$

Тоді сумарний момент інерції розрахуємо як:

$$J_\Sigma = J_d + J'_6 + J'_k = 7 + 0.089 + 0.61 = 7.7, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.11)$$

Кутове прискорення визначають за знайденим припустимим лінійним прискоренням, визначившись з часом розгону $t_n = 1\text{с}$:

$$a = \frac{v_{уст}}{t_p} = \frac{0.3}{1} = 0.3, \frac{м}{с^2}; \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = \frac{a}{\rho} = \frac{0.3}{0,00195} = 153.85, с^{-2}. \quad (2.13)$$

Визначаємо динамічний момент при роботі з максимальною кількістю свічок бурової колони:

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon = 7.7 \cdot 153.85 = 1185, Н \cdot м. \quad (2.14)$$

Моменти двигуна для періодів розгону та гальмування:

$$M_p = M_c + M_{дин} = 3510 + 1185 = 4695, Н \cdot м; \quad (2.15)$$

$$M_r = M_c - M_{дин} = 3510 - 1185 = 2325, Н \cdot м. \quad (2.16)$$

Далі будемо навантажувальну діаграму роботи двигуна на рис. 2.1. Час сповільнення приймаємо рівним часу прискорення $t_{п} = t_{сп}$, час руху з усталеною швидкістю отримаємо, виходячи зі значення лінійної швидкості підйому та висоти свічки бурової колони [8] $h_{св} = 9 - 18.5 м$.

$$t_y = \frac{h_{св}}{v_{уст}} = \frac{9}{0.3} = 30 с. \quad (2.17)$$

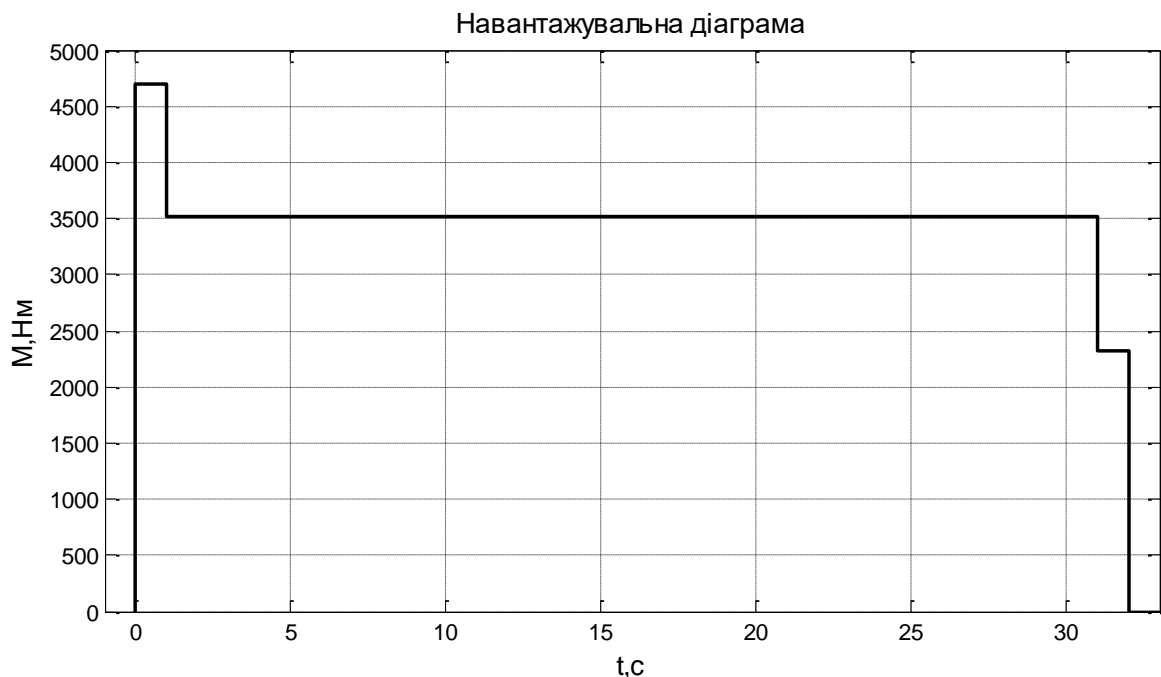


Рисунок 2.1 – Навантажувальна діаграма та тахограма роботи двигуна

За отриманими значеннями моментів розрахуємо еквівалентний момент, що дозволить здійснити вибір та перевірку двигуна за перевантаженням:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \Sigma M_i^2 \cdot t_i}{t_{\Sigma}}} = \sqrt{\frac{4695^2 \cdot 1 + 3510^2 \cdot 30 + 2325^2 \cdot 1}{32 + 40}} = 2348.32 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.18)$$

де $t_{\Sigma} = t_p + t_0$; t_p – час роботи, відповідно t_0 – час паузи (для бурової лебідки приймається 50-75% часу циклу) [9].

Вибираємо потужність двигуна, виходячи з розрахункового значення:

$$P_{\text{роз}} = M_{\text{екв}} \cdot \omega_c = 2348.32 \cdot 153.6 = 360.702, \text{ кВт}. \quad (2.19)$$

Висновок по розділу 2

1. В даному розділі проведено аналіз руху механічних частин спуско-підйомного комплексу бурової установки в статичних і динамічних режимах, на основі чого отримано приведені до валу двигуна значення моменту інерції, статичного моменту та швидкості.

2. Отримані значення статичних та динамічних моментів для побудови навантажувальної діаграми роботи двигуна, що дало можливість розрахувати еквівалентну потужність двигуна котрий буде використовуватись в електроприводі бурової установки.

РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

За розрахованим значенням потужності $P_{\text{роз}} = 360.702$ кВт та швидкості $\omega_c = 153.6$ рад/с обираємо двигун 4АН355М4У3 [10] з номінальною потужністю $P_n = 400$ кВт, щоб він витримував перевантаження. Паспортні дані обраного двигуна наведено в таб. 3.1.

Таблиця 3.1 – Паспортні дані двигуна 4АН355М4У3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 400$ кВт
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 660$ В
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 7$ кг·м ²
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.945$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0.91$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.012$
Критичне ковзання	$s_k = 0.052$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50$ Гц
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$x'_1 = 0.11$
Активний опір статора	$R'_1 = 0.019$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$x''_2 = 0.14$
Приведений активний опір ротора	$R''_2 = 0.013$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$x_u = 5.4$

Перевірка по моменту виконується, якщо:

$$M_{\text{екв}} \leq M_{\text{ном}}; \quad (3.1)$$

$$2348.32 \leq 2577.5; \quad (3.2)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_0 \cdot (1 - s_{\text{ном}})} = \frac{400000}{157.08(1 - 0.012)} = 2577.5, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.3)$$

де ω_0 – синхронна швидкість обертання ротора;

$S_{\text{ном}}$ – значення номінального ковзання.

Відповідно перевірка по перевантажувальній здатності виконується в випадку, коли:

$$M_{\text{max}} \leq M_{\text{ном}} \cdot \lambda = M_{\text{к}}; \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} 4695 &\leq 2577.5 \cdot 2; \\ 4695 &\leq 5155; \end{aligned} \quad (3.5)$$

Як бачимо, обраний двигун проходить за моментом, перевантажувальною здатністю та за потужністю, отже попередній вибір двигуна проведений вірно.

При виборі частотного перетворювача слід звернути увагу на те що при максимальному навантаженні двигун працює з певним перевантаженням значення якого можна отримати як:

$$k_{\text{пер}} = \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}} = \frac{3510}{2577.5} = 1.362. \quad (3.6)$$

Номінальне значення струму статора двигуна отримаємо як:

$$I_{\text{дн}} = \frac{P_{2\text{n}}}{3U_{\text{n}}\eta\cos(\phi)} = \frac{400000}{3 \cdot 380 \cdot 0.945 \cdot 0.91} = 408.02 \text{ А}. \quad (3.7)$$

Тоді розрахункове значення струму інвертора можна отримати як:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{дн}} \cdot k_{\text{пер}} = 408.02 \cdot 1.362 = 555.72 \text{ А}. \quad (3.8)$$

Необхідно обрати перетворювач, який би задовольняв поставлені вимоги щодо потужності та струмового навантаження. Враховуючи технологічний процес, слід обрати надійний перетворювач з запасом та захистом від несприятливих умов, таких як волога, пил, температура та інші.

Відповідно до вимог обрано перетворювач частоти для обраного двигуна серії ACS880 – це лінійка промислових перетворювачів фірми АВВ, які є повністю сумісними між собою і доступні у трьох варіантах: настінному, модульному і шафовому виконанні. Приводи ACS880 спеціально розроблені

для промислових механізмів, які вимагають високу якість і надійність в роботі. Дані перетворювачі мають спеціальні конструктивні особливості, такі як захисне покриття плат і корпус з високим рівнем захисту, що дозволяють їх використовувати в екстремальних умовах. Крім того, кожен привід ACS880 проходить заводські випробування під повним навантаженням для забезпечення максимальної надійності в роботі.

Згідно до каталожних даних здійснюємо вибір перетворювача. З таблиці, наведеної в каталозі, обираємо перетворювач ACS880-17-0580A-7 [11], параметри обраного перетворювача наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні дані перетворювача частоти

Номінальні значення			Робота з малим перенавантаженням		Робота в важкому режимі		Тепловиділення	Типорозмір
I_n , А	I_{max} , А	P_N , кВт	I_{Ld} , А	P_{Ld} , кВт	I_{Hd} , А	P_{Hd} , кВт	Е, Вт	
580	870	560	557	500	434	400	26000	2xR8i

Особливістю даного перетворювача є наявність режиму рекуперації, що дозволяє здійснювати рекуперацію при від'ємному статичному моменті або при циклічному чи неперервному гальмуванні.

Порівняно з механічним або резисторним гальмуванням, за якого гальмівна енергія розсіюється у вигляді тепловиділення, функціонування приводу з рекуперацією дає змогу досягти суттєвої економії витрат на енергоспоживання та охолодження. Дана можливість є вкрай корисною в електроприводі бурової установки оскільки спуско-підйомний характер навантаження дозволяє рекуперувати енергію при спусках, що робить її роботу більш економічною. Типовий вигляд шафи перетворювача наведено на рис 3.1.



Рисунок 3.1 – Типова шафа перетворювачів АВВ серії ACS880

З посібника до експлуатації отримано зведену принципову схему перетворювача рис 3.2

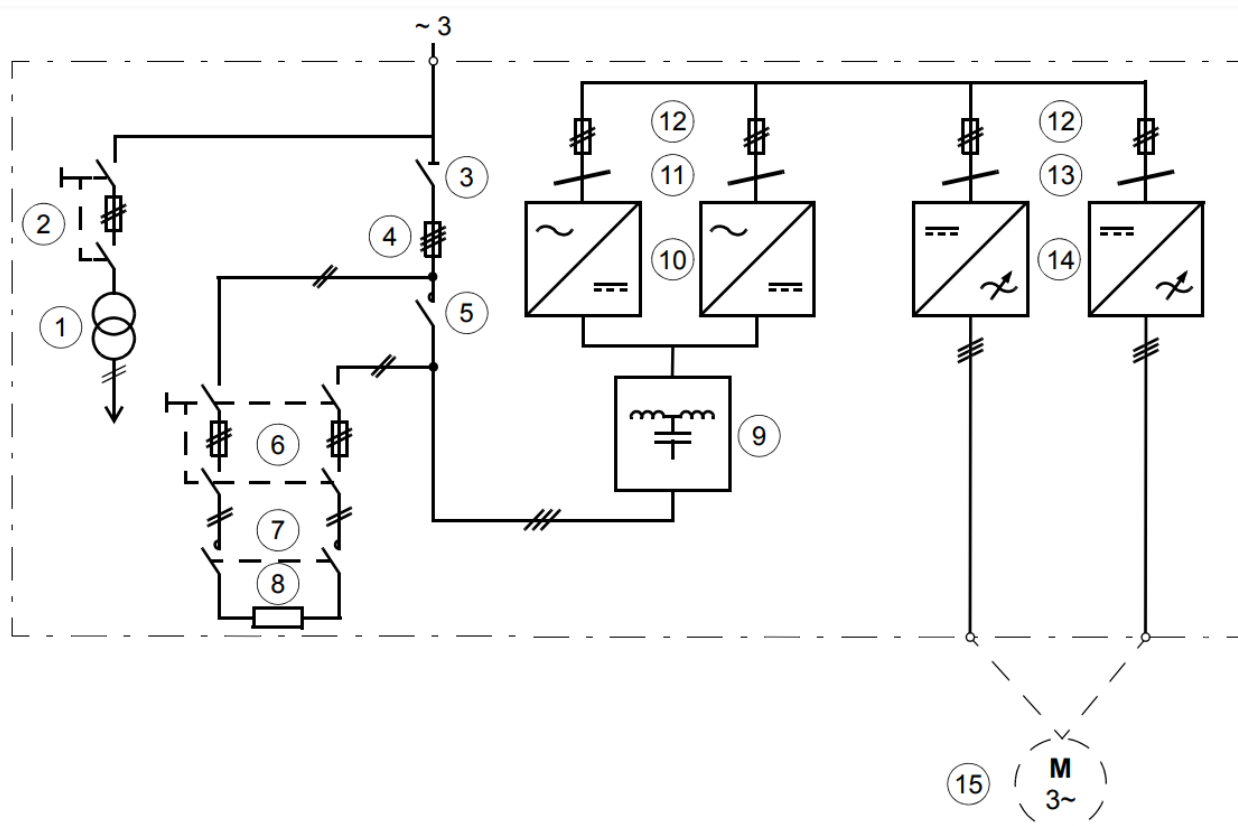


Рисунок 3.2 – Зведена принципова схема перетворювача

На рисунку 3.2 позначені: 1– трансформатор допоміжної напруги ; 2 – вимикач допоміжної напруги; 3 – головний вимикач/роз'єднувач; 4 – запобіжники змінного струму, якщо в приводі є декілька LCL-фільтрів, на вході кожного фільтра встановлюються запобіжники змінного струму; 5 – головний контактор; 6 – запобіжник вимкнення зарядки; 7 – контактор зарядки; 8 – зарядні резистори; 9 – LCL-фільтр; 10 –модуль живлення (випрямляч); 11 – синфазні фільтри на виході кожного випрямляча; 12 – запобіжники постійного струму на виході кожного випрямляча та на вході кожного інверторного блоку; 13 – синфазні фільтри на вході кожного інверторного модуля; 14 – інверторний блок (складається з одного або декількох інверторних модулів); 15 – двигун.

Привод складається з декількох секцій, у яких розташовані шини для підключення живлення і двигуна, від 1 до 6 модулів випрямляча на IGBT-транзисторах, що утворюють перетворювач на стороні мережі, від 1 до 6 інверторних модулів, що утворюють перетворювач на стороні двигуна, і додаткового обладнання. Фактичне компонування секцій залежить від типу приводу та обраного додаткового обладнання.

Можливість рекуперації в цьому перетворювачі забезпечується випрямним блоком що перетворює трифазний змінний струм на постійний, який надходить у проміжну ланку постійного струму приводу, що дає змогу повертати рекуперовану енергію в електромережу живлення.

На малюнку нижче зображено спрощену блок-схему випрямного блоку рис. 3.3. У потужніших приводів випрямні блоки містять кілька модулів живлення, увімкнених паралельно. Для керування випрямним блоком слугує блок керування випрямляча.

