

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ ” 2020 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)

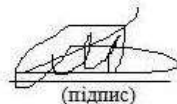
на тему: «Автоматизований електропривод клітьової шахтної підйомної
установки»

Виконав : студент 4 курсу, групи ЕП-61-1

(шифр групи)

Сенюк Микола Юрійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

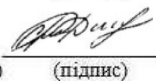
Керівник: к.т.н., старший викладач Димко Сергій Сергійович

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

(підпис)

Консультант

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


(підпис)

Рецензент асистент, к.т.н. Монахов Є.А.

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


(підпис)

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

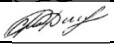
Студент (-ка)

(підпис)

Київ – 2020 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.6108.017.БР	Пояснювальна записка	70	
3	A1	141.6108.017.БР	Загальний вид елементів підйомної установки	1	
4	A1	141.6108.017.БР	Схема підключення	1	
5	A1	141.6108.017.БР	Моделювання, та дослідження статичних і динамічних характеристик	1	

				141.6108.017.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту		
Розробник	Сенюк М.Ю.					
Керівник	Димко С.С					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.			КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-61		
					Лист	Листів
					2	

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: «Автоматизований електропривод клітьової шахтної підйомної
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 ПЕРЕСАДА

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Сенюка Миколи Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизований електропривод клітьової шахтної підйомної установки

_____ ,

керівник проекту : к.т.н., старший викладач Димко Сергій Сергійович,

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

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2020 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 05.06.2020 р.

3. Вихідні дані до проекту Річна продуктивність 300000 т/рік, глибина шахти 800 м. максимальна швидкість підйому посудини 8 м/с

4. Зміст пояснювальної записки 1. Аналітичний огляд. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3. Вибір електродвигуна та силового обладнання. 4. Розробка системи векторного керування та її структурна схема. 5. Охорона праці та техніка безпеки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Загальний вид елементів підйомної установки. 2. Схема підключення 3. Моделювання, та дослідження статичних і динамічних характеристик

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 13.03.2020 р.

Календарний план

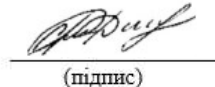
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд	01.04.20	
2	Визначення потрібної потужності електродвигуна	20.04.20	
3	Вибір електродвигуна та силового обладнання	05.05.20	
4	Розробка системи векторного керування та її структурна схема	28.05.20	
5	Охорона праці та техніка безпеки	31.05.20	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	05.06.20	

Студент



Сенюк Микола Юрійович

Керівник проекту


(підпис)

Димко Сергій Сергійович

РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається з 70 сторінок, 12 рисунків, 4 таблиць, списку використаної літератури з 17 джерел.

В даному дипломному проекті проводився процес автоматизації електроприводу шахтної підйомної установки. Синтезовано систему непрямого векторного керування швидості та потокозчепленням асинхронного двигуна. Методом математичного моделювання було досліджено динамічні та енергетичні характеристики електромеханічної системи при відпрацюванні циклу реального руху шахтної підйомної установки. Розроблено схему електричну принципову підключення електроприводу.

ШАХТНА ПІДЙОМНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОПРИВІД,
СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, НЕПРЯМЕ
ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, SIMULINK.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Розробив	Сенюк.М.Ю				Автоматизований електропривод клітьової шахтної підйомної установки Реферат	Лит.	Лист	Листов
Провірів	Димко С.С.							
Реценз.						КПІ, ФЕА, ЕП-61-1		
Н. Контр.	Ковбаса С. М.							
Утверд.	Пересада С. М.							

ABSTRACT

The degree project contains 70 pages, 12 figures, 4 tables, list of used literature that contains 17 positions.

This diploma project carried out the process of automation of the electric drive of a mine lifting plant. Was synthesized system of indirect flux oriented control. The method of mathematical simulation was used to study the dynamic and energetic characteristics of electromechanical system when we model when working out the cycle of the real movement of the a mine lifting plant.

The scheme of electric basic connection of the electric drive was developed.

MINE LIFTS, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, ELECTRICDRIVE, INDIRECT
FIELD ORIENTED CONTROL, MODELING, SIMULINK.

Лист	Дата	№ докум.	Подпись	Дата				
ПрРозробив		Seniuk M.U.			Automated electric drive of the cage mine Abstract	Лит.	Разраб.	Листов
Провірів		Dymko S.S.						
Реценз.						КПІ, ФЕА, ЕП-61-1		
Н. Контр.								
Утвердив		Peresada S.M.						

ВСТУП	9
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	
1.1 Загальні відомості про шахтні підйомні установки	10
1.2 Електропривід шахтних підйомних установок.	16
1.3 Огляд систем керування частотно-регульованих електроприводів	17
2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	
2.1 Енергосиловий розрахунок параметрів шахтної підйомної установки.	24
2.2 Вибір кліті та канату.....	28
2.3 Перевірка двигуна, уточнення тахограми і діаграми зусиль	30
3. ВИБІР СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	
3.1 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	36
3.2 Загальні принципи побудови перетворювальної техніки	41
3.3 Схема підключення електроприводу.....	48
4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТА ЇЇ СТРУКТУРНА СХЕМА	51
4.1 Алгоритм непрямого векторного керування АД	54
4.2 Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи	59
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	
Шахтний підйом	64
Список використаної літератури	69

ВСТУП

Шахтна підіймальна установка – Основний транспортний комплекс, що з'єднує підземну частину шахти (шахти) з землею; призначений для транспортування на поверхню корисних копалин і гірських порід, людей, що падають і піднімаються, транспортування гірничого обладнання та матеріалів.

Підйомні установки класифікують: за призначенням - на головні або вантажні (для транспортування корисних копалин), допоміжні або грузоподські (для транспортування породи, матеріалів, обладнання, спуску і підйому людей); за типом стовбура шахти - на вертикальні і похилі; по числу канатів - на одноканатні і багатоканатні; за типом органів навивки - на установки з постійним радіусом навивки (з підйомними машинами з циліндричними барабанами і провідним шківом тертя) і зі змінним радіусом навивки (з підйомними машинами з біциліндричними барабанами); за типом підйомних посудин - на скіпові, клітьові, скіп-клітьові; за ступенем врівноваженості - на урівноважені і неуврівноважені.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальні відомості про шахтні підйомні установки

Шахтний підйом виконує вантажно-транспортний зв'язок підземного гірничого хазяйства з поверхнею шахти через вертикальні або похилі стволи. За допомогою підйомної установки проводяться також огляд і ремонт арміровки і кріплення ствола шахти. Як правило, у великих вугільних шахтах є два-три діючих підйомних обладнання, кожне з яких використовується для конкретних цілей (вивільнення вугілля, скидання кадрів, викид гірських порід тощо), а не для інших резервів. Ритмічна робота всієї шахти залежить від надійних, безперебійних та ефективних робіт з підняття шахт, тому особливі вимоги ставляться до надійності та безпеки підйомного обладнання (від роботи всього електромеханічного обладнання на шахті). [8]. У ланцюзі транспортування шахт із забою до поверхні підйомні установки є найскладнішим та енерговитратним. Вони споживали 40-60% від загальної кількості електроенергії на шахті. Тому підйомник повинен відповідати всім вимогам надійності, економічності та безпеки [1].

Основними параметрами шахтного підйомного обладнання є:

1. Найкраща ємність судна
2. Тривалість циклу та «чистий» час підйому
3. Максимальна швидкість підйому
4. Потужність підйомного двигуна

Кожна шахта, як мінімум, має дві підйомні установки: головний підйом – для видачі корисних копалин і породи, допоміжний підйом – для всіх останніх цілей, в тому числі підйому і спуску людей.

Підйомні установки складаються з підйомних машин, підйомних посудин, сталевих канатів і копрів з напрямними (рисунок 1.1). Підйомні машини намотують і змотують з барабанів канати і переміщують підйомні посудини по

стволу. Посудини рухаються по провідниках, які є напрямними, закріпленими по всій довжині ствола. Як підйомні посудини використовують кліть, скіп, баддю.

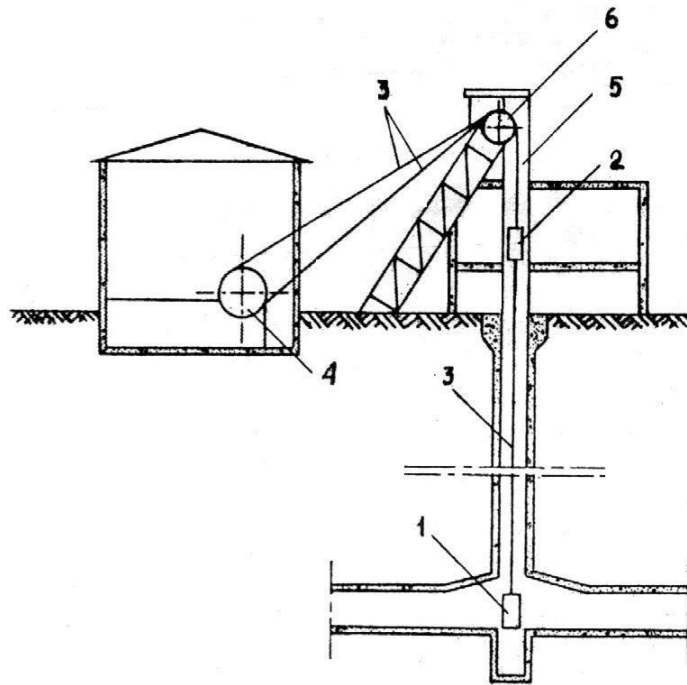


Рисунок 1.1– Схема підйомної установки 1, 2 – підйомні посудини; 3 – канати; 4 – підйомна машина; 5 – копер; 6 – напрямні шківів

Кліті – це одно, дво- або триповерхові коробчасті зварні конструкції з дверима, які відчиняються з двох протилежних боків. Призначені вони для перевезення людей, матеріалів, устаткування. Вантажі транспортуються по стволу у вагонетках. Завантажені вагонетки на рівні приствольного двору заштовхуються в кліть механічними штовхачами, закріплюються спеціальними стопорами, при цьому двері в клітях зафіксовані відчиненими. Вагонетки піднімаються на поверхню і в надшахтній будівлі виштовхуються з кліті порожніми вагонетками, які спускають у шахту.

Якщо в клітях транспортують людей, двері клітей мають бути надійно зачиненими, причому відчинятися лише всередину підйомної посудини і затикатися засувом зовні. Це має робити після посадки людей у кліть

відповідальний за роботу підйому – ствольний. У випадку обриву канату (в аварійній ситуації) кліть гальмується спеціальними парашутними пристроями.

Скіпи складаються з кузова і рами (рисунок 1.2). За формою кузов – це сталевий ящик без верхньої кришки. Залежно від конструкції він може перекидатися, відхилятися і залишатися нерухомим при розвантаженні. В останніх двох конструкціях сипучий вантаж висипається через відкидне дно. На діючих шахтах застосовують скіпи ємністю від 2 до 40 м³, а найбільша вантажопідйомність скіпа становить 55-60 т.

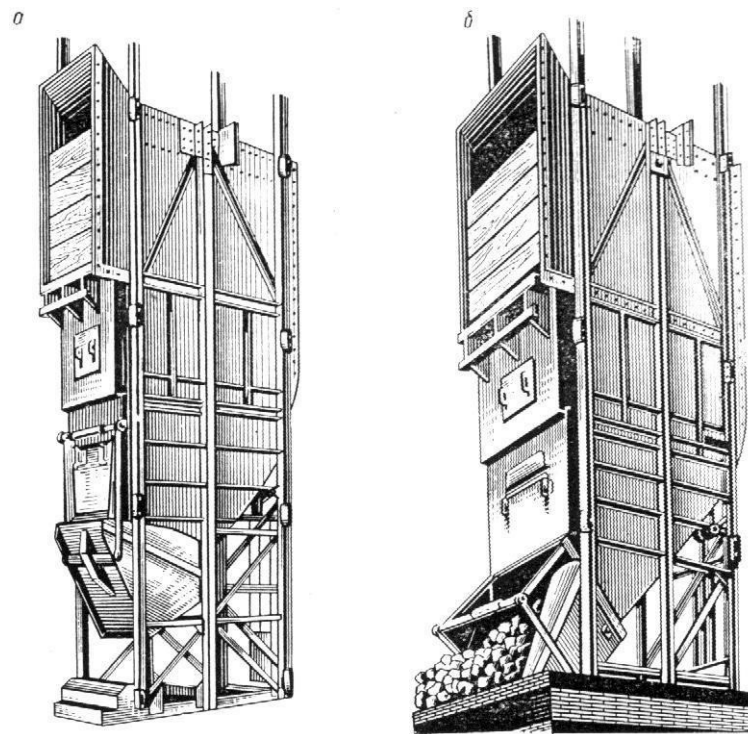


Рисунок 1.2 – Скіп:

а – в закритому стані; б – розвантаження

Навантаження одного скіпа в приствольному дворі і розвантажування другого на поверхні в приємний бункер здійснюється одночасно. Завантажувальні пристрої мають устаткування, яке дозволяє насипати в скіп повну кількість вантажу за масою та об'ємом. Підймання вантажів в скіпах порівняно з клітьовим підйомом у вагонетках продуктивніше, вимагає меншої

тривалості пауз і дозволяє автоматизувати усі процеси. Одним з найвідповідальніших елементів підйомних установок є підйомні канати. Їх виготовляють із сталюого дроту діаметром від 0,5 до 4,0 мм, а діаметр каната змінюється в межах 19,5... 65 мм. На діючих шахтах правила безпеки у вугільних і сланцевих шахтах ставлять вимоги до несучої здатності канатів. Так, запас міцності канатів має бути для людських підйомних установок не нижче 13, а для вантажнолюдських – не нижче 10. За кількістю канатів підйомні установки класифікують на одноканатні і багатоканатні (рисунки 1.3-1.4).

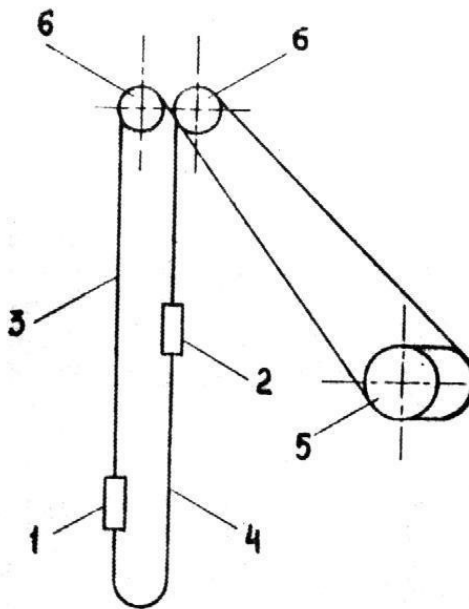


Рисунок 1.3 – Схема одноканатної підйомної установки:

1, 2 – підйомні посудини; 3 – головні канати; 4 – хвостовий канат; 5 – підйомна машина; 6 – напрямні шківів

Найпоширенішою схемою одноканатного підйому є установка з двома канатами (рисунки 1.3), до кінців яких підвішені підйомні посудини (кліті чи скіпи) або посудина і протитяга.

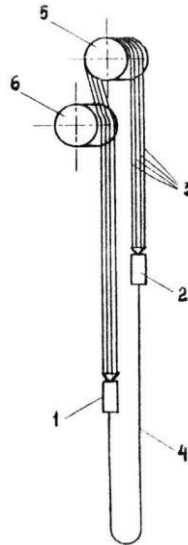


Рисунок 1.4 – Схема багатоканатної підйомної установки:

1, 2 – підйомні посудини; 3 – головні канати; 4 – хвостовий канат; 5 – підйомна машина із шківом тертя; 6 – відхиляючі шків

Для урівноважування мас канатів, що підіймаються, застосовують хвостовий канат, який підвішується під посудину. При обертанні барабана підйомної машини один канат накручується на барабан і підвішена до нього підйомна посудина рухається вгору по стволу. Одночасно другий канат розкручується з барабана і підвішена до нього підйомна посудина опускається. Після того як посудину буде піднято на поверхню і розвантажено, а другу опущено в приствольний двір і завантажено, підйомна машина реверсується і барабан, змінюючи напрям обертання, переміщує за допомогою канатів підйомні посудини в протилежному напрямі.

В багатоканатному підйомі (рисунок 1.4) застосовується підйомна установка з шківом тертя, який перебуває над стволом. До кінців канатів, перекинутих через шків тертя, підвішують дві посудини (кліті або скіпи) і плоский хвостовий канат. Обертаючись, шків тертя переміщує з допомогою канатів посудини у протилежних напрямках. Щоб збільшити площу контакту канатів зі шківом тертя (кут охоплення), застосовують відхиляючі шків.

Тип шахтної підйомної машини залежить від конструкції органів навивки підйомних канатів. По цьому признаку розрізняють типи підйомних машин з циліндричними (одним або двома) барабанами, біциліндроконічними барабанами, зі шківом тертя, багатоканатні. Підйомні машини перших двох типів розміщують в спеціальних машинних будівлях, розташованих поблизу стволів.

Основними вузлами шахтних підйомних машин є: електричний двигун, редуктор, барабан або шків тертя, гальмосистема, допоміжне обладнання управління і контролю.

На шахтах з глибиною до 300...350 м застосовують підйомні машини з циліндричним (одним) барабаном діаметром до 3 м. На глибинах 400...700 м – підйомні машини з двома циліндричними барабанами. При глибині ствола шахти 800...900 м застосовують підйомні машини з біциліндроконічними барабанами, а при глибина більш за 1000 м – підйомні машини зі шківом тертя і багатоканатні. При цьому самі підйомні машини перебувають на спеціальних баштових копрах. До підйомних посудин в стволах, як відмічалось раніше, підвішують хвостовий канат, з допомогою якого зменшується різниця між кінцевими навантаженнями канатів посудин, що опускаються та піднімаються.

На багатьох діючих шахтах підйомні скіпові і клітьові установки автоматизовані і діють в автоматичному режимі без присутності машиніста підйомної машини.

1.2 Електропривід шахтних підйомних установок.

Для привода шахтних підйомних установок в основному використовуються системи привода з машинами змінного струму. Основною вимогою до електроприводу шахтної підйомної установки (ШПУ) є забезпечення виконання необхідної швидкісної діаграми, що дозволяє отримати необхідні динамічні показники в період розгону і під час гальмування, а також при підтягуванні підйомного сосуду до місця розвантаження. Розглянемо основні системи привода підйомних установок: редукторний на базі одного асинхронного двигуна з фазним ротором, редукторний на базі двох вищевказаних двигунів і безредукторний з використанням одного низькообертового двигуна постійного струму.

В 90 % шахтних підйомних установок на території нашої країни використовується привод на базі асинхронного двигуна з фазним ротором з реостатним керуванням.

Двигуни постійного струму використовуються при розрахунковій потужності приводу 2000 та більше кіловат. При цьому частіш за все використовуються відомі системи Г - Д або ТП-Д.

Недоліками системи привода генератор — двигун є наявність двох додаткових електричних машин (генератор і його приводний двигун) з цим пов'язано зниження коефіцієнта корисної дії, досить висока стартова ціна, значні масо - габаритні показники, підвищений рівень шуму, значні втрати на обслуговування двох машин постійного струму.