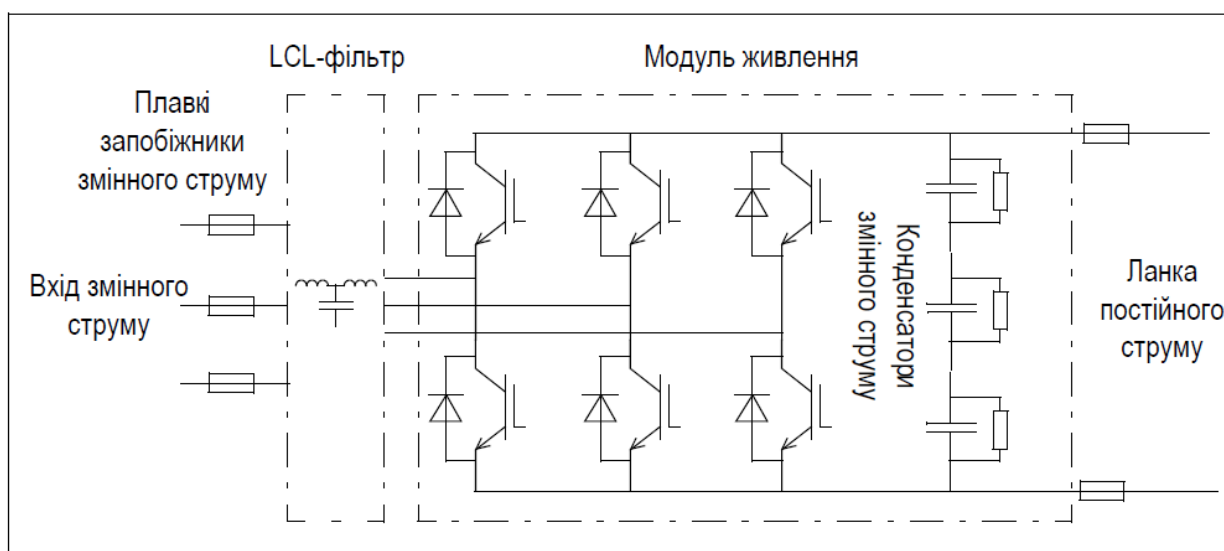


Рисунок 3.3 – Спрощена блок-схема випрямляча

Відповідно до принципової схеми маємо обрати плавкі запобіжники змінного струму, тому скористаємось посібником для монтажу даного перетворювача [12]. Обрано плавкі запобіжники Eaton Bussmann 170M6413 [13], параметри наведено в таб. 3.3, загальний вид запобіжника показано на рис 3.4

Таблиця 3.3 – Параметри плавких запобіжників

Тип приводу ACS880-17-	Кількість	I (A)	U (V)	Справочний тип запобіжника
0580A-7	3	900	690	Bussmann 170M6413



Рисунок 3.4 – Плавкий запобіжник змінного струму Eaton Bussmann 170M6413

Для відключення кола статора двигуна при значеннях струму, вищих за пускові, необхідно обрати автоматичний вимикач.

Номінальні струми автоматичних вимикачів вибираються з метою наближення їх значень до розрахункових значень струму силових колів електроустаткування. Це робиться з метою забезпечення оптимального підбору вимикачів для відповідних силових навантажень. Характеристики відключення автоматичних вимикачів встановлюються з урахуванням того, що короточасні перевантаження, спричинені пусковими струмами, не повинні спричинити їх непередбачене спрацьовування. Також важливо враховувати час відключення в разі виникнення короткого замикання в електричній мережі. За номінальними даними двигуна розрахуємо номінальне значення струму автоматичного вимикача:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 660 \cdot 0,945 \cdot 0,91} = 406,9 \text{ (A)} \quad (3.6)$$

В основному обране обладнання встановлюється на DIN-рейку в щитах, тому слід врахувати температурний коефіцієнт K_T :

$$I_{розч} = I_n / K_T = 406.9 / 0.85 = 478.7 \text{ (A)} \quad (3.6)$$

Відповідно за струмом розчеплювача обираємо автоматичний вимикач АВВ Т5N 630 ТМА 500-5000 3р FF [14] з номінальним струмом 500 А, який призначений для захисту електроустаткування від аварійних режимів, зображення вимикача наведено на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Автоматичний вимикач АВВ Т5N 630 ТМА 500-5000

Параметри обраного вимикача наведено в таб 3.4

Таблиця 3.4 – Параметри вимикача АВВ Т5N 630 ТМА 500-5000

Параметр	Значення
Номінальна робоча напруга	690 В АС, 750 В DC
Номінальний струм	500 А
Номінальна напруга ізоляції	1000 В
Номінально витримуване значення імпульсної напруги	8 кВ
Номінальний неперервний струм	630 А
Кількість полюсів	3
Комутаційна зносостійкість	5000 циклів, 60 циклів/год.
Механічна зносостійкість	20000 циклів, 120 циклів/год.

Висновок по розділу 3

1. Здійснено вибір силового обладнання, яке буде застосовуватись в даному проекті, а саме обрано асинхронний двигун серії 4АН355М4У3 та перевірено його за перевантажувальною здатністю.

2. Виходячи з параметрів двигуна обрано промисловий перетворювач фірми АВВ серії ACS880-17-0580А-7 та інші силові компоненти, які забезпечують керування двигуном та його захист, розглянуто принципову схему перетворювача. Обрані компоненти використовуються при проектуванні схеми електричної принципової електроприводу і системи автоматизації.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

При моделюванні системи керування АД використовується математична модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a-b) [15]:

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

де ω - кутова швидкість ротора;

J – момент інерції двигуна;

$(i_{1a}, i_{1b})^T$ - компоненти вектора струму статора в системі координат (a-b);

$(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ - компоненти вектора потокозчеплення ротора;

$(u_{1a}, u_{1b})^T$ - компоненти вектора напруги статора;

M_c – момент навантаження;

v – коефіцієнт в'язкого тертя.

Константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб:

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

де R_1, R_2 – активні опори обмоток статора і ротора;

L_1, L_2 – індуктивні опори обмоток статора і ротора;

L_m – індуктивний опір взаємодії обмоток статора і ротора;

p_n – число пар полюсів.

В основному алгоритми векторного керування АД записуються та проєктуються в синхронній системі координат (d-q), що обертається відносно стаціонарної системи координат зі швидкістю ω_0 , що зображено на рис.4.1.

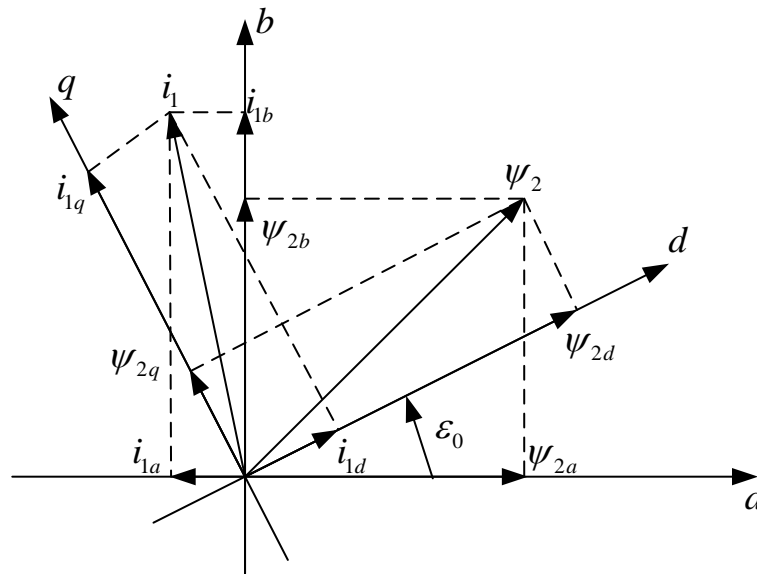


Рисунок 4.1 – Розташування векторів АД

Перетворення координат визначається як:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-\mathbf{J}\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab}, \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{\mathbf{J}\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{e}^{-\mathbf{J}\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \mathbf{e}^{\mathbf{J}\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

де \mathbf{x}_{dq} та \mathbf{x}_{ab} позначають двовимірний вектор напруги потоку і струму статора;

ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b);

$\mathbf{e}^{-\mathbf{J}\varepsilon_0}$, $\mathbf{e}^{\mathbf{J}\varepsilon_0}$ – оператори що забезпечують координатні перетворення векторів з системи координат, що обертається в стаціонарну.

Тоді в результаті перетворення (4.3) отримаємо стандартну двохфазну математична модель АД з короткозамкнутим ротором в системі координат (d-q), яка обертається з кутовою швидкістю ω_0 , що представлена в координатах потокочеплень ротора та струмів статора, задається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega, \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \\
M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2q} i_{1d} - \psi_{2d} i_{1q}), \\
\dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma_1} u_{1d}, \\
\dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma_1} u_{1q}, \\
\dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\
\dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}.
\end{aligned} \tag{4.5}$$

4.1 Алгоритм непрямого векторного керування АД

Алгоритм непрямого векторного керування швидкістю АД [16], структурна схема якого показана на рис. 4.1, містить:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

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

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \tag{4.7}$$

$$\varepsilon_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}^*}{\psi^*} + \phi. \tag{4.8}$$

де ψ^* , $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$ - завдання модуля вектора потокозчеплення ротора та відповідно його перша і друга похідні;

ϕ - робастифікуючий зв'язок, що визначається далі. В стандартному випадку $\phi = 0$.

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

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

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

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

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}.$$

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

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно;

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

$(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості.

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

$$u_{1q} = \sigma(\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega r_n \psi^* + i_{1q}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q), \quad (4.12)$$

$$x_q = k_{ii} \tilde{i}_q.$$

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 прикладають до обмоток статора, дорівнюють:

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

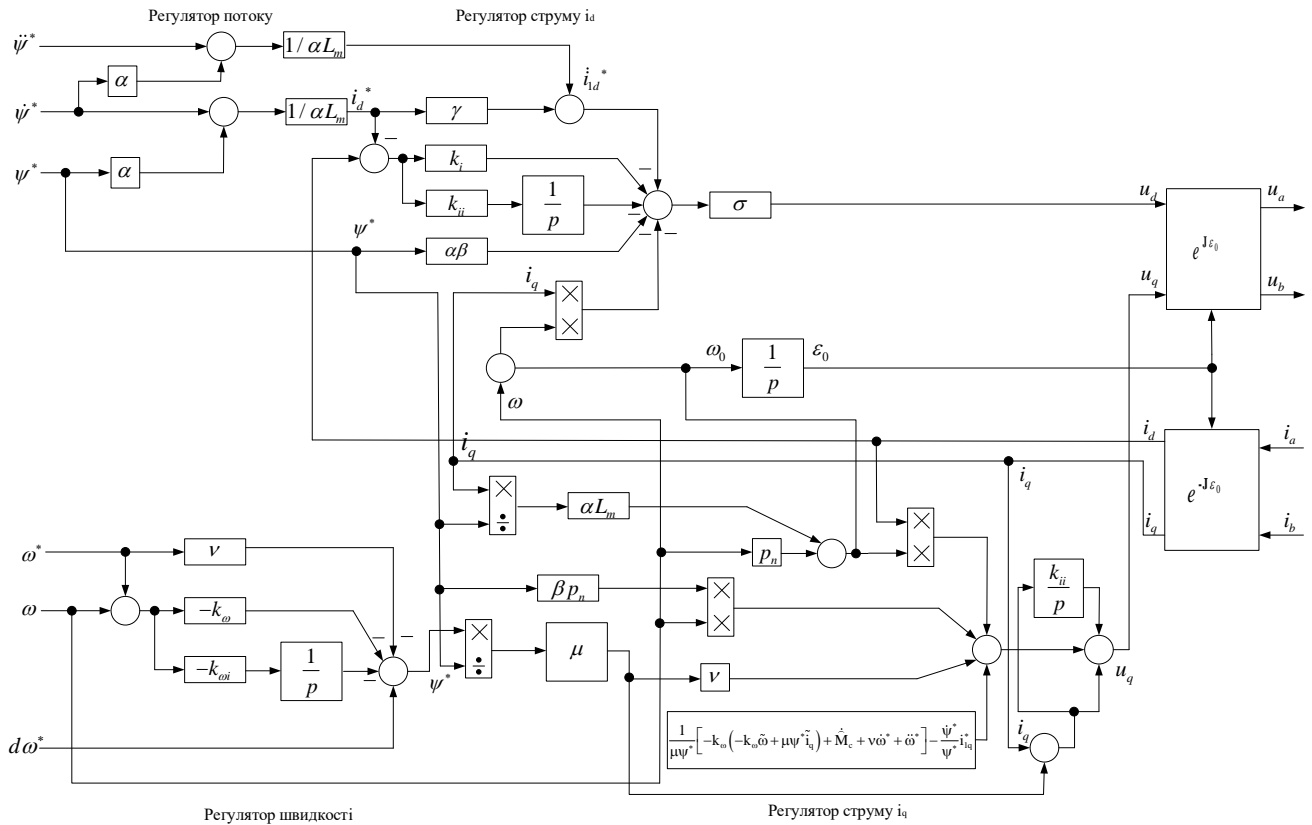


Рисунок 4.1 – Структурна схема алгоритму непрямого керування

4.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення АД

Один з методів аналізу режимів роботи електричних систем - це математичне моделювання. Під час аналізу необхідно розробити розрахункову схему заміщення, яка ґрунтується на принциповій схемі системи.

Для застосування АД в системі векторного керування необхідно знати її параметри схеми заміщення. Їх можна отримати з дослідів короткого замикання та холостого ходу, або ж довідників до серії обраного двигуна (якщо вони є в наявності). Вихідні дані для розрахунку параметрів обраного асинхронного двигуна знаходяться в довіднику для двигунів серії 4А [17].

Паспортні дані двигуна 4АН355М4У3, при з'єднанні обмоток статора у зірку, наведено в розділі 3 таблиця 3.1.