Недоліки системи тиристорний перетворювач - двигун: викривлення форми кривої живильної напруги, зниження коефіцієнта потужності зі збільшенням діапазону регулювання, для приводу великої потужності має місце підвищений рівень радіоперешкод, наявність машини постійного струму потребує ретельного догляду. Перевагами цієї системи є значний діапазон регулювання швидкості.

1.3 Огляд систем керування частотно-регульованих електроприводів

В якості основного типу регульованого асинхронного електроприводу з двигунами з короткозамкненим ротором розглядається частотно-регульований електропривод, який дозволяє задовольнити вимоги як по діапазону, так і по якості регулювання частоти обертання й відпрацьовувати задані закони руху. Основними елементами частотно-регульованого електроприводу є випрямляч, інвертор, асинхронний чи синхронний двигун та програмований мікроконтролер. Крім цього, використовуються індуктивності і ємності для стабілізації напруги виходу випрямляча та зменшення рівня вищих гармонік.

Частотно-регульований електропривод може бути реалізований з інвертором струму або з інвертором напруги. Крім цього, використовуються схеми з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). У цих схемах застосовується некерований випрямляч, а змінний струм з регульованою частотою і регульованим рівнем напруги формується інвертором. ШІМ зменшує вміст гармонік на виході інвертора струму шляхом покращення форми кривої струму інвертора або форми кривої напруги на виході інвертора напруги.

Крутний момент на валу двигуна повинен мати перетворювач напруги з регульованою частотою та амплітудою в системі електроприводу. У цьому випадку потрібно використовувати закон управління, який забезпечує певне співвідношення напруги та частоти U / f для визначення значення магнітного потоку в машині. Однак такий тип управління не дозволяє отримати очевидну швидкість відгуку двигуна в перехідному стані, що обмежує використання асинхронних двигунів, таких як приводи з регулюванням положення. Для того, щоб електропривод мав достатню швидкість під час перехідного процесу, рекомендується використовувати метод просторового векторного керування полям. Метод заснований на управлінні двома компонентами магнітного поля статора, один з яких забезпечує потік у повітряному зазорі двигуна, а другий забезпечує крутний момент на валу статора. В результаті значення крутного

моменту можна швидко змінити в широкому діапазоні швидкостей. Двигун за допомогою цього способу управління стає подібним до двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Керований компонент при здійсненні цього способу є компонентом струму статора в обертовій системі координат. Мікроконтролер обчислює вектор простору за допомогою моделі, яка враховує параметри певного типу двигуна, такі як опір ротора і статора, індуктивність розсіювання тощо. При цьому також слід враховувати інформацію з датчика швидкості двигуна.

Для будь-якого методу, який використовує значення напруги та частоти в системі приводу для управління, повинен бути перетворювач частоти, який може бути виготовлений відповідно до різних схем. До появи нового покоління силового електронного обладнання для цієї мети тиристорні інвертори можна використовувати для підключення безпосередньо до джерела живлення (кільцеві інвертори), тоді як інвертори з нижчими частотами використовуються - інвертори з очевидною ланкою постійного струму та випрямлювальною структурою Перетворювач частоти. При використанні звичайних тиристорів інвертор напруги повинен бути виконаний з примусовим перемикачем згідно плану. Однак тиристорні перетворювачі мають багато очевидних недоліків, що значно знижують технічні та економічні показники роботи всього електроприводу. Цей недолік спочатку включає, вкрай низькі масогабаритні питомі характеристики широтно-імпульсної модуляції, оскільки частотні характеристики тиристора ускладнюють його. Тому для ефективного управління асинхронними електроприводами низької та середньої потужності необхідно використовувати інвертори напруги з робочими частотами поза діапазоном звукових частот на транзисторах IGBT.

Неконтрольований режим роботи випрямляча та характеристики перемикача регулювання потужності інвертора усувають проблему обмеження похідних di / dt і du / dt струму та напруги в ланцюзі клапана за допомогою величезних керуючих імпульсів. Ефективність застосування частотно-

регульованого асинхронного електроприводу на основі інвертора IGBT з системою управління мікроконтролером (MSU) може бути забезпечена:

- Значно зменшити споживання реактивної енергії мережі;
- Подовжити термін служби електричного, механічного та гідравлічного обладнання;
- Автоматизація та оптимізація управління процесами.

Окрім фактичного двоступеневого перетворення електричної енергії (випрямлення та інвертор), канал живлення також забезпечує функціонування електричного приводу; Аварійне відключення електроприводу від мережі та автоматичне повторне відкриття; Електромагнітна сумісність електроприводів та мереж, включаючи деякі промислові радіоперешкоди. Як правило, для кожної з цих задач існує кілька рішень, які відрізняються схемою та апаратною реалізацією кожного вузла каналу живлення. Застосування тієї чи іншої схеми комутації залежить від системи живлення електроприводу в об'єкті, характеристик мережі, складу та характеристик комутаційного обладнання. При підключенні до мережі електроживлення фільтр повинен бути заряджений, щоб забезпечити електромагнітну сумісність електроприводу та мережі електроживлення, не викликаючи перенапруги та перенапруги до випрямляча, від мережі та її виробництва електроенергії до мережі електроживлення до режиму активного споживання електроенергії, встановленого стандартом, та обмеження струму у разі аварії в випрямлячі та шині постійного струму. Найкращим вибором для забезпечення допустимого значення коефіцієнта вхідної потужності є використання вхідного реактора та реактора в ланцюзі зарядки конденсатора фільтра. Вибравши вхідний дросель і фільтр дроселя постійного струму, несинусоїдальні коефіцієнти напруги та струму мережі можна звести до мінімуму.

Інвертори з перемикачами IGBT або інтелектуальні модулі живлення повинні використовуватися як перетворювачі живлення. Драйвер ключа інвертора безпосередньо підключений до виходу генератора ШІМ мікроконтролера, який працює в режимі широкої імпульсної модуляції

Для вирішення завдань регулювання швидкості і моменту в сучасному електроприводі застосовують два основні методи частотного управління:

скалярний управління;

векторне управління.

Асинхронний електропривод зі скалярним керуванням є на сьогоднішній день найбільш поширеним. Він застосовується в складі приводів насосів, вентиляторів, компресорів та інших механізмів, для яких важливо підтримувати або швидкість обертання валу двигуна (при цьому використовується датчик швидкості), або технологічний параметр (наприклад, тиск у трубопроводі, при цьому використовується відповідний датчик).

Основний принцип скалярного управління - зміна частоти і амплітуди напруги живлення за законом $U / f^n = \text{const}$, де $n \geq 1$. Конкретний вид залежності визначається вимогами, що пред'являються до електроприводу навантаженням. Зазвичай за незалежне вплив приймається частота, а значення напруги при даній частоті визначає вид механічної характеристики, значення пускового і критичного моментів. Скалярний управління забезпечує сталість перевантажувальної здатності електроприводу незалежно від частоти напруги, однак має місце зниження розвивається двигуном моменту при низьких частотах (при $f < 0,1 f_{\text{ном}}$). Максимальний діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору для електроприводів зі скалярним керуванням досягає 1:10.

Метод скалярного управління відносно простий в реалізації, але володіє двома істотними недоліками. По-перше, за відсутності датчика швидкості на валу двигуна неможливо регулювати швидкість обертання валу, так як вона залежить від навантаження. Наявність датчика швидкості вирішує цю проблему, однак залишається другий істотний недолік - не можна регулювати момент на валу двигуна. З одного боку, і цю проблему можна вирішити установкою датчика моменту, однак такі датчики мають дуже високу вартість, часто перевищує

вартість усього електроприводу. Але навіть при наявності датчика управління моментом виходить дуже інерційним. Більш того, при скалярному управлінні не можна регулювати одночасно і момент і швидкість, тому доводиться вибирати ту величину, яка є найбільш важливою для даного технологічного процесу.

Для усунення недоліків, властивих скалярному управлінню, фірмою SIEMENS ще в 1971 році був запропонований метод векторного управління. Перші варіанти електроприводів з векторним керуванням вимагали використання двигунів з вбудованими датчиками потоку. Це істотно обмежувало застосування таких приводів.

В сучасних електроприводах в систему управління закладається математична модель двигуна, яка дозволяє розраховувати момент на валу і швидкість обертання валу. При цьому важливими є тільки датчики струму фаз статора двигуна. Завдяки спеціальній структурі системи управління забезпечується незалежне і практично безінерційною регулювання двох основних параметрів - моменту на валу і швидкості обертання.

На сьогоднішній день сформувалося два основні класи систем векторного керування - бездатчикової системи (без датчика швидкості на валу двигуна) і системи зі зворотним зв'язком за швидкістю. Застосування того чи іншого методу векторного управління визначається областю застосування електроприводу. При невеликих діапазонах зміни швидкості (не більше 1: 100) і вимогах до точності її підтримки не більше $\pm 0,5\%$ застосовують бездатчикової векторне управління. Якщо ж швидкість обертання валу змінюється в широких межах (до 1: 10000 і більше), є вимоги до високої точності підтримки швидкості обертання (до $\pm 0,02\%$ при частотах обертання менше 1 Гц) або є необхідність позиціонування вала, а також при необхідності регулювання моменту на валу двигуна на дуже низьких частотах обертання, застосовують методи векторного управління зі зворотним зв'язком за швидкістю.

При використанні векторного управління досягаються наступні переваги:

- висока точність регулювання швидкості навіть при відсутності датчика швидкості;
- плавне, без ривків, обертання двигуна в області малих частот;
- можливість забезпечення номінального моменту на валу при нульовій швидкості (при наявності датчика швидкості);
- швидка реакція на зміну навантаження: при різких скачках навантаження практично не відбувається стрибків швидкості;
- забезпечення такого режиму роботи двигуна, при якому знижуються втрати на нагрів і намагнічування, а отже, підвищується ККД двигуна.

Поряд з очевидними перевагами, методу векторного управління притаманні і деякі недоліки, такі, як велика обчислювальна складність і необхідність знання параметрів двигуна. Крім того, при векторному керуванні коливання швидкості на постійному навантаженні більше, ніж при скалярному управлінні. Слід зазначити, що існують області, в яких можливе використання тільки скалярного управління, наприклад в груповому електроприводі, де від одного перетворювача харчуються кілька двигунів.

Висновки до розділу 1:

На основі аналізу існуючих шахтних підйомників можна визначити, що найбільш перспективним типом електроприводу є асинхронний електропривод з векторною системою управління.

Клітка приймає ручне та напівавтоматичне управління. Пропускати ШПУ можна керувати в ручному та автоматичному режимах. Несприятливі умови у стовбурі шахти роблять майже неможливим розмістити в ньому електрообладнання, тому всі компоненти системи управління розташовані на землі.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Енергосиловий розрахунок параметрів шахтної підйомної установки.

Необхідну продуктивність можна отримати, змінивши швидкість V (в межах максимально допустимого значення, що залежить від співвідношення $V_{\max} = 0.8\sqrt{H}$) і підняти вантажопідйомність судна (скіпа для вантажопідйомників і клітей для перевезення людей).

Як ми всі знаємо, в Україні є два основні вугільні басейни, і їх мінеральні умови відрізняються, тому в процесі видобутку потрібні різні технічні рішення. Тому у Львівсько-Волинському вугільному басейні середня залягання корисних копалин становить близько 350-400 м, тоді як у Донецькому вугільному басейні глибина вугілля становить переважно 800 -1200 м.

Як відомо, на теренах України знаходиться два основних кам'яновугільних басейни, що відрізняються між собою умовами залягання корисних копалин, а, відповідно, потребують використання різних технічних рішень для процесу їх видобутку. Так у Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн середня залягання корисних копалин порядку 350 – 400 м, в той час як у Донецькому кам'яновугільному басейні вугілля знаходиться переважно на глибинах в 800 – 1200 м.

Вихідні дані для розрахунку орієнтовної потужності електричного привідного двигуна шахтної підйомної установки є:

Річна продуктивність : $A = 300000(m / рік)$

Глибина шахти : $H = 800(м)$

Максимальна швидкість підйому посудини : $V_{\max} = 8(м / с)$

Розрахуємо годинну продуктивність ШПУ для даних параметрів:

$$A_{\text{зод}} = \frac{k_H \cdot A}{z_{\text{зм}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot N_{\text{рік}}} = \frac{1.5 \cdot 300000}{3 \cdot 6 \cdot 300} = 83.33 (\text{м} / \text{зод})$$

Де k_H - коефіцієнт резерву продуктивності

$z_{\text{зм}}$ - кількість змін за добу

$t_{\text{зм}}$ - тривалість однієї зміни

$N_{\text{рік}}$ - кількість робочих днів в році

Наступним кроком являється визначення оптимальної ваги корисної породи що видобувається:

$$Q_{\text{отт}} = 5.7 \cdot A_{\text{зод}} \sqrt[4]{H} = 5.7 \cdot 83.33 \sqrt[4]{800} = 2526 (\text{кг})$$

Визначення орієнтовної потужності електричного привідного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{\lambda \cdot k \cdot g \cdot Q_{\text{отт}} \cdot V_{\text{max}}}{1000 \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{1.1 \cdot 1.2 \cdot 9.81 \cdot 2526 \cdot 8}{1000 \cdot 0.9} = 290.77 (\text{кВт})$$

Виходячи з розрахунків орієнтованої потужності привідного двигуна обираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А355М2У3 з номінальною потужністю $P_n = 315 (\text{кВт})$, номінальною швидкістю обертання ротора $\omega_n = 308 (\text{с}^{-1})$, та номінальним моментом $M_n = 1023 (\text{Н} \cdot \text{м})$. Паспортні дані двигуна наведені у таблиці 2.1 .

$$A_{\text{зод}} = \frac{k_H \cdot A}{z_{\text{зм}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot N_{\text{рік}}} = \frac{1.5 \cdot 300000}{3 \cdot 6 \cdot 300} = 83.33(m / \text{зод})$$

Де k_H - коефіцієнт резерву продуктивності

$z_{\text{зм}}$ - кількість змін за добу

$t_{\text{зм}}$ - тривалість однієї зміни

$N_{\text{рік}}$ - кількість робочих днів в році

Наступним кроком являється визначення оптимальної ваги корисної породи що видобувається:

$$Q_{\text{онм}} = 5.7 \cdot A_{\text{зод}} \sqrt[4]{H} = 5.7 \cdot 83.33 \sqrt[4]{800} = 2526(\text{кг})$$

Визначення орієнтовної потужності електричного привідного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{\lambda \cdot k \cdot g \cdot Q_{\text{онм}} \cdot V_{\text{max}}}{1000 \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{1.1 \cdot 1.2 \cdot 9.81 \cdot 2526 \cdot 8}{1000 \cdot 0.9} = 290.77(\text{кВт})$$

Виходячи з розрахунків орієнтованої потужності привідного двигуна обираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А355М2У3 з номінальною потужністю $P_n = 315(\text{кВт})$, номінальною швидкістю обертання ротора $\omega_n = 308(\text{с}^{-1})$, та номінальним моментом $M_n = 1023(\text{Н} \cdot \text{м})$. Паспортні дані двигуна наведені у таблиці 2.1 .

Таблиця 2.1 Паспортні дані двигуна 4A355M2Y3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 315(\kappa Bm)$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380(B)$
Число пар полюсів	$p_n = 1$
Момент інерції	$J_d = 3.2(\kappa z \cdot m^2)$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.93$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.91$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 1.9$
Номінальне ковзання	$S_{ном} = 0.02$
Критичне ковзання	$S_{\kappa} = 0.075$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(Гц)$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}_1' = 0.088$
Активний опір статора	$\bar{R}_1' = 0.013$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}_2'' = 0.11$
Приведений Активний опір ротора	$\bar{R}_2'' = 0.011$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_{\mu} = 2.1$

2.2 Вибір кліті та канату

Підйомна кліть ШПУ – кліть, що використовується для підйому та переміщення корисних копалин, порід, персоналу, матеріалів і устаткування в шахтах. Підйомні кліті з використанням парового приводу були введені в експлуатацію на початку 19 століття, а вже в кінці цього ж століття почалось використання підйомних клітей з електричним приводом. Пристосування для підйому клітки застосовують для вертикальних або похилих головних, допоміжних і бічних валіз, виконують функції головного, допоміжного та оглядового підйомника. Є одинарний трос і підйомний каркас з декількома канатами. В підйомних клітях можуть бути використанні підйомні машини з постійним радіусом навивка (циліндричні барабани, шків тертя) або зі змінним радіусом (конічні, циліндричні барабани, з бабинами). В якості привідних двигунів використовуються асинхронні двигуни або двигуни постійного струму. Відповідно до кількості накладених контейнерів, є дві клітки або одна клітка з вагою для підйому.

Виходячи з розрахованої оптимальної ваги корисного вантажу було обрано кліть типу 1УКН 2,5-1 з вантажопідйомністю 3000 кг, масою 2670 кг.

Вибираючи дротяні канати та кабелі, слід враховувати умови експлуатації. На вибір конкретного типу мотузки впливають дві основні характеристики:

- Межа безпеки для безперебійної роботи дротяного канату;
- Діаметр тіла обмотки, діаметр мотузки та її рекомендоване співвідношення.

Щоб продовжити термін експлуатації сталевго дротяного троса в суворих умовах, застосовується спеціальний захисний шар і мастило для захисту металу від корозії. Більше того, надійність та термін служби дротяного канату буде сильно відрізнятися від матеріалу дротяної основи.

Розрахунок піднімального каната зводиться до визначення маси одного погонного метра каната, яка визначається за формулою:

$$P = \frac{Q_n + Q_c}{\frac{\delta_s}{m \cdot q \cdot \beta_0} - H_k} \text{ кг / м};$$

де

Q_n - маса корисного вантажу, піднімається в кліті, кг;

Q_c - маса кліті, кг;

δ_s - границя міцності матеріалу канату на розрив, Н / мм²;

m – бажана маса каната, кг;

q - запас міцності каната (для грузоподібного підйому);

β_0 - умовна щільність каната, кг/м³

H_k - повна довжина відводу каната, м.

Виконуємо розрахунок:

$$P_k = \frac{2526}{\frac{100 \cdot 10^6}{0.25 \cdot 9.81 \cdot 9400} - 800} = 1.4688 (\text{кг} / \text{м})$$

З каталога обираємо канат з погоною вагою 1.5 кг/м що відповідає вимогам обраного типу ШПУ.

2.3 Перевірка двигуна, уточнення тахограми і діаграми зусиль

Вихідні дані згідно варіанта представлені у наступні таблиці:

$Q_n=2526$ кг	Маса вантажу;
$H=800$ м	Висота підйому;
$V_{\max} = 8$ м / с	Максимальна швидкість;
$a=1$ м/с ²	Прискорення;
$q_k=1,5$ кг/м	Погонна вага канату;
$\eta=0.9$	ККД.
$m_0 = 2670$ кг	Маса кабіни;

Діаграми зусиль будуються на основі рівняння динаміки руху відносно лінійного переміщення посудин. Для статично врівноваженої вибраної підйомної машини зусилля визначається за формулою:

$$F_{дв} = k_B F_B + m' \cdot a$$

де $k_B = 1.2$ – вантажний коефіцієнт;

F_B – вага вантажу;

m' – маса рухомих частин, приведена до кола навивання канату;

$a = a_{дон} = 1$ м/с² – прискорення (сповільнення) посудини.