Розрахуємо номінальних дані двигуна, кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад/с.} \quad (4.14)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.16}{2} = 157.08 \text{ рад/с.} \quad (4.15)$$

Номінальну швидкість двигуна отримаємо як:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1-s_n) = 157.08 \cdot (1-0.012) = 155.19 \text{ рад/с.} \quad (4.16)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{400000}{155.19} = 2577.5 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (4.17)$$

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

$$M_k = \lambda M_n = 2 \cdot 2577.5 = 5155 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (4.18)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{ln}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 380 \text{ В,} \quad (4.19)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\phi)} = \frac{400000}{3 \cdot 380 \cdot 0.945 \cdot 0.91} = 408.02 \text{ А.} \quad (4.20)$$

Відповідно амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 380 = 537.4 \text{ В,} \quad (4.21)$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 408.02 = 577.03 \text{ А.} \quad (4.22)$$

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

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{537.03}{314.16} = 1.71 \text{ Вб..} \quad (4.23)$$

Отримана математична модель АД застосовна для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 4.3, тоді як приведені каталожні параметри отримано в Г-подібній схемі заміщення, рис. 4.4. Перерахунок параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується за наступною методикою:

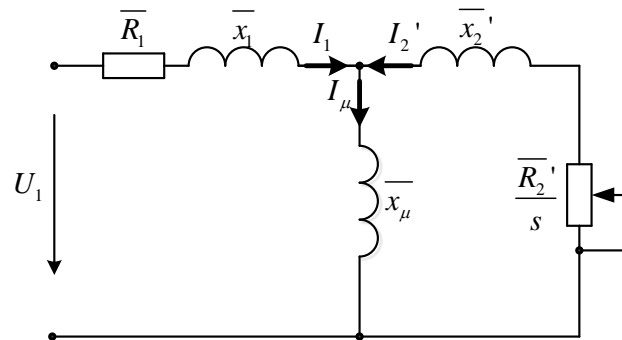


Рисунок 4.3 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

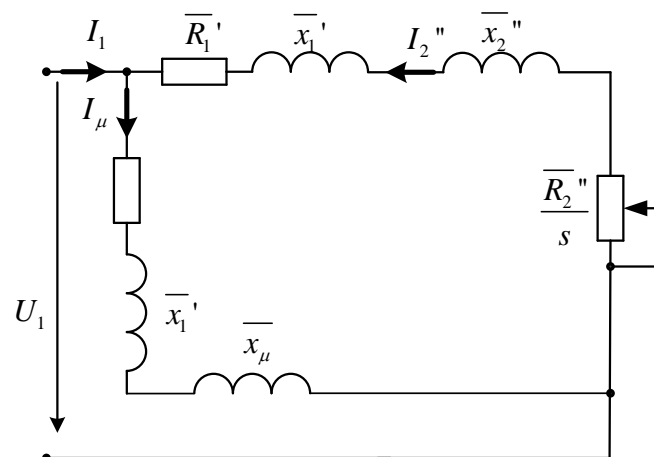


Рисунок 4.4 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Розраховуємо коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1 \bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{5.4 + \sqrt{5.4^2 + 4 \cdot 0.11 \cdot 5.4}}{2 \cdot 5.4} = 1.02. \quad (4.24)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в відносних одиницях отримаємо як:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.11}{1.02} = 0.1078, \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.019}{1.02} = 0.0186, \quad (4.25)$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.14}{1.02^2} = 0.1346, \quad \bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.013}{1.02^2} = 0.0125. \quad (4.26)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення запишуться в абсолютних одиницях як:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.1078 \frac{380}{408.02} = 0.1004 \text{ Ом}, \quad (4.27)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0186 \frac{380}{408.02} = 0.0173 \text{ Ом}, \quad (4.28)$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.1346 \frac{380}{408.02} = 0.1254 \text{ Ом}, \quad (4.29)$$

$$R'_2 = \bar{R}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.0125 \frac{380}{408.02} = 0.0116 \text{ Ом}, \quad (4.30)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 5.4 \frac{380}{408.02} = 5.0291 \text{ Ом}, \quad (4.31)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.1004}{314.16} = 0.3196 \text{ мГн}, \quad (4.32)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_0} = \frac{0.1254}{314.16} = 0.3992 \text{ мГн}. \quad (4.33)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{5.0291}{314.16} = 16.008 \text{ мГн}, \quad (4.34)$$

Індуктивності статора і ротора

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 16.008 + 0.3196 = 16.3276 \text{ мГн}, \quad (4.35)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 16.008 + 0.3992 = 16.4072 \text{ мГн}, \quad (4.36)$$

Результати розрахунків параметрів двигуна 4АА56А4У3 зведені до Таблиці 4.2.

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

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0.0116}{0.0164072} = 0.707 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (4.37)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0173}{0.0163276} = 1.0596 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (4.38)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 16.3276 \cdot \left(1 - \frac{16.008^2}{16.3276 \cdot 16.4072} \right) = 0.7091 \text{ мГн}; \quad (4.39)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{16.008}{16.4072 \cdot 0.7091} = 1375.93 \frac{1}{\text{Гн}}; \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta &= \frac{0.0173}{0.0007091} + 0.707 \cdot 0.016008 \cdot 1375.93 = \\ &= 39,969 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \end{aligned}; \quad (4.41)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{16.008}{16.4072} = 1,4635. \quad (4.42)$$

Відповідні розраховані дані заносимо до таблиці з кінцевими вихідними даними таб. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри двигуна 4АН355М4У3

P_{2n} , кВт	400	R_1 , Ом	0.0173
ω_{xx} , рад/с	157.08	R_2 , Ом	0.0116
ω_n , рад/с	155.19	L_1 , мГн	16.3276
M_n , Нм	2577.5	L_2 , мГн	16.4072
M_k	5155	L_m , мГн	16.008
λ	2	α , Ом/Гн	0,707
I_{na} , А	577.03	α_1 , Ом/Гн	1,0596
ψ_{1xx} , Вб	1.71	σ , мГн	0.7091

Продовження табл. 4.1

η	0.945	$\beta, 1/\text{Гн}$	1375.93
$\cos\varphi$	0.91	$\gamma, \text{Ом}/\text{Гн}$	39,969
$J_d, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	7	μ_1	1,4635

Висновок по розділу 4

1. Розглянуто математичну модель короткозамкненого асинхронного двигуна, його рівняння та алгоритм непрямого векторного керування швидкістю; за отриманими рівняннями складено структурну схему системи непрямого векторного керування.

2. Розраховано параметри двигуна, необхідні для математичного моделювання системи електроприводу, тобто здійснено необхідні перерахунки для переходу з Г-подібної схеми в Т-подібну, що є необхідним для подальшого дослідження динамічних режимів електроприводу в пакеті МАТЛАБ.

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Методом математичного моделювання проведемо дослідження характеристик розробленої електромеханічної системи [18], яке включає:

1. Дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД при виконанні тесту, який включає в себе етапи відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості при розгоні до номінальної швидкості з моментом, який відповідає розрахунковому, накидання постійного моменту навантаження, його скидання та гальмування електроприводу;

2. Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні нульової швидкості, а саме в даному режимі досліджуються, як система справляється з утриманням статичного моменту при зменшенні швидкості з номінальної до нуля;

3. Дослідження процесу рекуперації, тобто аналіз процесів при генераторному моменті навантаження та дослідження залежності кількості рекуперованої енергії від швидкості;

В табл. 5.1 подано значення обраних коефіцієнтів регуляторів [19].

Таблиця 5.1 – Значення обраних коефіцієнтів регуляторів

Пропорційний коефіцієнт регулятора швидкості, k_{ω}	100
Інтегральний коефіцієнт регулятора швидкості, $k_{\omega i}$	5000
Пропорційний коефіцієнт регулятора струмів, k_i	700
Інтегральний коефіцієнт регулятора струмів, $k_{i i}$	120000
Пропорційний коефіцієнт регулятора потоку, k_{ψ}	100
Інтегральний коефіцієнт регулятора потоку, $k_{\psi i}$	2500

Дослідження моделі векторного керування виконується на основі математичної моделі асинхронного двигуна 4АН355М4У3, зібраної в програмному забезпеченні Matlab Simulink, параметри двигуна розраховано в розділі 4. Модель непрямого векторного керування наведена на рис. 5.1

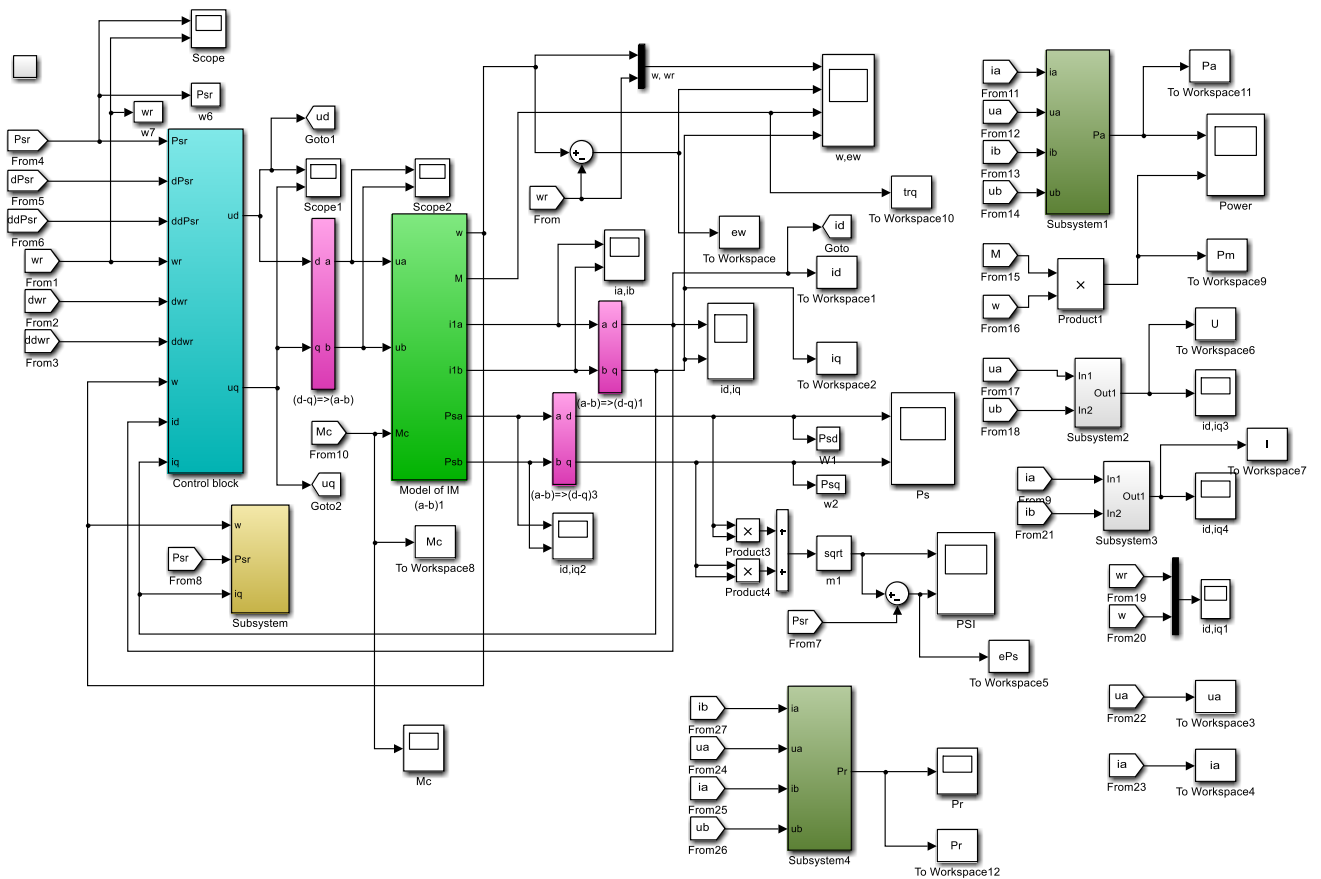


Рисунок 5.1 – Модель непрямого векторного керування АД

5.1 Дослідження динамічних характеристик в номінальному режимі

Для виконання даного дослідження потрібно спочатку задати траєкторію потокозчеплення, на початковому інтервалі часу 0 – 0.32 с АД збуджується до величини потоку 1.6 Вб. Потім в 0.4 с розпочинається відпрацювання завдання двигуна по швидкості, через 0.6 с двигун виходить на усталене значення швидкості 153.6 рад/с. В період з 1.2 по 2 с відбувається прикладання статичного моменту до валу двигуна, після чого в 2.2 с відпрацьовується гальмування ротора двигуна. Цей режим відповідає роботі бурової лебідки на підйом де спочатку відбувається вибірка троса після чого починається підйом талевого блоку з колоною. На рис. 5.2 зображено графіки відпрацювання траєкторії швидкості, потокозчеплення та моменту двигуна.

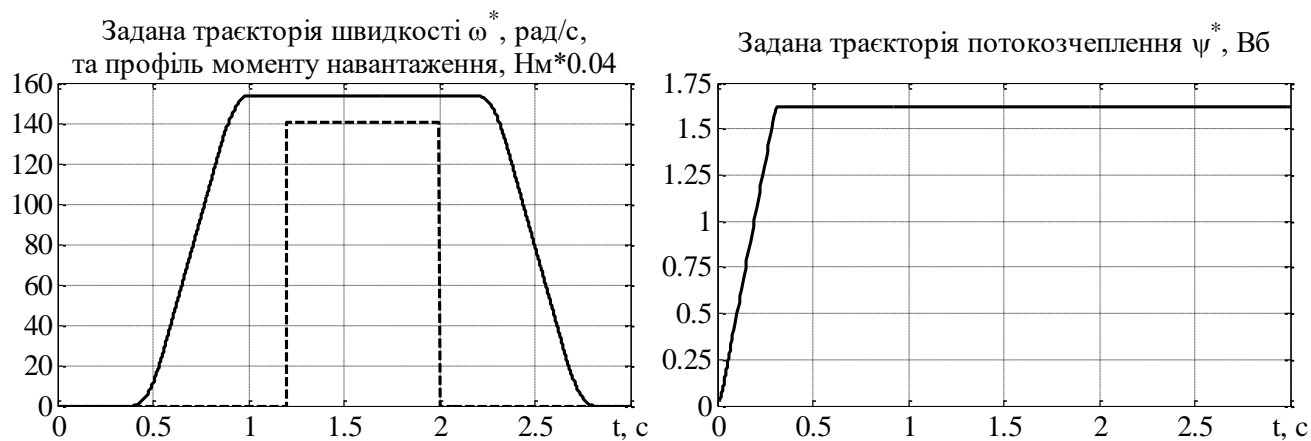


Рисунок 5.2 – Завдання швидкості, моменту та потокозчеплення двигуна

Результат моделювання роботи двигуна в номінальному режимі зображено на рис. 5.3 – 5.5.

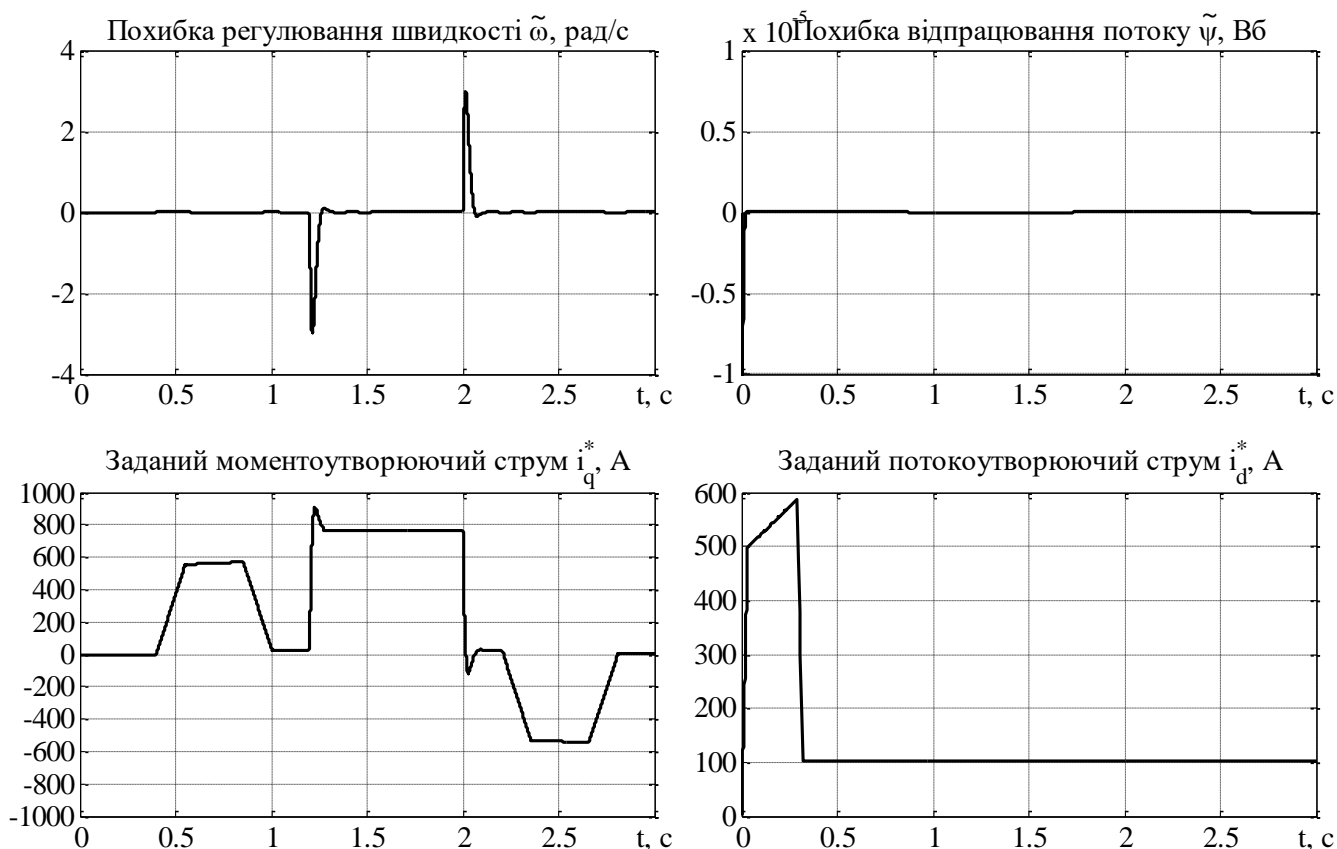


Рисунок 5.3 – Графіки перехідних процесів при не прямому векторному керуванні швидкістю АД