Оберемо трапеційдальну тахограму руху ШПУ.

$$t_{\Pi} = \frac{V_{\max}}{a} = \frac{8}{1} = 8(c)$$

$$t_{\Gamma} = \frac{V_{\max}}{a} = \frac{8}{1} = 8(c)$$

$$H_{\Pi} = \frac{a \cdot t_{\Pi}^2}{2} = \frac{1 \cdot 8^2}{2} = 32(м)$$

$$H_{\Gamma} = \frac{a \cdot t_{\Gamma}^2}{2} = \frac{1 \cdot 8^2}{2} = 32(м)$$

$$H_y = H - H_{\Gamma} - H_{\Pi} = 800 - 32 - 32 = 736(м)$$

$$t_y = \frac{H_y}{V_{\max}} = \frac{736}{8} = 92(с)$$

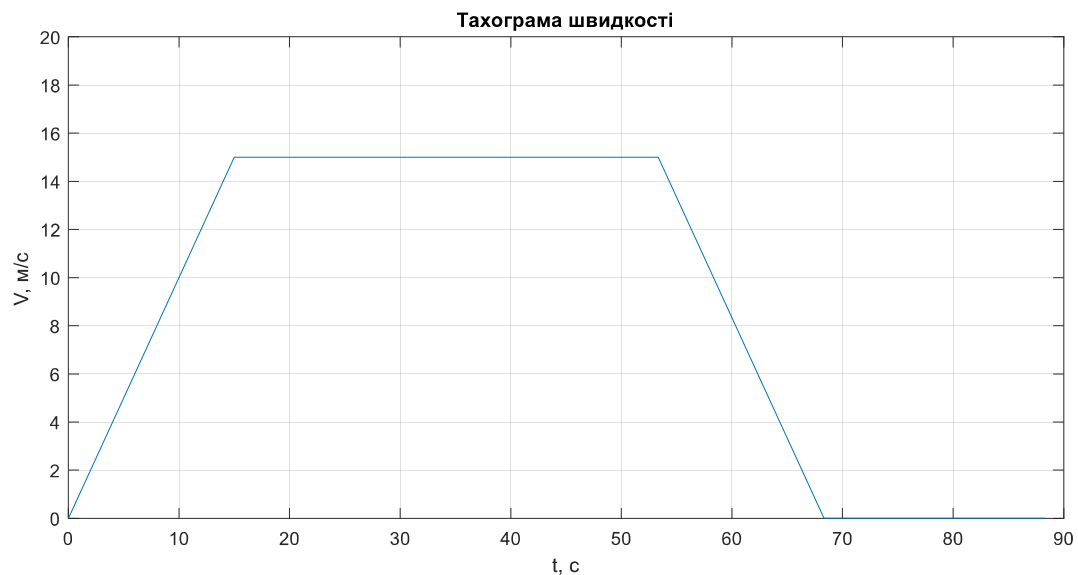


Рисунок 2.1 - Тахограма швидкості кабіни ШПУ

Для врівноваженої машини вага вантажу, що знаходиться у підйомній посудині дорівнює:

$$F_B = Q_B \cdot g = 2526 \cdot 9.81 = 24782H$$

Приведена маса рухомих частин складається з приведених мас ротора двигуна – $m'_{дв}$, редуктора – $m'_{ред}$, підйомної машини – $m'_{пм}$, тягових і врівноважувальних канатів – $(p \cdot n_k + p_x \cdot n_x) \cdot H$, скіпів – $m_{ск}$ (для урівноваженого підйому) і корисного вантажу – m_B

$$m' = m'_{ДВ} + m'_{ред} + m'_{ПМ} + (p \cdot n_k + p_x \cdot n_x) \cdot H + m_{ск} + m_B$$

На попередньому етапі розрахунку статичних характеристик ШПУ, коли потужність і тип привідного електродвигуна ще не визначені, точне значення приведенного моменту інерції ШПУ невідоме, оскільки воно залежить від значення моменту інерції ротора ще не вибраного електродвигуна.

В такому разі користується наступними рекомендаціями, згідно з якими: при $V \leq 2 \text{ м/с}$ приведений момент інерції ШПУ $J_{\Sigma} = (1.2 \div 1.6) J_{рот дв}$ при $V > 2 \text{ м/с}$, $J_{\Sigma} = (2 \div 5) J_{рот дв}$.

Так як швидкість руху ШПУ перевищує 2 м/с , то момент інерції двигуна знайдемо за наступною формулою:

$$J_{ДВ} = \frac{1}{5} (J'_p + J'_{ПМ}) = \frac{1}{5} (11.25 + 15) = 5.25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$\text{де } J'_p = \frac{J_p}{i_p^2} = \frac{4500}{20^2} = 11.25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 - \text{момент інерції редуктора приведений до}$$

валу двигуна;

$$J'_{ПМ} = \frac{J_p}{i_p^2} = \frac{6000}{20^2} = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 - \text{момент інерції підйомної машини}$$

приведений до валу двигуна;

Приведена маса двигуна дорівнює

$$m'_{ДВ} = J_{ДВ} \left(\frac{2 \cdot i_p}{D_{III}} \right)^2 = 5.25 \left(\frac{2 \cdot 20}{2.25} \right)^2 = 1660 \text{ кг}$$

Приведена маса редуктора становить:

$$m'_{ред} = J_P \left(\frac{2}{D_{III}} \right)^2 = 4500 \left(\frac{2}{2.25} \right)^2 = 3555 \text{ кг}$$

Приведена маса підйомної машини знаходиться за формулою:

$$m'_{ПМ} = J_{ПМ} \left(\frac{2}{D_{III}} \right)^2 = 6000 \left(\frac{2}{2.25} \right)^2 = 4740 \text{ кг}$$

Після підстановки отриманих значень приведених мас сумарна приведена маса дорівнює

Після підстановки отриманих значень приведених мас сумарна приведена маса дорівнює

$$\begin{aligned} m' &= m'_{ДВ} + m'_{ред} + m'_{ПМ} + (p \cdot n_k + p_x \cdot n_x) \cdot H + m_{сх} + m_B = \\ &= 1660 + 3555 + 4740 + (0.345 \cdot 4 + 0.69 \cdot 2) \cdot 800 + 2670 + 1262.9 = 16096 \text{ кг} \end{aligned}$$

Зусилля під час прискорення відповідно становить

$$F_{ДВ1} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 + 16096 \cdot 1 = 45834 \text{ Н}$$

Зусилля при рівномірному русі дорівнює

$$F_{ДВ2} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 + 16096 \cdot 0 = 29738 \text{ Н}$$

Зусилля під час сповільнення має значення

$$F_{ДВ3} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 - 16096 \cdot 1 = 13642 \text{ Н}$$

Приведена маса редуктора становить:

$$m'_{ред} = J_P \left(\frac{2}{D_{III}} \right)^2 = 4500 \left(\frac{2}{2.25} \right)^2 = 3555 \text{ кг}$$

Приведена маса підйомної машини знаходиться за формулою:

$$m'_{ПМ} = J_{ПМ} \left(\frac{2}{D_{III}} \right)^2 = 6000 \left(\frac{2}{2.25} \right)^2 = 4740 \text{ кг}$$

Після підстановки отриманих значень приведених мас сумарна приведена маса дорівнює

Після підстановки отриманих значень приведених мас сумарна приведена маса дорівнює

$$\begin{aligned} m' &= m'_{ДВ} + m'_{ред} + m'_{ПМ} + (p \cdot n_k + p_x \cdot n_x) \cdot H + m_{ск} + m_B = \\ &= 1660 + 3555 + 4740 + (0.345 \cdot 4 + 0.69 \cdot 2) \cdot 800 + 2670 + 1262.9 = 16096 \text{ кг} \end{aligned}$$

Зусилля під час прискорення відповідно становить

$$F_{ДВ1} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 + 16096 \cdot 1 = 45834 \text{ Н}$$

Зусилля при рівномірному русі дорівнює

$$F_{ДВ2} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 + 16096 \cdot 0 = 29738 \text{ Н}$$

Зусилля під час сповільнення має значення

$$F_{ДВ3} = k_B F_B + m' \cdot a = 1.2 \cdot 24782 - 16096 \cdot 1 = 13642 \text{ Н}$$

Ефективна потужність електродвигуна підйомної установки обчислюється на основі розрахованої тахограми та діаграми зусиль:

$$\begin{aligned}
 P_{ef} &= \frac{V}{\eta_{ред}} \sqrt{\frac{(F_{ДВ1}^2) \cdot t_1 + (F_{ДВ2}^2) \cdot t_2 + (F_{ДВ3}^2) \cdot t_3}{T_{цеф}}} = \\
 &= \frac{8}{0.9} \sqrt{\frac{(45834^2) \cdot 8 + 29738^2 \cdot 92 + (13642^2) \cdot 8}{108}} = \\
 &= 268 \text{ кВт}
 \end{aligned}$$

Висновки до розділу 2:

На основі заданих параметрів ШПУ розраховано годинну продуктивність та оптимальну вагу вантажу що підіймається. Виходячи з умов експлуатації кліті було побудовано тахограму руху ШПУ та розраховано зусилля що прикладаються до неї. На основі розрахованих зусиль було розраховано орієнтовну потужність привідного двигуна .

3. ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,159 \text{ рад} / \text{с}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.159}{1} = 314.159 \text{ рад} / \text{с}.$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 314.159 \cdot (1 - 0.02) = 307.87 \text{ рад} / \text{с}.$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{315000}{307.87} = 1023.1 \text{ Нм}.$$

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

$$M_k = \lambda M_n = 1.9 \cdot 1023.1 = 1944 \text{ Нм}.$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\phi)} = \frac{315000}{3 \cdot 220 \cdot 0.93 \cdot 0.91} = 563.9 A.$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 B.$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 563.9 = 797.5 A.$$

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

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314.159} = 0.988 Bб.$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

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

$$c_1 = \frac{\overline{X}_\mu + \sqrt{\overline{X}_\mu^2 + 4\overline{X}'_1\overline{X}_\mu}}{2\overline{X}_\mu} = \frac{2.1 + \sqrt{2.1^2 + 4 \cdot 0.088 \cdot 2.1}}{2 \cdot 2.1} = 1.014.$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{X}_1 = \frac{\overline{X}'_1}{c_1} = \frac{0.088}{1.014} = 0.087,$$

$$\overline{R}_1 = \frac{\overline{R}'_1}{c_1} = \frac{0.013}{1.014} = 0.0128,$$

$$\overline{X}_2 = \frac{\overline{X}'_2}{c_1^2} = \frac{0.11}{1.014^2} = 0.107,$$

$$\overline{R_2} = \frac{\overline{R_2}^n}{c_1^2} = \frac{0.011}{1.014^2} = 0.0107$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$X_1 = \overline{X_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.087 \cdot \frac{220}{563.9} = 0.0338 \text{ Ом},$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.0128 \cdot \frac{220}{563.9} = 0.005 \text{ Ом},$$

$$X_2' = \overline{X_2'} \frac{U_n}{I_n} = 0.107 \cdot \frac{220}{563.9} = 0.0417 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \overline{R_2} \frac{U_n}{I_n} = 0.0107 \cdot \frac{220}{563.9} = 0.0042 \text{ Ом},$$

$$X_{\mu} = \overline{X_{\mu}} \frac{U_n}{I_n} = 2.1 \cdot \frac{220}{563.9} = 0.7932 \text{ Ом}.$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.0338}{314.159} = 0,0001077 \text{ Гн},$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2'}{\omega_0} = \frac{0.0417}{314.159} = 0,0001327 \text{ Гн}.$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{\omega_0} = \frac{0.7932}{314.159} = 0.0029 \text{ Гн}.$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0029 + 0.0001077 = 0.003077 \Gamma_H,$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0029 + 0.0001327 = 0.003327 \Gamma_H.$$

Розрахунок значень наступних параметрів

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0042}{0.003327} = 1.492 O_M / \Gamma_H,$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.005}{0.003077} = 1.85 O_M / \Gamma_H,$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.003077 \cdot \left(1 - \frac{0.0029^2}{0.003077 \cdot 0.003327} \right) = 0,000224 \Gamma_H,$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.003327 \cdot \left(1 - \frac{0.0029^2}{0.003077 \cdot 0.003327} \right) = 0,0002266 \Gamma_H,$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0029}{0.003327 \cdot 0,000224} = 4236.3,$$

$$\beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \cdot \sigma_1} = \frac{0.0029}{0.003077 \cdot 0,0002266} = 4236.3,$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.005}{0.000224} + 1.492 \cdot 0.0029 \cdot 4236.3 =$$

$$= 37.6 O_M / \Gamma_H,$$

$$\gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 \cdot L_m \cdot \beta_1 = \frac{0.0042}{0,000236} + 1.85 \cdot 0.0029 \cdot 4236.3 =$$

$$= 37.25 O_M / \Gamma_H,$$

$$\gamma_2 = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta + \alpha = \frac{0.005}{0.000224} + 1.492 \cdot 0.0029 \cdot 4236.3 + 1.492 =$$

$$= 39.1 O_M / \Gamma_H.$$

Таблиця 3.1 - Параметри двигуна 4A355M2Y3

$P_{2H}, \text{кВт}$	315	$R_1, \text{Ом}$	0.005
$\omega_{xx}, \text{рад/с}$	314	$R_2, \text{Ом}$	0.0042
$\omega_H, \text{рад/с}$	307.87	$L_1, \text{Гн}$	0.003077
$M_H, \text{Нм}$	1023.1	$L_2, \text{Гн}$	0.003327
$M_K, \text{Нм}$	1944	$L_\mu, \text{Гн}$	0.0029
λ	1.9	$\alpha_1, \text{Ом/Гн}$	1.85
$I_{H\alpha}, \text{А}$	797.5	$\alpha, \text{Ом/Гн}$	1.492
$\psi_{1xx}, \text{Вб}$	0.99	$\beta, \text{1/Гн}$	4236.3
η	0.93	$\gamma, \text{Ом/Гн}$	37.6
$\cos \varphi$	0.91	$\sigma, \text{Гн}$	0.000224
$J_d \cdot \kappa_2 \cdot m^2$	3.2		

3.2 Загальні принципи побудови перетворювальної техніки

Основним компонентом сучасного інвертора змінного струму є інвертор (ПЧ). Хоча алгоритми управління та апаратне впровадження поточних інверторів різноманітні, ми можемо говорити про типові рішення, якими користуються більшість виробників. Фактично, виробилися негласні стандарти на структуру перетворювачів частоти і виконуваних ними функцій. У загальному випадку можна виділити дві основні завдання, які вирішуються регульованим електроприводом: управління моментом і швидкістю обертання електродвигуна.

Попит на регулювання крутного моменту визначається технічними вимогами електроприводу. Для того щоб привод працював нормально, крутний момент і струм двигуна повинні бути обмежені допустимими значеннями під час переходу між пуском, гальмуванням і прикладанням навантаження. Для механічних пристроїв (таких як електричні приводи прокатних станів), які можуть викликати сильні перевантаження під час роботи, поки робочий орган не заблокований, необхідно постійно регулювати крутний момент двигуна, щоб обмежити динамічне ударне навантаження. У багатьох випадках також необхідно точно виміряти робочий орган (електропривод металообробної машини, намотувальну машину тощо)..

Технічні режими багатьох механізмів виробництва на різних робочих етапах вимагають переміщення робочого органу з різною швидкістю, що забезпечується механічним або за допомогою електричного регулювання швидкості електроприводів. Діапазон регулювання швидкості та точності може змінюватися в межах максимального діапазону, залежно від діапазону електроприводу.

Побудова силової частини

Найбільшого поширення набули перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму, побудовані за схемою випрямляч - автономний інвертор. Принцип роботи та області застосування таких перетворювачів частоти

залежать від типу використовуваного випрямляча і автономного інвертора (інвертор напруги або інвертор струму).

Існує кілька різних схем випрямлячів. За принципом дії вони можуть бути розділені на три групи: керовані, напівкерованих і некеровані. Схемотехнічних все випрямлячі будуються за трифазною мостовою схемою.

Найбільшого поширення набули некеровані випрямлячі. Що їх на найпростіших і дешевих напівпровідникових приладах - діодах, вони характеризуються максимальною простотою і надійністю, високим ККД, а також досить високою якістю вихідного (випрямленого) напруги і гармонійного складу струму, споживаного з мережі. Однак некерованість процесу перетворення енергії не дозволяє реалізувати режими рекуперації, необхідні в багатьох випадках.

Керовані випрямлячі, виконувані зазвичай на низькочастотних тиристорах, позбавлені як недоліків, так і більшості достоїнств діодних випрямлячів. Вони мають високий ККД і властивість оборотності у напрямку перетворення енергії і зазвичай використовуються спільно з автономними інверторами струму для регулювання величини вихідного струму перетворювача. Недоліки керованих випрямлячів полягають в підвищеному рівні пульсацій випрямленої напруги, в зниженому значенні коефіцієнта потужності, який зменшується пропорційно вихідній напрузі, і в односторонньому напрямку вихідного струму. При необхідності забезпечити протікання випрямленого струму в обох напрямках використовують реверсивні тиристорні перетворювачі, що складаються з двох включених зустрічно-паралельно тиристорних випрямлячів, один з яких призначений для протікання струму навантаження в прямому, а інший в зворотному напрямку. Це ускладнює і здорожує перетворювач.

Напівкеровані випрямлячі займають проміжне положення між керованими і некерованими випрямлячами, дозволяючи регулювати значення випрямленої напруги без можливості рекуперації енергії в мережу. У разі керованих і

напівкерованих випрямлячів з'являється можливість відключення силової схеми перетворювачів частоти від мережі без використання додаткового обладнання.

Залежно від типу автономного інвертора контур постійного струму може бути виконаний як ланка, що забезпечує постійну напругу (зазвичай С- або LCфільтр), або як ланка, що підтримує сталість струму (фільтр у вигляді реактора зі значною індуктивністю). Величина ємності конденсатора в ланці постійного струму зазвичай становить 2000-20000 мкФ; такі конденсатори мають великі габарити і високу вартість.

Характерними особливостями автономних інверторів струму є живлення від джерела струму (в ланцюг джерела включений дросель значною індуктивності), обмін реактивної енергією навантаження з комутуючим конденсатором, значне коливання напруги на вході інвертора при постійному струмі джерела, а також залежність форми кривої напруги на виході і вході інвертора від характеру навантаження. АІТ технічно реалізуються простіше, ніж АІН, так як в них відсутній зворотний діодний міст. У перетворювачах частоти на основі АІТ при використанні керованих випрямлячів можлива рекуперація енергії в мережу, що важливо для електроприводів, що працюють в повторно-короткочасних режимах роботи.

Характерним недоліком АІС є те, що він не може працювати на холостому ході (з відключеним двигуном). Крім того, при використанні АІС можливі суттєві втрати потужності і формування додаткових збурюючих моментів в двигуні, що призводять до коливань швидкості. При необхідності формування струмів двигуна, близьких до синусоїдальним, потрібно значне ускладнення схеми АІС.

Особливостями автономних інверторів напруги є живлення від джерела напруги, замикання контуру реактивного струму навантаження через зворотні діоди і незалежність форми кривої напруги на виході інвертора від характеру навантаження. Недоліком АІН є необхідність використання реверсивних випрямлячів для організації рекуперативних режимів роботи електроприводу.