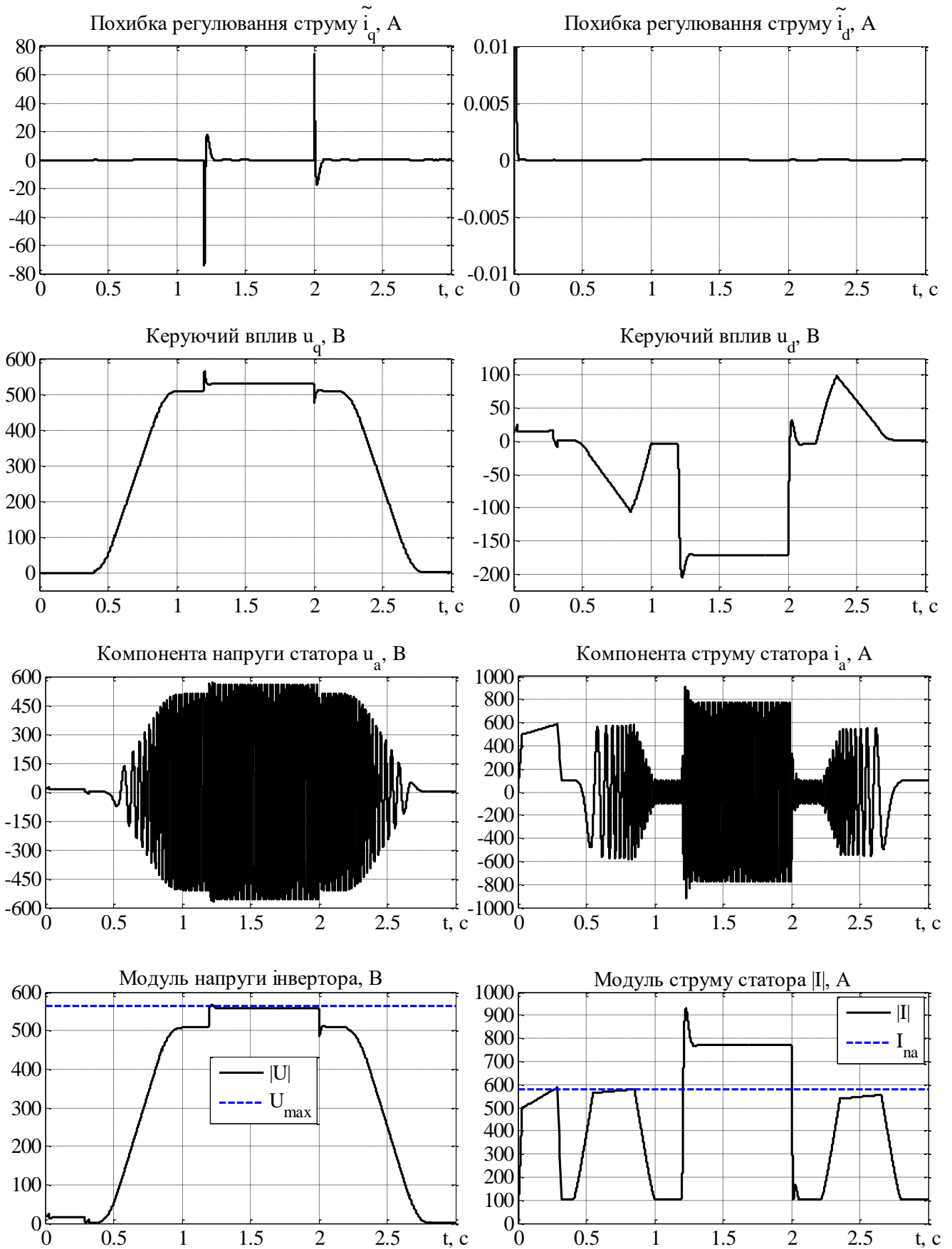


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів при не прямому векторному керуванні швидкістю АД

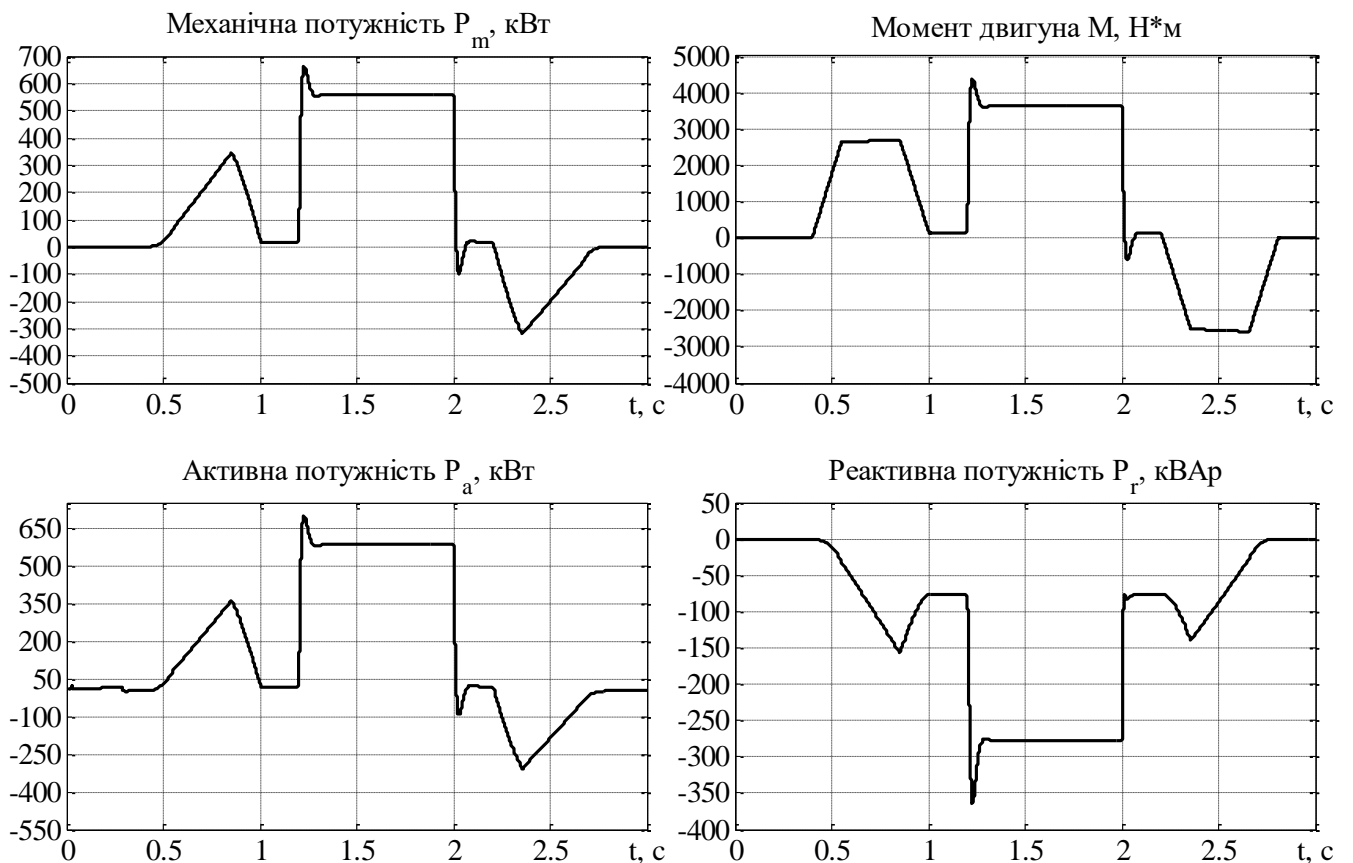


Рисунок 5.5 – Графіки перехідних процесів при не прямому векторному керуванні швидкістю АД

Як видно з графіків, похибка регулювання швидкості присутня лише в момент прикладанні статичного навантаження та його скидання, що пояснюється компенсацією першої та другої похідної за швидкістю. В свою чергу напруга статора при накиданні визначеного моменту навантаження, збільшується, що є необхідним для компенсації дії моменту навантаження і забезпечення відпрацювання кутової швидкості на рівні, як до накидання даного моменту. При цьому значення модуля напруги статора різко збільшується за час розгону двигуна, та при прикладанні номінального моменту навантаження також збільшується, щоб компенсувати його дію і забезпечити відпрацювання заданої швидкості.

Компонента струму статора i_q регулює момент двигуна, тобто повторює форму моменту, відповідно похибка струму по осі q не дорівнює нулю лише при накиданні та скиданні статичного навантаження, у всіх інших випадках вона компенсується ПІ регулятором. Тоді як компонента струму статора по осі

d утворює потокозчеплення двигуна, тому має найбільше значення при збудженні двигуна, коли потокозчеплення виходить на усталене значення струм i_d також виходить на усталене значення.

Графік механічної потужності за характером аналогічний до активної потужності відрізняються між собою вони на величину коефіцієнту корисної дії. Також з графіку моменту видно, що присутній вплив в'язкого тертя, оскільки на холостому ходу момент не нульовий.

5.2 Дослідження динамічних характеристик при гальмуванні до нульової швидкості з відпрацюванням моменту

В даному досліді процес збудження та розгону відбувається аналогічно до попереднього, після чого в час 1.2 с відбувається накидання статичного моменту, а після цього відпрацьовується завдання на гальмування до нульової швидкості з подальшим утриманням на нульовій швидкості до 2.5 с. Відповідні графіки відпрацювання швидкості моменту та потокозчеплення наведено на рис 5.6.

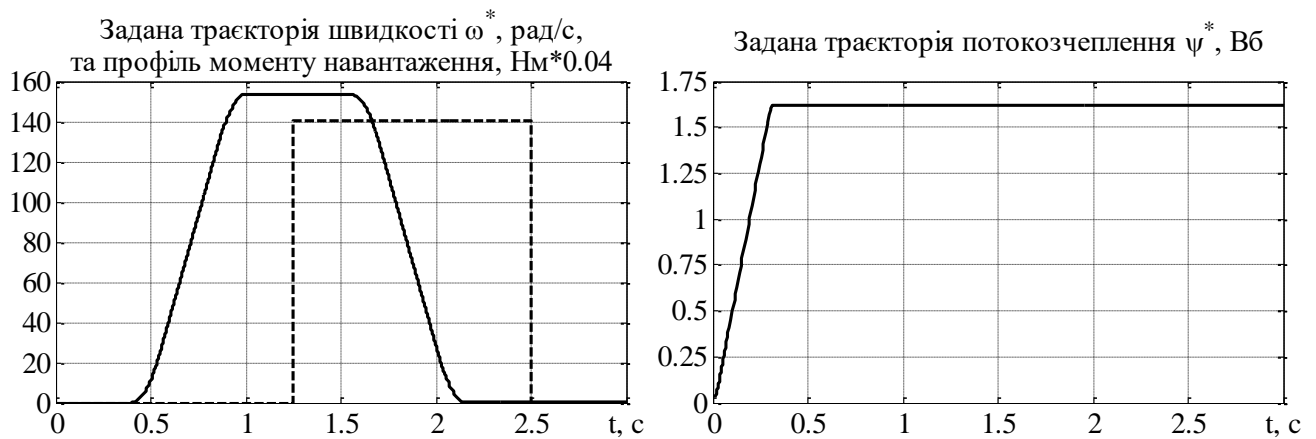


Рисунок 5.6 – Завдання швидкості, моменту та потокозчеплення двигуна

На рис. 5.7-5.8 зображено результат моделювання роботи АД при непрямому векторному керуванні при дослідженні нульової швидкості.

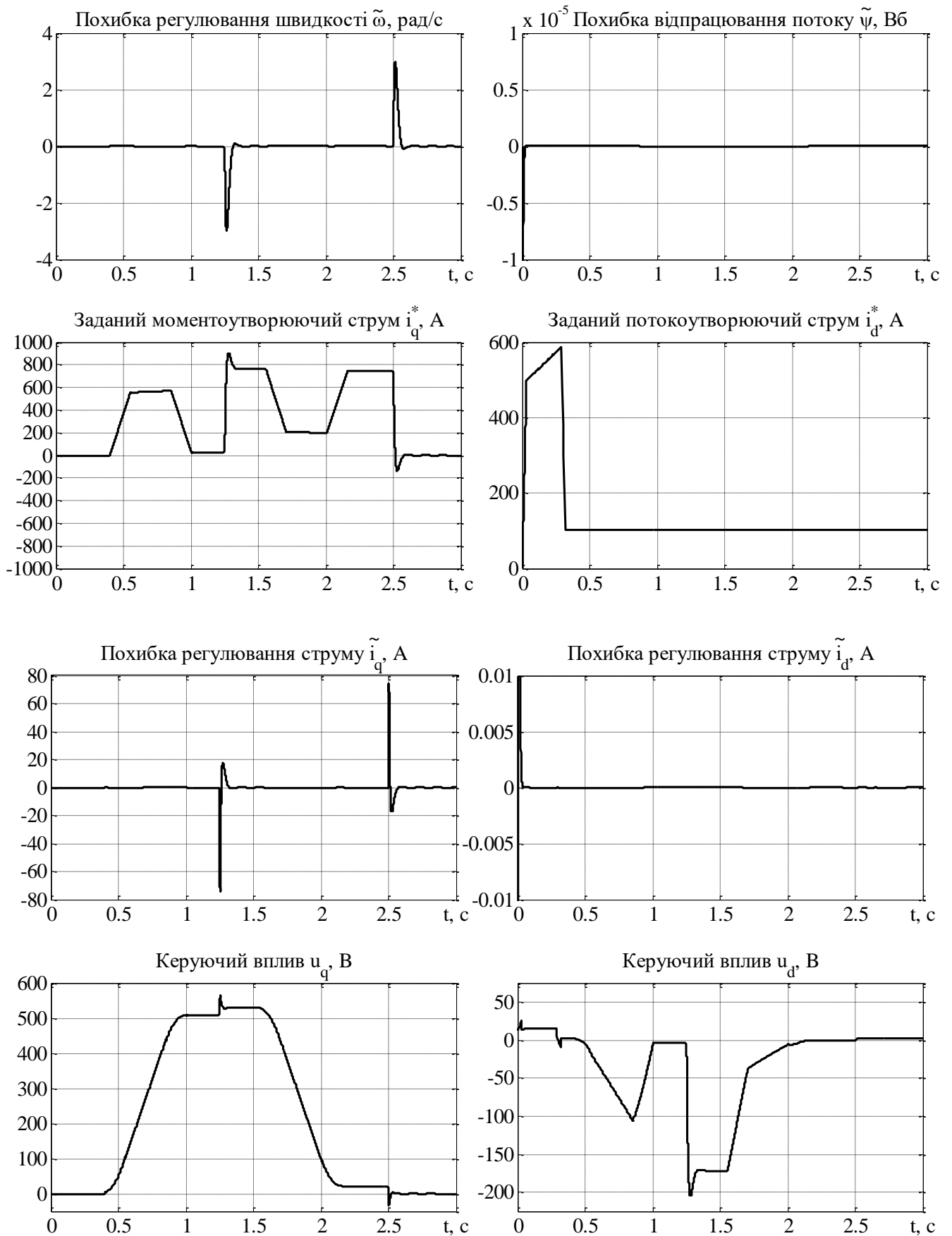
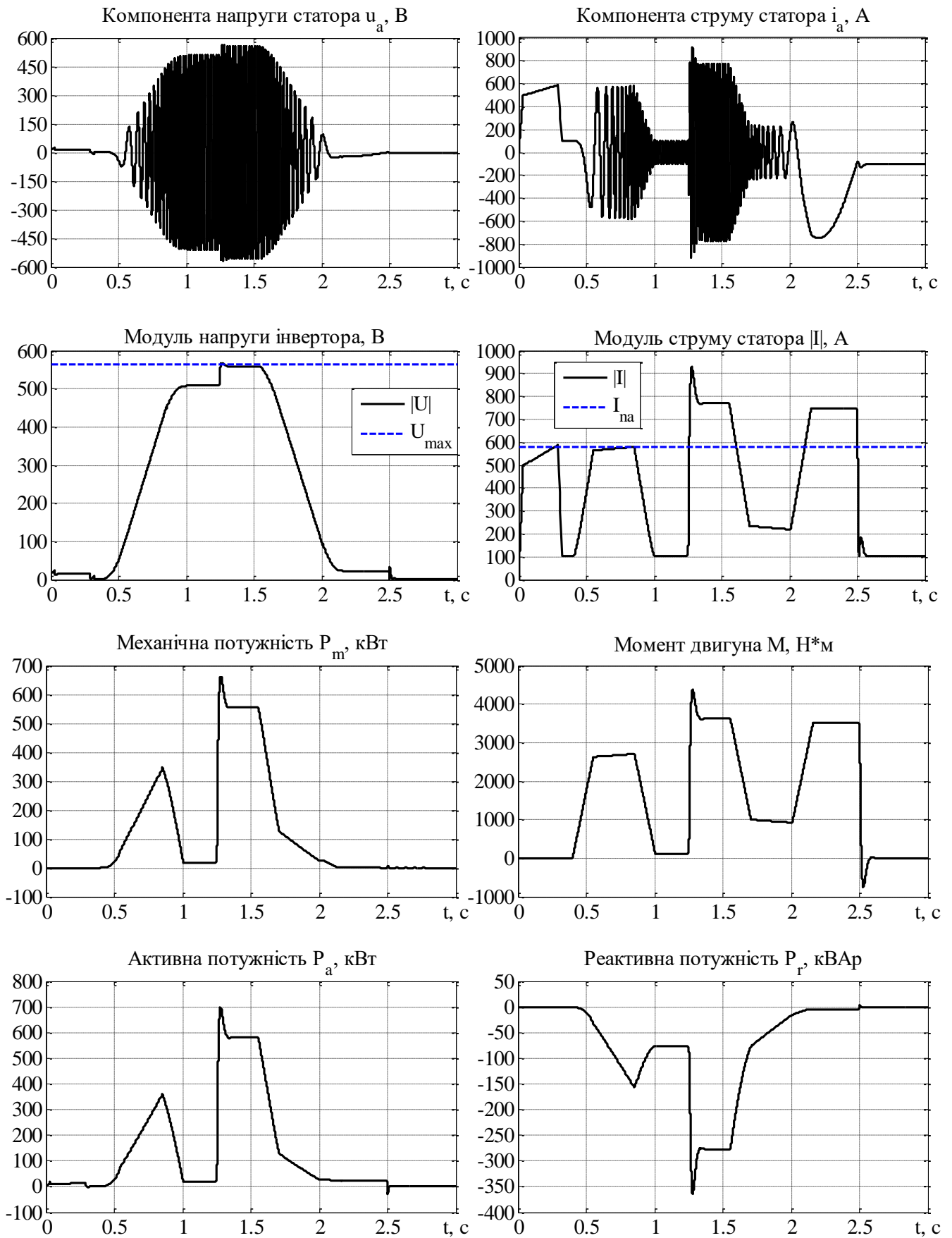


Рисунок 5.7 – Графіки перехідних процесів при досліді гальмування до нульової швидкості з відпрацюванням моменту



З отриманих графіків перехідних процесів можна зробити висновки, при відпрацюванні нульової швидкості двигун асимптотично відпрацьовує швидкість та прикладений момент. Наявність струму навіть при нульовій швидкості обумовлюється тим, що при дії активного статичного моменту потрібно забезпечувати незмінне положення двигуна, тому система регуляторів забезпечує протікання таких струмів, при яких ротор двигуна не змінює свого положення.

Значення похибки регулювання швидкості аналогічне до попереднього дослідження, тобто можна зробити висновок що похибка регулювання швидкості не залежить від значення швидкості

Видно, що при наявності навантаження на нульовій швидкості, струм статора по осі d не змінюється, тобто системи магнітно розв'язані. А струм статора по осі q виникає для компенсації збурення, яке спричиняється моментом навантаження і по формі відповідає графіку моменту.

При відпрацюванні номінальної швидкості, виникає динамічний момент, який потрібний для розгону та сповільнення двигуна, в даному випадку бачимо що динамічний момент при гальмуванні допомагає компенсувати статичний. Тоді як механічна потужність падає до нуля оскільки в цьому режимі й швидкість також падає до нуля.

5.3 Дослідження режиму рекуперації

Даний дослід є аналогічним до першого дослідження, різниця полягає в знаку та значенні статичного моменту що прикладається. Величину статичного моменту приведенного до валу двигуна при спуску розрахуємо аналогічно до формули (2.3) та (2.6):

$$M_6 = \frac{k_{\text{зан}} \cdot G \cdot D_6 \cdot \eta_{\text{тс}} \cdot \eta_{\text{т}}}{2 \cdot i_{\text{тс}}} = \frac{0.85 \cdot 1569.06 \cdot 0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.85}{2 \cdot 8} = 31.884, \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (5.1)$$

$$M_c = \frac{M_6 \cdot \eta_p}{i_p} = \frac{31.884 \cdot 0.97}{16} = 1.933, \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (5.2)$$

Відповідні графіки відпрацювання швидкості моменту та потокозчеплення наведено на рис 5.9.

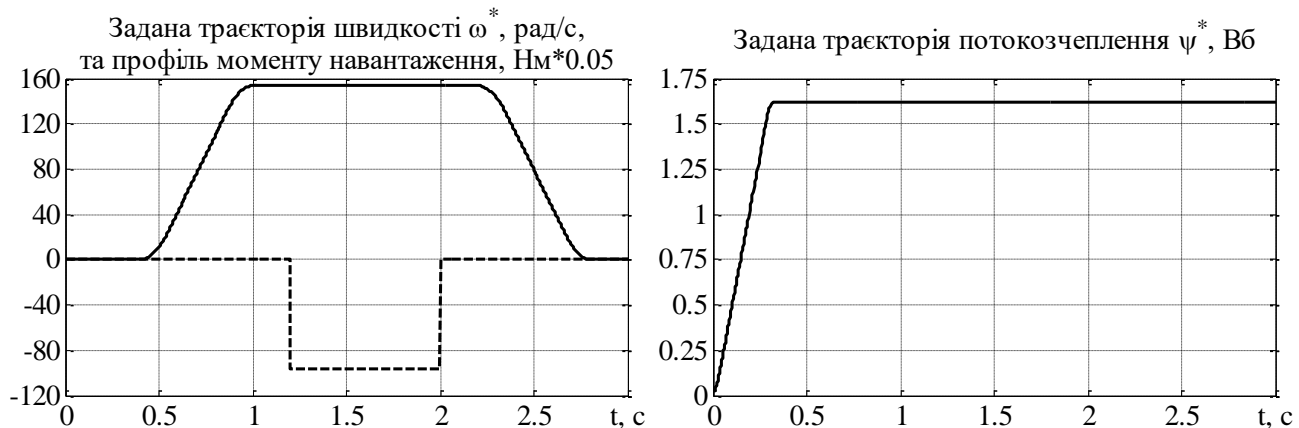


Рисунок 5.9 – Завдання швидкості, моменту та потокозчеплення двигуна

На рис. 5.10-5.12 зображено результат моделювання роботи АД при непрямому векторному керуванні при генераторному моменті навантаження

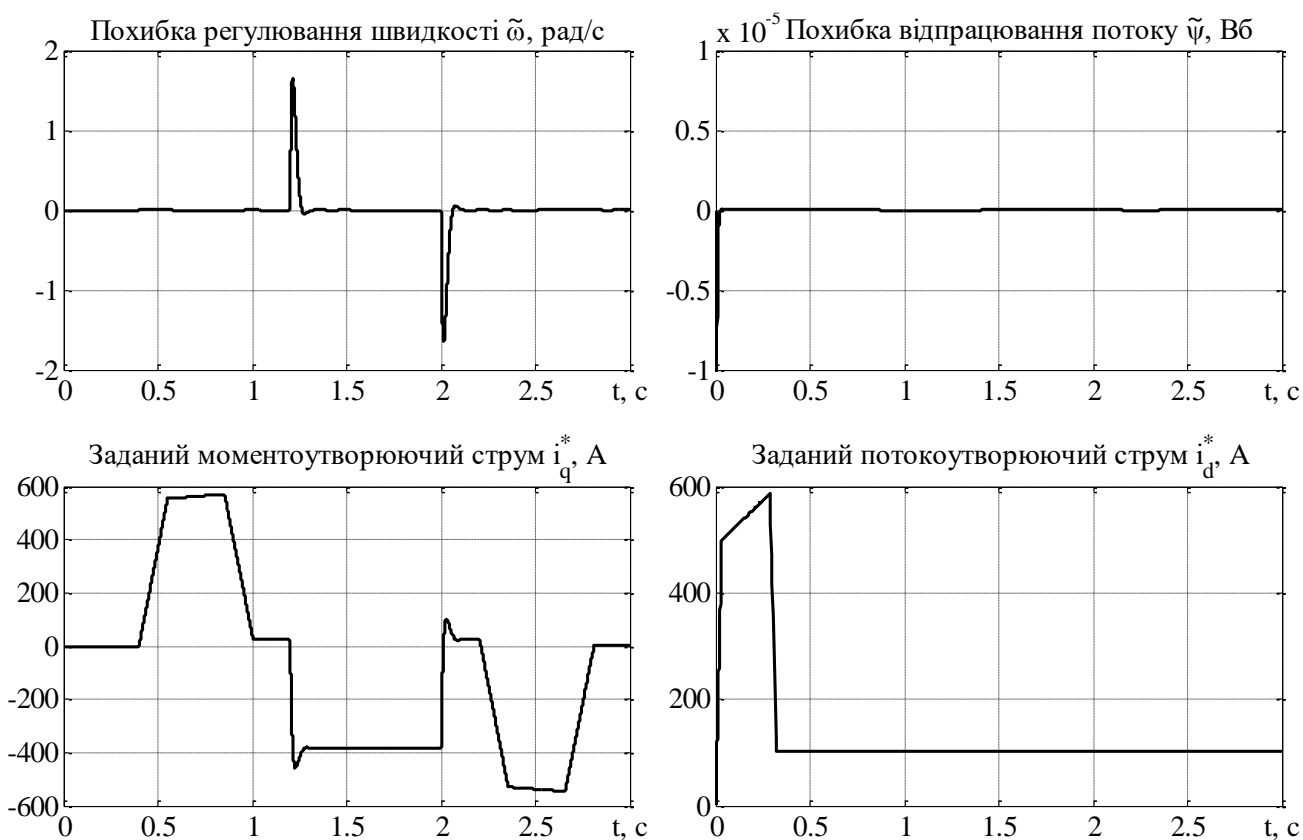


Рисунок 5.10 – Графіки перехідних процесів при дослідженні генераторного навантаження

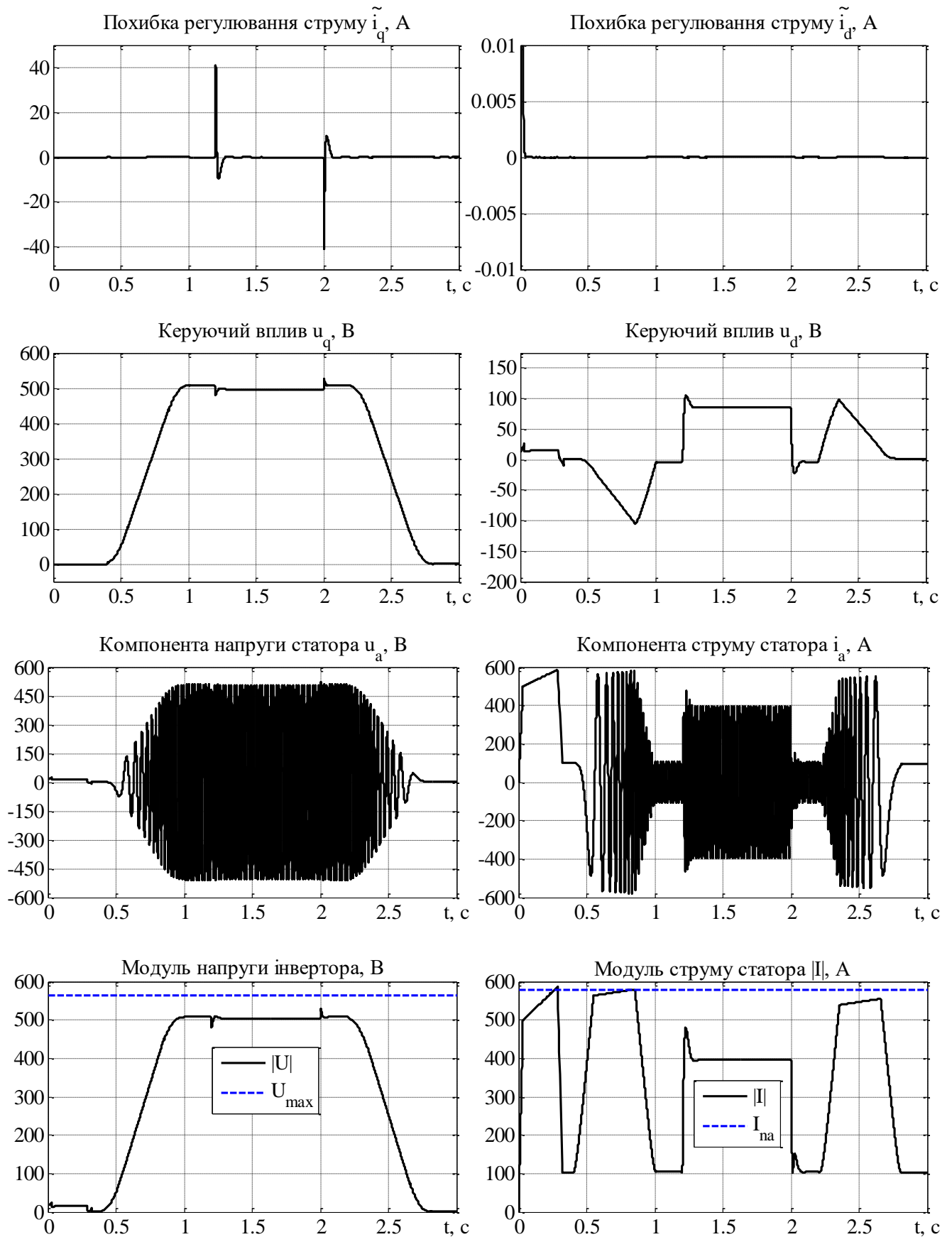


Рисунок 5.11 – Графіки перехідних процесів при дослідженні генераторного навантаження