Однак застосування інверторів напруги дозволяє без ускладнення схеми отримати високі енергетичні показники і забезпечити вихідні струми, близькі до синусоїдальним. Саме це зумовлює широке застосування АІН в сучасному електроприводі.

Основним елементом систем управління сучасних перетворювачів частоти є спеціалізований мікроконтролер або цифровий сигнальний процесор (DSP). Побудова системи управління на базі DSP обумовлено необхідністю творити великого обсягу складних обчислень в режимі реального часу для реалізації сучасних алгоритмів управління. Найбільшою мірою це критично для бездатчикового систем векторного керування.

Система управління може бути одна або багатопроцесорною. Однопроцесорні системи мають ряд істотних недоліків: до мікроконтролеру пред'являються підвищені вимоги по наявності вбудованих периферійних модулів і портів введення-виведення, за швидкодією і обсягом пам'яті; значно ускладнюється розробка програмного забезпечення. Однак при вирішенні завдань управління невисокої складності гідністю однопроцесорних систем є простота апаратної і програмної реалізації.

В даний час більшість перетворювачів будуються на двопроцесорній основі. Перший процесор (ЦП1) виконує основні функції перетворювачів частоти (реалізація алгоритмів управління інвертором, випрямлячем, опитування датчиків і т. Д.), Другий (ЦП2) забезпечує роботу пульта управління, зв'язок з системою верхнього рівня і інші сервісні функції. Слід зазначити, що розподіл функцій між мікроконтроллерами може бути вироблено і іншим способом.

Переваги двопроцесорної системи в порівнянні з однопроцесорної - зниження вимог до ЦП1 і ЦП2 по вбудованій периферії, швидкодії і обсягом пам'яті; можливість застосування єдиного інтерфейсу для зв'язку центрального контролера з пультом управління і з системою автоматизації верхнього рівня;

значне спрощення розробки програмного забезпечення для кожного з контролерів.

Управління драйверами інвертора здійснюється за допомогою формування шестиканального ШІМ-сигналу з автоматичним додаванням «мертвого часу». У більшості мікроконтролерів модуль ШІМ реалізований апаратно. Для отримання форми вихідної напруги, близької до синусоїдальної (що особливо критично при скалярному управлінні), може використовуватися програмна або апаратна корекція «мертвого часу». Також в більшості випадків реалізується апаратна блокування сигналів ШІМ в разі аварії. Управління перетворювачем може здійснюватися за допомогою пульта (можливо, віддаленого), дискретних або аналогових входів.

Перетворювачі конструктивно будуються за модульним принципом, що дозволяє вводити в них додаткові функціональні модулі, які в поєднанні з вбудованими програмними засобами дозволяють отримати різну конфігурацію електроприводу, що відповідає вимогам замовника, - від найпростіших розімкнутих до точних замкнених систем позиціонування. Як правило, такі модулі (плати) розширення містять в своєму складі аналогові й дискретні входи і виходи, а також інтерфейси зв'язку.

Всі аналогові входи і виходи на платах розширення мають вбудований джерело живлення і зазвичай виконуються гальванічески розв'язаними від системи управління і дискретних входів і виходів. Функції, що виконуються аналоговими входами і виходами, програмуються з пульта управління. Найбільш часто аналогові входи служать для підключення датчиків зворотного зв'язку за технологічними параметрами (для цих цілей, як правило, передбачається один вхід напруги і один вхід струму). У більшості перетворювачів частоти є також вхід для підключення потенціометра, що використовується як задатчика вихідний частоти (для перетворювачів частоти зі скалярним керуванням) або частоти обертання ротора електродвигуна (для перетворювачів частоти з

векторним керуванням), при цьому для харчування задатчика частоти використовується вбудоване джерело живлення (як правило, 10 В). Можливо також наявність додаткового входу для підключення датчика температури двигуна (терморезистора). Аналогові виходи служать для індикації одного з параметрів стану перетворювача частоти (наприклад, поточної вихідної частоти або розрахункового значення моменту на валу двигуна). Можливість підключення до виходів як вольтметрів, так і амперметрів досягається за рахунок наявності виходу напруги і виходу струму. Вихідні аналогові сигнали формуються за допомогою ЦАП (як правило, 10-бітних); в окремих випадках вихідна напруга формується методом широтно-імпульсної модуляції.

Дискретні входи і виходи на платах розширення використовуються для підключення зовнішніх сигналів, що надходять з електромагнітних реле, а також для формування сигналів управління такими реле. Зазвичай в перетворювачах частоти є від чотирьох до восьми дискретних входів типу «відкритий колектор», що виконують такі функції: вибір однієї з трьох вихідних частот (або швидкостей обертання ротора), управління відключенням і реверсом, аварійне відключення перетворювачів частоти. Всі дискретні входи виконують гальванічно-розв'язаними від системи управління.

Для побудови систем зі зворотним зв'язком за швидкістю в перетворювачах частоти передбачають входи для підключення датчика швидкості типу «енкодер». Модуль сполучення з датчиком швидкості може входити в стандартну поставку перетворювачів частоти або виконуватися у вигляді плати розширення. Для харчування дискретних входів і датчика швидкості використовується вбудоване джерело живлення (зазвичай 24 В).

Перетворювачі легко вбудовуються в сучасні системи автоматизації. Широко використовується управління в реальному часі кількома перетворювачами, для чого пропонуються рішення з різними інтерфейсами зв'язку і топологіями мережі. Більшість перетворювачів частоти комплектується

стандартним інтерфейсом RS-422 або RS-485. При цьому взаємодія здійснюється з використанням протоколів Modbus або Profibus, або їх спрощених модифікацій. При використанні модулів розширення доступні додаткові інтерфейси (наприклад, CAN) і протоколи (Interbus, CANOpen, DeviceNet).

3.3 Схема підключення електроприводу

На основі потужності обраного асинхронного двигуна було обрано перетворювач частоти фірми Schneider Electric серії Altivar 71 з номінальною потужністю 315 кВт. Технічні характеристики перетворювача частоти наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики ПЧ Altivar 71

Потужність двигуна, кВт	315
Число фаз	3
Лінійний струм, А	555
Повна потужність, кВА	365.3
Номінальний струм на виході, А	616
Максимальний перехідний струм, А	1016
Вихідна частота, Гц	0.1...500
Частота комутації, кГц	2.5 ... 8
Тип керування	Векторне з давачем Бездавачеве керування Частотне керування
Точність швидкості	0.01% номінальної швидкості в режимі замкнутого контуру
Тип захисту	Перевищення швидкості Зникнення фази на вході Підвищена напруга живлення Захист від перегріву Перенапруга в ланці постійного струму Тепловий захист

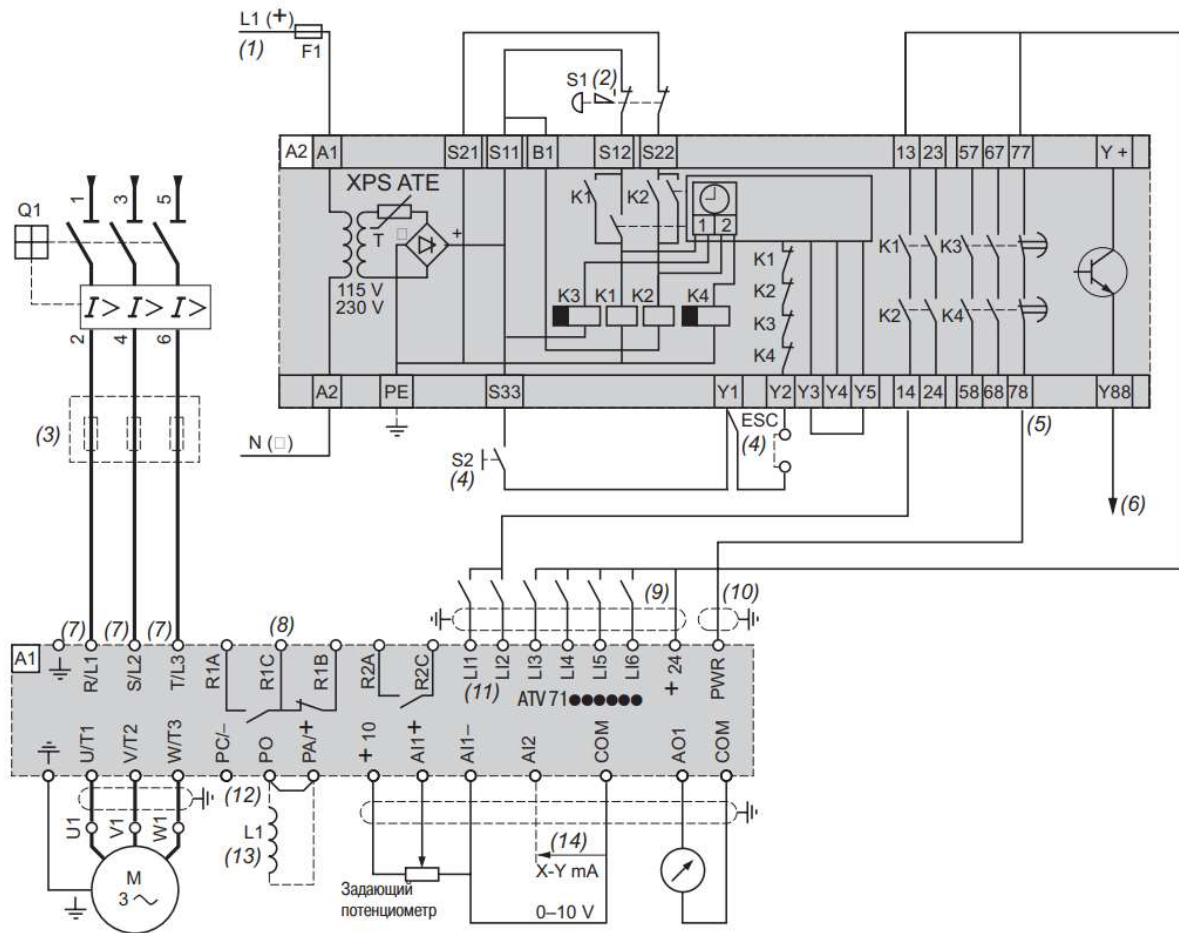


Рисунок 3.1 – Схема підключення перетворювача частоти, двигуна та модулю безпеки.