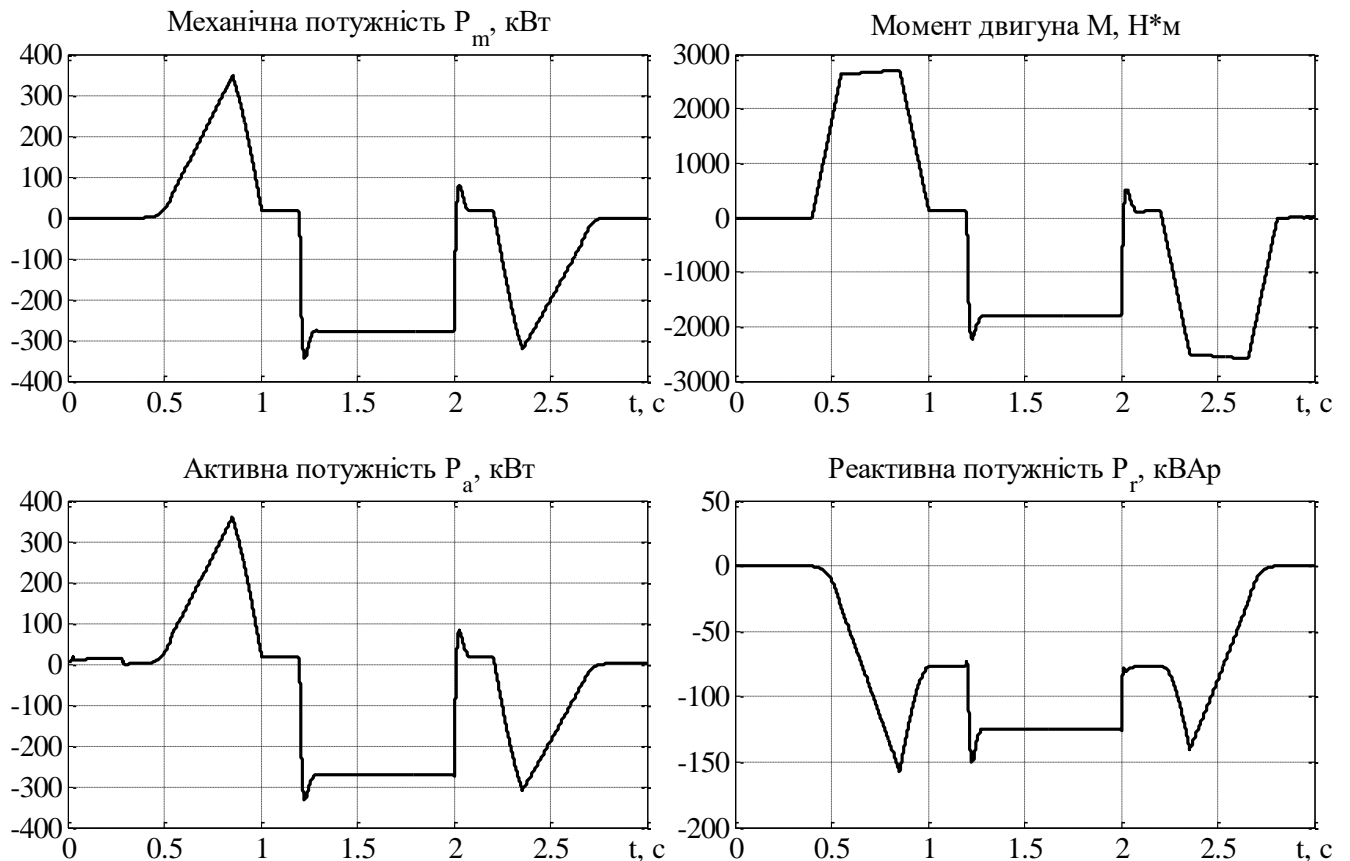


Рисунок 5.12 – Графіки перехідних процесів при дослідженні генераторного навантаження

Отримані графіки ідентичні тим що досліджено в першому підпункті, проте на графіку похибки змінилися значення та знаки швидкості оскільки момент став від'ємним і меншим за значенням. Компонента напруги u_q на проміжку, де прикладається момент, зменшується оскільки генераторне навантаження створює додатній динамічний момент. Аналогічно на графіках напруги u_d , механічної та активної потужності змінився знак при накиданні навантаження.

Виходячи з поставлених вимог до електроприводу досліджено процес рекуперації електричної енергії на висоту спуску однієї бурової труби (9 м.) при різних швидкостях опускання, відповідно й час опускання також різний, графіки рекуперованої енергії наведено на рис 5.13

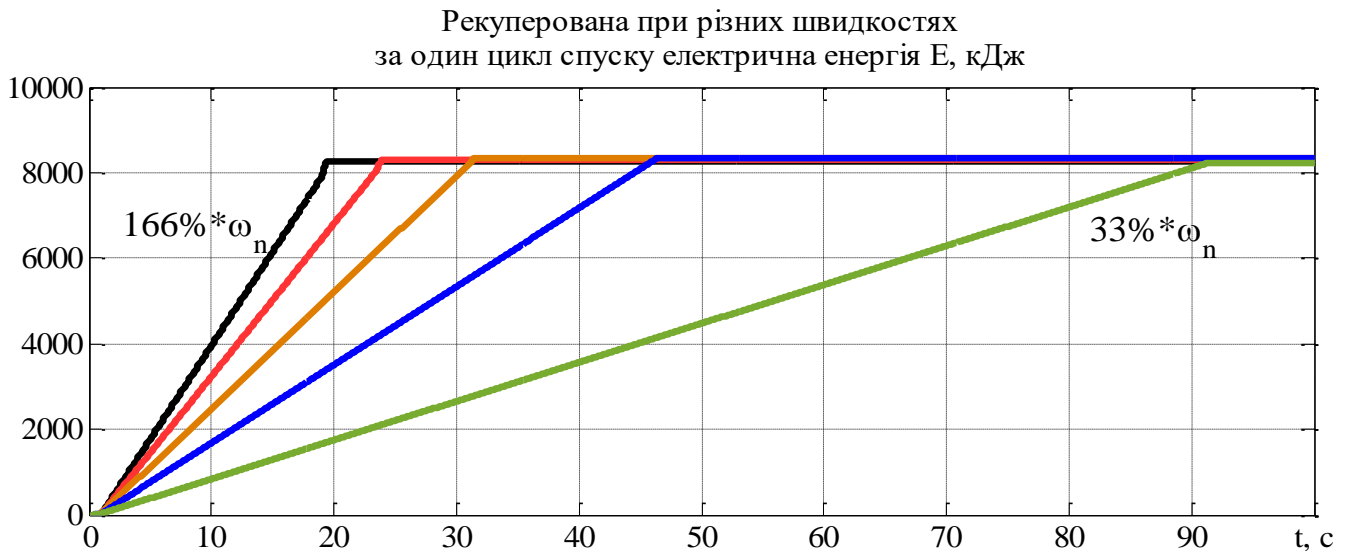


Рисунок 5.13 – Графік рекуперованої енергії за цикл для різних значень швидкості

Як бачимо, при векторному керуванні кількість рекуперованої енергії не залежить від швидкості, це дає нам змогу обрахувати загальну кількість енергії що можна рекуперувати за повний цикл опускання бурової колони на глибину 2500 м. Розрахунок рекуперованої потужності за спуск бурової колони на максимальну глибину буріння:

$$E_{\Sigma} = \frac{h_k}{h_c} \cdot \frac{E_{\text{ц}}}{2} = \frac{2500}{9} \cdot \frac{8250000}{2} = 1145.83, \text{ МДж} = 318.287, \text{ кВт} / \text{год}. \quad (5.3)$$

де h_k – максимальна висота бурової колони;

h_c – висота бурової свічки;

$E_{\text{ц}}$ – енергія, рекуперована за цикл спуску бурової свічки.

Приймається що в процесі буріння скважини колона опускається на забій близько 6 разів з різної висоти, тоді рекуперовану енергію в процесі буріння однієї скважини можна розрахувати як:

$$E_{\Sigma\text{п}} = E_{\Sigma} \frac{1+2+3+4+5+6}{6} = 1145.83 \cdot \frac{1+2+3+4+5+6}{6} = 4010.41, \text{ МДж} = 1114, \text{ кВт} / \text{год}. \quad (5.4)$$

Розраховане значення рекуперованої потужності в подальшому можна використати для техніко-економічного дослідження, доцільності даного режиму в СПК бурової лебідки.

Висновок по розділу 5

1. Виконано дослідження динамічних характеристик системи електроприводу методом математичного моделювання в програмному пакеті MATLAB, а саме: відпрацювання заданої траєкторії швидкості другого порядку з накиданням статичного моменту.
2. Досліджено процес гальмування до нульової швидкості з утриманням моменту навантаження.
3. Результати моделювання свідчать про високу якість розробленого електроприводу і його придатність для використання в спуско-підйомному комплексі бурової установки.
4. Виходячи з того, що обраний в розділі 3 частотний перетворювач підтримує режим рекуперації, було досліджено роботу двигуна в генераторному режимі і розраховано усереднене значення рекуперованої енергії під час спуску бурової колони в процесі буріння. Дане дослідження підтвердило доцільність використання режиму рекуперації в електроприводі спуско-підйомного комплексу бурової установки.

РОЗДІЛ 6 СПЕЦЧАСТИНА. АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛЕБІДКИ

Технологічна схема спуско-підйомного комплексу бурової установки з розміщенням датчиків наведена на рис. 6.1

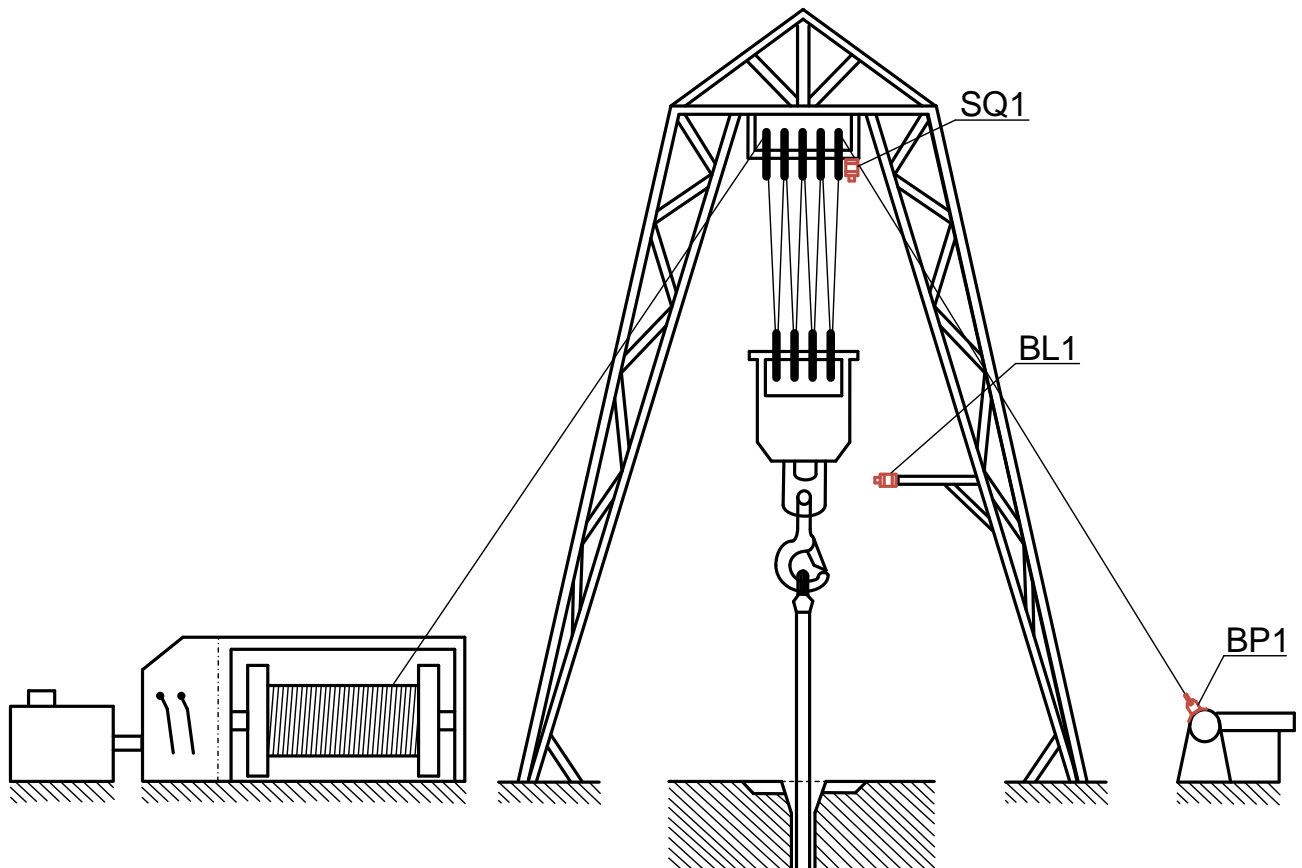


Рисунок 6.1 – Технологічна схема СПК бурової установки

Виходячи з конструкційних та технічно-експлуатаційних вимог до електроприводу, задаємось умовою роботи бурової лебідки для автоматизації процесів спуску та підйому бурової колони.

Для початку роботи з лебідкою слід натиснути кнопку запуску (START), в цьому випадку лебідка є готовою до роботи і вмикається дозволяючий зелений світлодіод (VD1), тобто система знаходиться в очікуванні сигналу на рух. Якщо кнопки руху не вмикаються то через час ($t_1=30$ с) система знову повертається в “нульовий стан”, в цей стан можна також повернутись натиснувши кнопку скидання (RESET).

Кнопкою підйому (UP) подається сигнал на піднімання колони ($f1$), при цьому ввімкнений жовтий робочий світлодіод (VD2), піднімання колони можна зупинити кнопкою (STOP), якщо ж надходить сигнал від кінцевого вимикача (SQ1), який свідчить про те що талевий блок знаходиться в верхній точці, то подається сигнал на відпрацювання нульової швидкості ($f3$) що забезпечить утримування колони, при цьому ввімкнений жовтий робочий світлодіод (VD2), щоб припинити утримування колони та повернутись в стан очікування сигналу на рух слід натиснути кнопку (STOP).

Аналогічно кнопкою спуску (DOWN) подається сигнал на опускання колони ($f2$), при цьому ввімкнений жовтий робочий світлодіод (VD2), опускання колони можна зупинити кнопкою (STOP), якщо ж надходить сигнал від кінцевого вимикача (SQ2) який свідчить про те що талевий блок знаходиться в нижній точці, то подається сигнал на відпрацювання нульової швидкості ($f3$) що забезпечить утримування колони, при цьому ввімкнений жовтий робочий світлодіод (VD2), щоб припинити утримування колони та повернутись в стан очікування сигналу на рух слід натиснути кнопку (STOP).

Якщо під час спуску або підйому колони надходить сигнал від датчика натягу талевого троса (SQ3), що свідчить про те що значення натягу більше або менше допустимих значень, тоді подається сигнал на відпрацювання нульової швидкості ($f3$) що забезпечить утримування колони. При цьому ввімкнений червоний світлодіод (VD3), вихід з цього стану має на увазі усунення причини даної неполадки, після чого слід натиснути кнопку скидання (RESET) та повернутись в “нульовий стан”.

Для автоматизації технологічного процесу та його захисту від аварійних режимів роботи використовуються наступні датчики, сигнали з яких приймаються як значення логічних змінних:

– SQ1 датчик верхнього положення талевого блоку, обрано кінцевий вимикач ABB LS32P11B11 [20] відповідно параметри обраного вимикача наведено в таб 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристики кінцевого вимикача ABB LS32P11B11

Параметр	Значення
Номінальний струм	(10, 5.5, 3.1)А
Номінальна напруга	(24, 130, 230)В
Розрахункова кількість спрацювань	30 мільйонів
Ступінь захисту	IP 66
Тип контакту	1NO+1 NC

– BL1 датчик нижнього положення талевого блоку, відповідно до конструкційних особливостей установки обрано однопрохідний фотоелектричний датчик SICK WSE2S-2P3130 [21], технічні характеристики наведено в таб. 6.2.

Таблиця 6.2 – Характеристики датчика SICK WSE2S-2P3130

Параметр	Значення
Максимальний вихідний струм	50 мА
Напруга живлення	10-30 В, DC
Середній строк служби	100 000 год.
Ступінь захисту	IP 67
Тип перемикаючого виходу	PNP

– BP1 датчик натягу талевого каната, який обирається виходячи з приведенного значення маси колони до нерухомої гілки талевого канату:

$$m_k = \frac{k_{зан} \cdot m_k}{i_{тс} \cdot \eta_{тс} \cdot \eta_{т}} = \frac{0.85 \cdot 160}{8 \cdot 0.9 \cdot 0.85} = 22.22, \text{ т.} \quad (6.1)$$

Обрано тензодатчик на розтяг KELI DFEB [22], технічні характеристики якого наведені в таб. 6.3.

Таблиця 6.3 – Характеристики датчика KELI DFEB

Параметр	Значення
Номінальне навантаження	30 т
Чутливість	1.5 мВ/В
Номінальний діапазон напруги живлення	10-12 В, DC
Ступінь захисту	IP 67

Обраний тензодатчик є аналоговим, до того ж його робочий коефіцієнт передачі не дозволяє його напряму підключити до аналогового входу ПЛК,

тому скористаємось операційним підсилювачем. Обрано операційний підсилювач INA125 [23], спеціально розроблений для датчиків за мостовою схемою, його параметри наведено в таб 6.4

Таблиця 6.4 – Характеристики операційного підсилювача INA125

Параметр	Значення
Напруга живлення	3-5 В
Вихідний уніполярний сигнал	2.7 – 36 В
Вихідний біполярний сигнал	+1.35 – +-18 В
Коефіцієнт підсилення	4-10000

Основною перевагою даного підсилювача є можливість змінювати коефіцієнт підсилення значенням лише одного резистора як для уніполярного так і для біполярного сигналу. Значення резистора розрахуємо як:

$$R_G = \frac{(V_{in}^+ - V_{in}^-) \cdot 60000}{V_o - 4(V_{in}^+ - V_{in}^-)} = \frac{(12 \cdot 0.0015) \cdot 60000}{10 - 4(12 \cdot 0.0015)} = 108.78, \text{ Ом.} \quad (6.2)$$

де, V_o – максимальна вихідна напруга;

$(V_{in}^+ - V_{in}^-)$ – різниця потенціалу на вимірювальних виходах моста, можна отримати як добуток напруги живлення моста на його чутливість.

Обрано кнопки керування LAY5-BA31 без підсвічування. 5 шт [24]. Та сигнальні світлодіоди LED E.AD16.12. з напругою живлення 12 В, 3 шт. [25].

Для живлення системи керування обрано блоки живлення зі встановленням на DIN-рейку компанії виробника MEAN WELL HDR-15-5, HDR-30-12 та HDR-60-24, відповідно розраховані на постійну напругу 5/12/24 В, при струмі 2.4/2/2.5 А, 3 шт. [26]

Задаємось значеннями вихідних змінних що будуть застосовуватись при синтезі:

- f1– сигнал відпрацювання швидкості на підйом колони;
- f2– сигнал відпрацювання швидкості на спуск колони;
- f3– сигнал відпрацювання нульової швидкості на утримання колони;
- VD1,2,3– сигнал навмикання відповідно зеленого, жовтого та червоного кольору;

Далі необхідно здійснити синтез рівнянь згідно двійкової логіки. Синтез виконується методом “Графо-переходу”, оскільки він є універсальним та простим для розуміння [27]. Відповідно на рис. 6.2 наведено графоперехід, що відповідає умові технічного завдання поставленого раніше.

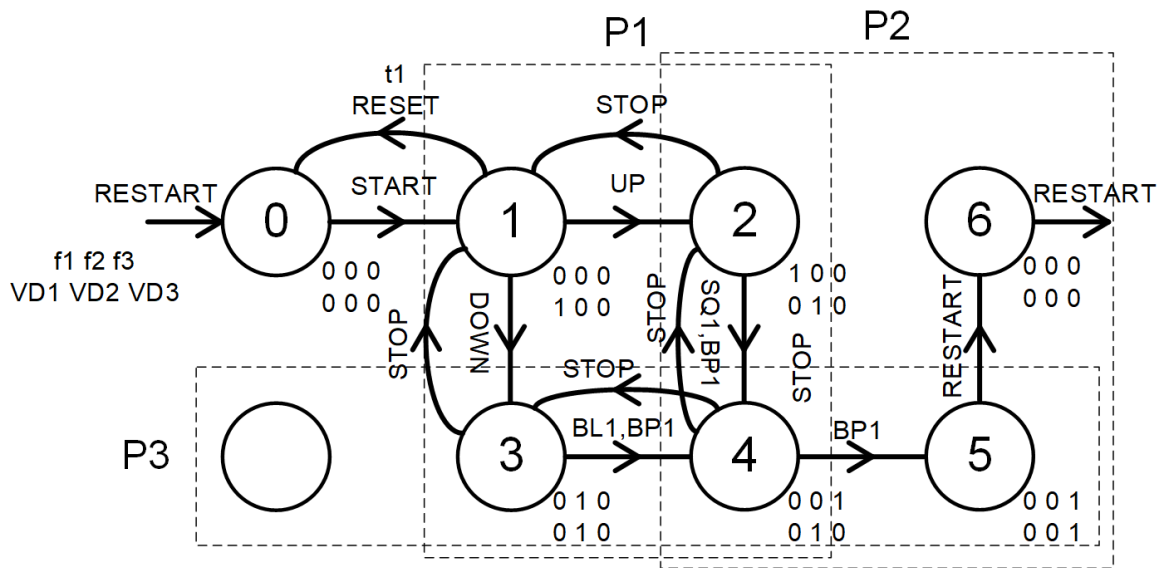


Рисунок 6.2 – Графоперехід за умовами автоматизації

За представленим графопереходом складаємо відповідні рівняння для вмикання та скидання тригерів:

$$Sp1 = START\bar{p}_2\bar{p}_3; \quad (6.3)$$

$$Rp1 = RESET\bar{p}_2\bar{p}_3 + t1\bar{p}_2\bar{p}_3 + SQ3p_2p_3; \quad (6.4)$$

$$Sp2 = UPp_1\bar{p}_3 + SQ2p_1p_3 + SQ3p_1p_3; \quad (6.5)$$

$$Rp2 = STOPp_1\bar{p}_3 + STOPp_1p_3 + RESET\bar{p}_1\bar{p}_3; \quad (6.6)$$

$$Sp3 = DOWNp_1\bar{p}_2 + SQ1p_1p_2 + SQ3p_1p_2; \quad (6.7)$$

$$Rp3 = STOPp_1\bar{p}_2 + STOPp_1p_2 + RESET\bar{p}_1\bar{p}_2; \quad (6.8)$$

Складаємо рівняння за графопереходом для вихідних змінних та таймерів :

$$f1 = p_1p_2\bar{p}_3; \quad (6.9)$$

$$f2 = p_1 \overline{p_2} p_3; \quad (6.10)$$

$$f3 = p_2 p_3; \quad (6.11)$$

$$VD1 = p_1 \overline{p_2} \overline{p_3}; \quad (6.12)$$

$$VD2 = p_1 p_3 + p_1 p_2; \quad (6.13)$$

$$VD3 = \overline{p_1} p_2 p_3; \quad (6.14)$$

$$t1 = p_1 \overline{p_2} \overline{p_3}; \quad (6.15)$$

Для виконання завдання і наступної його реалізації, було обрано ПЛК компанії АВВ ACS-еСо V2 PM564-RP [28]. ПЛК серії АС500-еСо пропонують найгнучкішу та найбільш економну з доступних конфігурацій, недороге та просте обслуговування, а також усі вимоги сучасної системи керування. Технічні характеристики обраного контролера наведено в таб 6.5.

Таблиця 6.4 – Характеристики операційного підсилювача INA125

Параметр	Значення
Напруга живлення	24 В
Кількість дискретних входів/виходів	6/6
Кількість аналогових входів/виходів	2/1
Тип виходів	релейні
Пам'ять контролера	128 кБ
Інтерфейси	RS485 Modbus RTU ASCII
Лічильник	50 кГц

Даний контролер повністю задовольняє поставлені вимоги до системи автоматизації та відповідає за кількістю портів. Загалом маємо 7 дискретних вхідних сигналів та 1 аналоговий, проте в даному контролері є можливість визначати аналогові входи як дискретні. Загальний вигляд контролера наведено на рис. 6.3.



Рисунок 6.3– Програмований логічний контролер ACS-eCo V2 PM564-RP

Розглянутий контролер програмується в програмному середовищі CoDeSys. Для даної задачі була обрана мова програмування LD (Ladder Diagram) - це мова, призначена для програмування промислових контролерів (ПЛК). Синтаксис цієї мови є зручним для заміни логічних схем, які раніше були реалізовані за допомогою релейної техніки, і вона спеціально розроблена для роботи з промисловим обладнанням. Вона забезпечує зрозумілий інтерфейс для програмування логіки роботи контролера, що спрощує завдання створення програм та їх впровадження, а також допомагає швидко знаходити несправності у підключеному до контролера обладнанні.

Програму на мові LD наведено на рис 6.4-6.6.

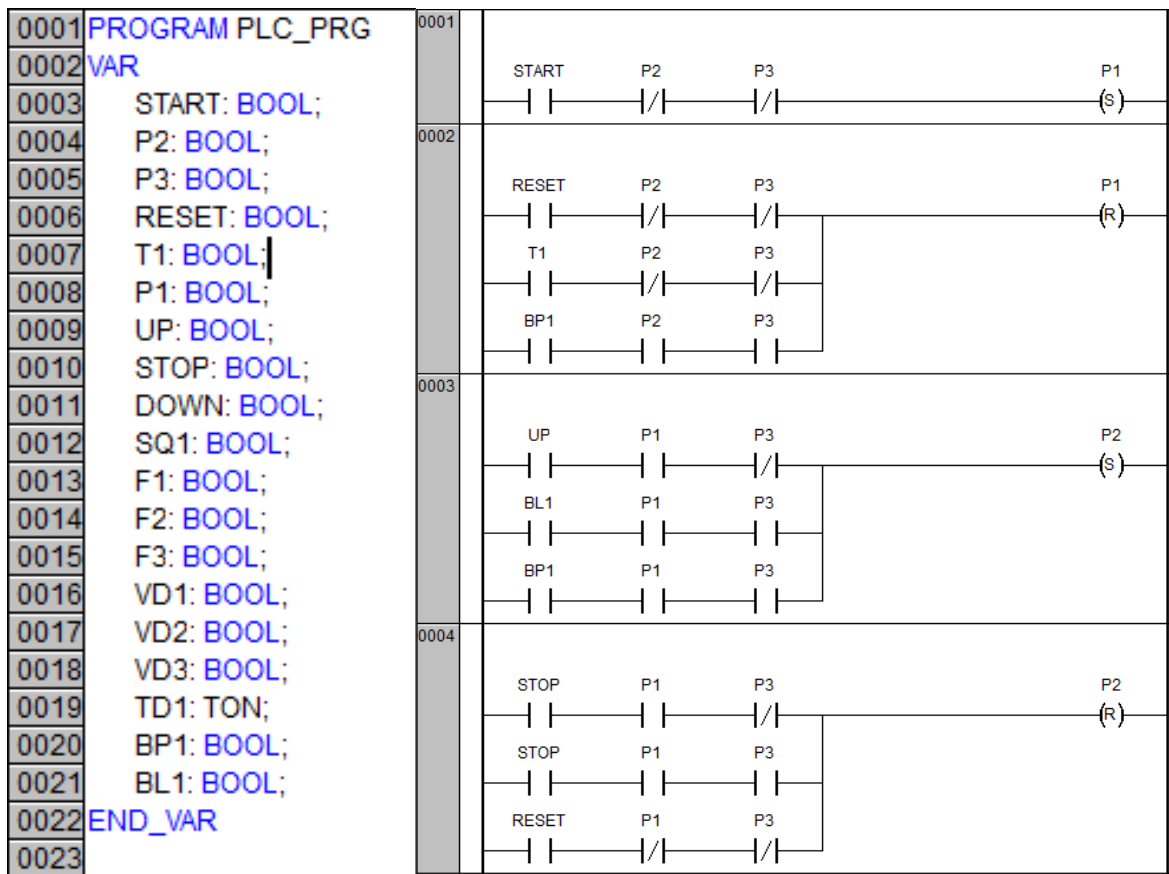


Рисунок 6.4 – Пропис змінних, їх тип та частина програми на мові LD

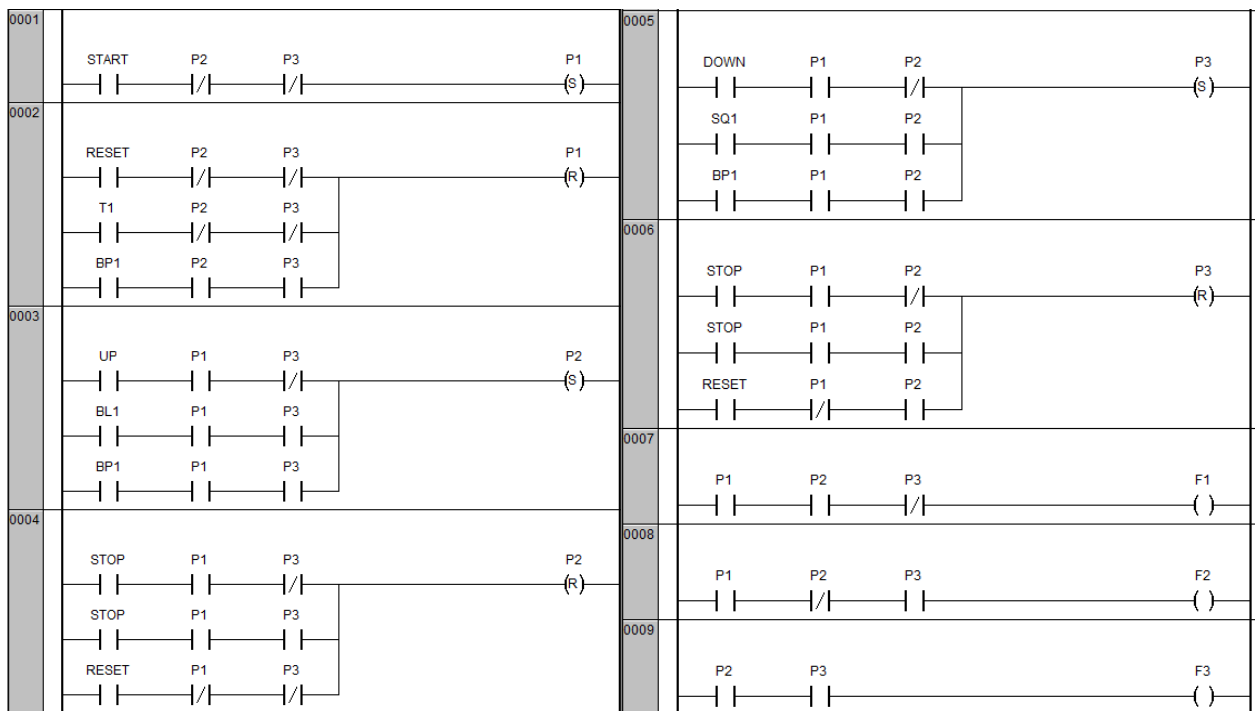


Рисунок 6.5 – Частина програми на мові LD

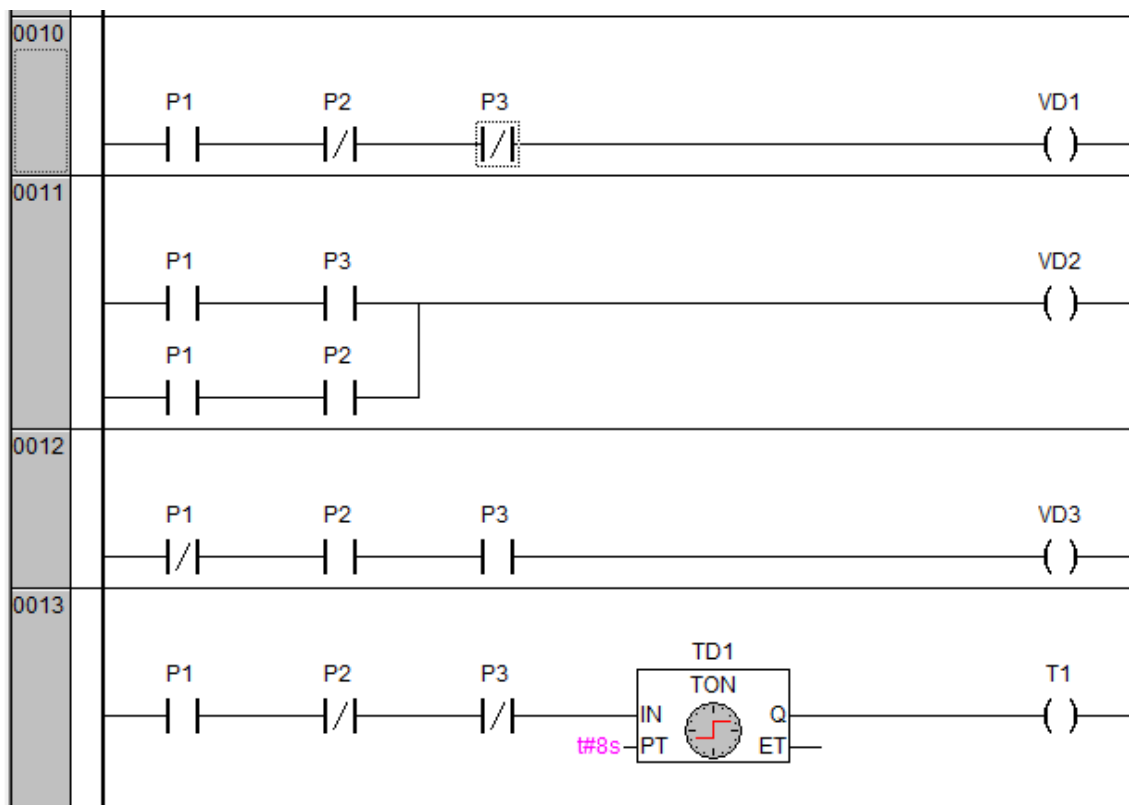


Рисунок 6.6 – Частина програми на мові LD

Для перевірки наведеної програми складається наступна візуалізація рис. 6.7, метою створення якої є наглядна демонстрація перемикання між станами та відповідність вихідних сигналів виконуваним процесам:

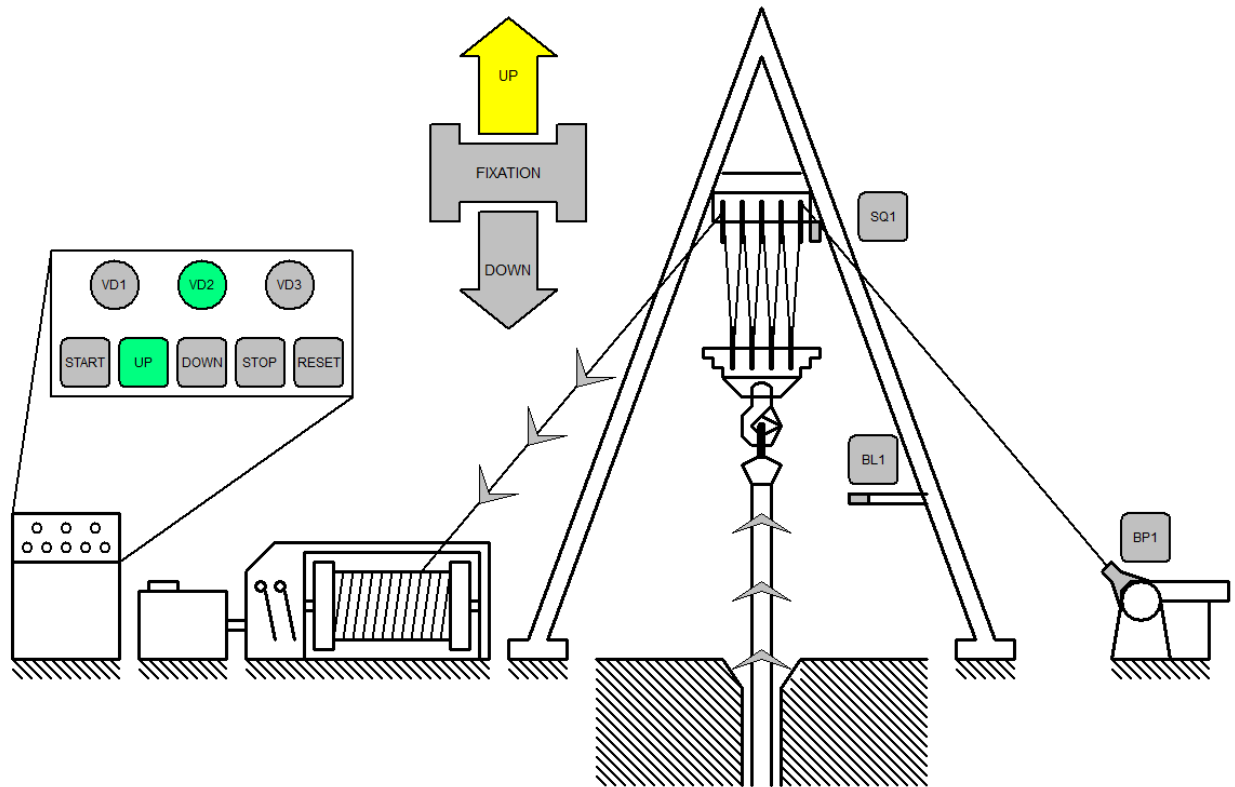


Рисунок 6.7 – Візуалізація спуско-підйомного комплексу бурової установки

Висновок по розділу 6

1. Складено технічне завдання до системи автоматизації спуско-підйомного комплексу, визначено та обрано тип датчиків що будуть використовуватись в буровій установці. За умовою технічного завдання, були синтезовані рівняння вихідних змінних.

2. Обрано ПЛК відповідно до задач керування в програмному середовищі CoDeSys; для поставленої задачі обрана мова LD (Ladder Diagram). Складену програму перевірено вбудованою в програмне середовище візуалізацією. Виконані в даному розділі розрахунки дають змогу здійснити автоматизацію СПК бурової лебідки.

ВИСНОВКИ

1. В даному дипломному проекті була здійснена модернізація електроприводу лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки шляхом заміни нерегульованого електроприводу на регульований асинхронний електропривод з непрямым векторним керуванням, що дає змогу суттєво покращити регульовальні властивості і забезпечити підвищення техніко-економічних показників процесу буріння свердловин.

2. Розглянуто основні особливості спуско-підйомного комплексу та бурової установки, на основі чого було сформульовано основні вимоги до електроприводу та системи автоматизації.

3. Проведено аналіз руху механічних частин спуско-підйомного комплексу бурової установки в статичних і динамічних режимах, в результаті отримано навантажувальну діаграму роботи привода та розрахункове значення необхідної потужності двигуна для його подальшого вибору.

4. Здійснено вибір силового обладнання, яке буде застосовуватись в даному проекті та перевірено його за перевантажувальною здатністю. Обрано перетворювач та інші силові компоненти, які забезпечують керування двигуном та його захист, розглянуто принципову схему перетворювача. Обрані компоненти використовуються при складанні схеми електричної принципової.

5. Розглянуто математичну модель короткозамкненого асинхронного двигуна та алгоритм непрямого векторного керування швидкістю. Розраховано параметри схеми заміщення обраного двигуна, що використовується для дослідження методом математичного моделювання.

6. Виконано дослідження динамічних характеристик системи методом математичного моделювання в програмному пакеті MATLAB, а саме: відпрацювання заданої траєкторії швидкості другого порядку з накиданням статичного моменту. Досліджено процес гальмування до нульової швидкості з утриманням моменту навантаження, а також досліджено роботу привода з

генераторним статичним моментом. Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок, що досліджуваний електропривод повністю відповідає вимогам, поставленим до бурової установки.

7. Розроблено систему автоматизації спуско-підйомного комплексу бурової установки. За умовою технічного завдання були синтезовані рівняння вихідних змінних. Обрано ПЛК, складену програму, яку в подальшому перевірено вбудованою в програмне середовище візуалізацією. Розроблена система автоматизації дає змогу полегшити роботу працівників при спуско-підйомних операціях в процесі буріння скважин.

8. За результатами проектування електроприводу лебідки спуско-підйомного комплексу бурової установки можна зробити висновок, що завдання бакалаврської роботи виконано. Розроблений електропривод відповідає всім вимогам, поставленим перед ним і виконує свої функції належним чином.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко В.С. Проектування експлуатації нафтових свердловин: підручник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002. – Частина 1. – 231 с.
2. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин : навч. посіб. / О.І. Політучий. – Полтава :ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2021. – 170 с.
3. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурове і технологічне обладнання. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2021. – 358 с.
4. Довідник з нафтогазової справи/За заг. ред. докторів технічних наук В.С. Бойка, Р.М.Кондрата, Р.С.Яремійчука.-К.: Львів, 1996.-с. 620.
5. Попович М. Г. Теорія електропривода: [Підручник]/За ред. Поповича М.Г.–К.: Вища школа, 1993. – 494 с
6. Заміховський, Л. М. Аналіз потужності електропривода бурових установок при проходці тріщинуватих гірських порід / Л. М. Заміховський, О.А.Шаповал // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2012. - № 3. - С. 63-72.
7. Методика розрахунків на міцність і визначення максимальних еквівалентних напружень в кронблочних шківках URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/334784200.pdf> (дата звернення 17.05.2023).
8. Методичний посібник “Буріння скважин на корисні копалини” URL:https://trrkk.nmu.org.ua/ua/peda_job/bstkk/3.%20М.%20пособие%20сам.%20раб.%20БС.pdf (дата звернення 17.05.2023).
9. Електропривід бурових лебідок URL: <https://studfile.net/preview/2194372/page:10/> (дата звернення 17.05.2023).
10. Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник / А.Є. Кравчик, М.М. Шлаф, В.І. Афонін, Є.А. – М.: Енерговидав, 1982.–504 с.
11. Каталог перетворювачів АВВ промислового призначення серії ACS880 URL:

https://library.e.abb.com/public/c98a10047eb5433d82cf8eb93272b8b1/RU_ACS880_single_drives_catalog_3AUA0000107530_RevN.pdf (дата звернення 17.05.2023).

12. Посібник по монтажу та вводу в експлуатацію ACS880-17 URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AXD50000028701&LanguageCode=ru&DocumentPartId=1&Action=Launch> (дата звернення 17.05.2023).

13. Плавкий запобіжник Eaton Bussmann 170M66413 3 шт. URL: <https://www.eaton.com/gb/en-gb/skuPage.170M6413.html> (дата звернення 17.05.2023).

14. Автоматичний вимикач ABB T5N 630 TMA 500-5000 3р FF 1 шт. URL: <https://new.abb.com/products/ru/1SDA054456R1/t5n-630-tma-500-5000-3p-f-f> (дата звернення 17.05.2023).

15. Пересада С.М. Узагальнена теорія непрямого векторного керування асинхронним двигуном. Частина I. Проблема векторного керування в асинхронному електроприводі: короткий огляд і формулювання проблеми. // Техн. електродинаміка. – 1999. – №2. – С. 27–32.

16. Пересада С.М. Узагальнена теорія непрямого векторного керування асинхронним двигуном. Частина II. Синтез алгоритму відпрацювання модуля потоку та кутової швидкості. // Техн. електродинаміка. – 1999. – №4. – С. 26–31.

17. Теорія мехатронних систем: розрахунково-графічна робота: навчальний посібник за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.М.Пересада, С. М. Ковбаса. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 95 с.

18. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

19. Пересада С.М. Керування електроприводами: конспект лекцій. Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2000.
20. Кінцевий вимикач АBB LS32P11B11 1 шт. URL: <https://new.abb.com/products/ru/1SBV010311R1211/ls32p11b11> (дата звернення 17.05.2023).
21. 6.2 Фотоелектричний датчик WSE2S-2P3130 1 шт. URL: <https://www.sick.com/pl/ru/photoelectric-sensors/photoelectric-sensors/w2/wse2s-2p3130/p/p340657> (дата звернення 17.05.2023).
22. 6.3 Тензодатчик KELI DFEB 1 шт. URL: <https://keli.com.ua/ru/product/tenzodatchik-dfeb/> (дата звернення 17.05.2023).
23. 6.4 Операційний підсилювач INA125 1 шт. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf> (дата звернення 17.05.2023).
24. Кнопка без фіксації LAY5-BA41 5 шт. URL: https://www.volta.com.ua/catalog/item/knopka_upravleniya_lay5_ba41_bez_pods_vetki_krasnaya_iz_iek/ (дата звернення 17.05.2023).
25. Сигнальний світлодіод LED E.AD16.12. 3 шт. URL: <https://electro-market.com.ua/ctproduct/signalnaya-lampa-led-e-ad16-12-green-ac-dc-12v-zelenaya-s009009-e-next.html> (дата звернення 17.05.2023).
26. Блоки живлення MEAN WELL серії HDR 3 шт. URL: <https://meanwell.kiev.ua/ua/g1754184-bloki-pitaniya-din> (дата звернення 17.05.2023).
27. Автоматизація технологічних процесів, установок і комплексів – 1: Методичні вказівки до виконання домашньої контрольної роботи для студентів денної форми навчання напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка", спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" денної форми навчання / Уклад. С.О. Бур'ян – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 62 с.
28. 6.5 ПЛК АBB ACS-eCo V2 PM564-RP 1 шт. URL: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac500-eco/cpus> (дата звернення 17.05.2023).

ДОДАТОК А