На рис.3.1 зображена схема підключення електродвигуна шахтної підйомної установки. На схемі зображені:

- A1 – Перетворювач частоти ATV 71
- A2 – Модуль безпеки Preventa XPS AT
- F1 – Запобіжник.
- L1 – Дросель постійного струму.
- Q1 – Вимикач.
- S1 – Аварійний кнопковий вимикач з двома контактами.
- S2 – Кнопка Пуск.
- (1) – Живлення.

- (2) – Команда зупинки.
- (3) – Мережевий дросель HC63Y.
- (4) – S2 повторне включення модулю XPS AT при подачі живлення чи після екстреної зупинки.
- (5) – Для часу зупинки більше 30 с.
- (6) – Дискретний вихід для можливості індикації.
- (7) – Вхідні клеми ПЧ.
- (8) – Контактне реле несправності для дистанційного контролю стану ПЧ.
- (9) – Підключення загального виводу дискретних входів.
- (10) – Коаксіальний кабель.
- (11) – Дискретні входи для завдання напрямку обертання.
- (12) – Клема РО.
- (13) – Додатковий дросель постійного струму.
- (14) – Аналогові входи (0-20 мА та 0 – 10 В)

Висновки до розділу 3:

На основі розрахованої потужності електроприводу було обрано асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором серії 4A355M2Y3 з номінальною потужністю 315 кВт та перевантажувальною здатністю 1.9. Розглянуто вимоги до сучасних електроприводів змінного струму та способи їх виконання. На основі огляну сучасних перетворювачів частоти було обрано перетворювач Schneider Electric серії Altivar 71 з номінальною потужністю 315 кВт та системою векторного керування. Розроблено схему підключення ПЧ та модулю безпеки.

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТА ЇЇ СТРУКТУРНА СХЕМА

Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a – b):

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

де ω – кутова швидкість ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (a – b), $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, v – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб

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

де J – повний момент інерції ротора, R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – опори й індуктивності статора і ротора відповідно, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – число пар полюсів.

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проектуються та записуються в синхронній системі координат $(d - q)$, яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , див. рисунок. 4.1.

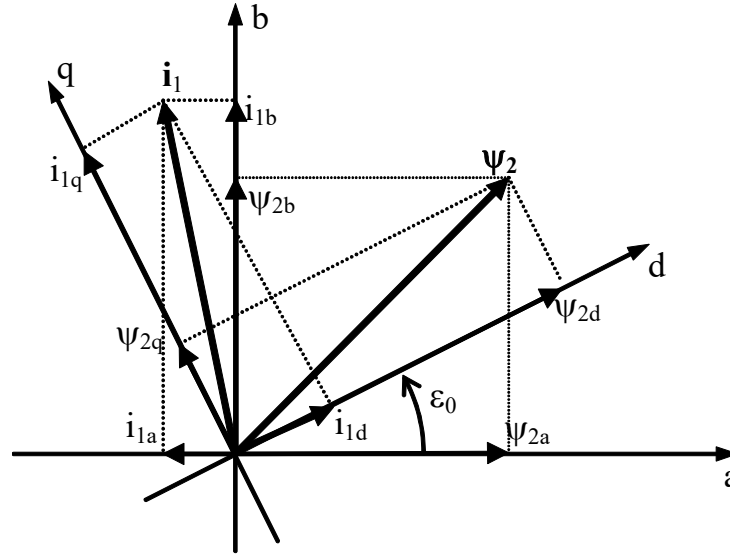


Рисунок 4.1 – Розташування векторів АД

Перетворення координат визначаються:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-j\epsilon_0} \mathbf{x}_{ab} \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{j\epsilon_0} \mathbf{x}_{dq} \end{aligned} \quad \text{де} \quad \mathbf{e}^{-j\epsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\epsilon_0 & \sin\epsilon_0 \\ -\sin\epsilon_0 & \cos\epsilon_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

де $\mathbf{x}_{yz}$ позначає двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ϵ_0 – кутове положення системи координат $(d - q)$ відносно стаціонарної $(a - b)$.

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формулюється наступним чином [1]. Припустимо, що для моделі АД, заданої [5], виконується наступне:

А.1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання.

A2. Параметри АД відомі і незмінні.

A3. Момент навантаження M_c невідомий, постійний та обмежений.

A4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого на непрямого векторного керування які забезпечують

O1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

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

при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних.

O2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d = \psi^*. \quad (4.4)$$

O3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

O4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

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

4.1 Алгоритм непрямого векторного керування АД

Запишемо модель АД в системі координат (d-q) в похибках відпрацювання:

$$\tilde{\Psi}_d = \Psi_{2d} - \Psi^*, \quad \tilde{\Psi}_q = \Psi_{2q}, \quad \tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*, \quad \tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*, \quad \tilde{\omega} = \omega - \omega^*; \quad (4.5)$$

$$\dot{\theta} = \omega;$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \frac{3}{2}p_n \frac{L_m}{L_2}(\Psi_{2d}i_{1q} - \Psi_{2q}i_{1d});$$

$$\dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \Psi_{2d} + \beta p_n \omega \Psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_d; \quad (4.6)$$

$$\dot{i}_{1q} = -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \Psi_{2q} - \beta p_n \omega \Psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_q;$$

$$\dot{\Psi}_{2d} = -\alpha \Psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \Psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d};$$

$$\dot{\Psi}_{2q} = -\alpha \Psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \Psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q};$$

Розпишемо рівняння потокозчеплень у похибках:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_d &= -\alpha(\tilde{\Psi}_d + \Psi^*) + (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\Psi}_q + \alpha L_m i_{1d} - \dot{\Psi}^*; \\ \tilde{\Psi}_d &= -\alpha(\tilde{\Psi}_d) + (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\Psi}_q + \alpha L_m i_{1d} - \dot{\Psi}^* - \alpha \Psi^*; \\ \tilde{\Psi}_d &= -\alpha(\tilde{\Psi}_d) + (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\Psi}_q; \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m}(\dot{\Psi}^* + \alpha \Psi^*);$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\Psi}}_q &= -\alpha \tilde{\Psi}_q - (\omega_0 - p_n \omega)(\tilde{\Psi}_d + \Psi^*) + \alpha L_m i_{1q}; \\ \dot{\tilde{\Psi}}_q &= -\alpha \tilde{\Psi}_q - (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\Psi}_d - (\omega_0 - p_n \omega)(\Psi^*) + \alpha L_m i_{1q}; \\ \dot{\tilde{\Psi}}_q &= -\alpha \tilde{\Psi}_q - (\omega_0 - p_n \omega) \tilde{\Psi}_d; \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\Psi^*} + \phi;$$

В результаті отримуємо розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення:

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*); \quad (4.9)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*); \quad (4.10)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi; \quad (4.11)$$

де ψ^* , $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, ϕ – робастифікуючий зв'язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку $\phi = 0$.

Для отримання регулятора струму по осі (d) (польової складової струму статора) запишемо рівняння динаміки стуму по осі (d) в похибках:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma(\tilde{i}_{1d} + i_{1d}^*) + \omega_0 i_{1q} + \alpha\beta(\tilde{\psi}_d + \psi^*) + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q + \frac{1}{\sigma} u_d - \dot{i}_{1d}^*; \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma \tilde{i}_{1d} + \alpha\beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q + \frac{1}{\sigma} u_d + \omega_0 i_{1q} - \dot{i}_{1d}^* - \gamma i_{1d}^* + \alpha\beta \psi^*; \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma \tilde{i}_{1d} + \alpha\beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q; \\ u_d &= \sigma(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha\beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d); \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}; \end{aligned} \quad (4.12)$$

Регулятор струму по осі (d) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right); \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}; \end{aligned} \quad (4.13)$$

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.

Для отримання регулятора кутової швидкості запишемо рівняння динаміки швидкості у похибках:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left((\tilde{\psi}_d + \psi^*) (\tilde{i}_q + i_{1q}^*) - \tilde{\psi}_q i_{1d} \right) - M_c \right) - v(\tilde{\omega} + \omega^*) - \dot{\omega}^*; \\ \dot{\tilde{\omega}} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left(\tilde{\psi}_d (\tilde{i}_q + i_{1q}^*) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q i_{1d} \right) - M_c \right) - \\ &\quad - v\tilde{\omega} + \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi^* (i_{1q}^*) \right) - v\omega^* - \dot{\omega}^*; \\ \dot{\tilde{\omega}} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left(\tilde{\psi}_d (\tilde{i}_q + i_{1q}^*) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q i_{1d} \right) \right); \\ i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v\omega^* \right); \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}; \end{aligned} \quad (4.14)$$

Регулятор швидкості матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v\omega^* \right); \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* + v\omega^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*; \quad (4.16)$$

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.

Для отримання регулятора струму по осі (q) (моментної складової струму статора), запишемо рівняння динаміки струму по осі (q) в похибках:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma(\tilde{i}_q + i_{1q}^*) - \omega_0 i_{1d} + \alpha\beta\tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega(\tilde{\psi}_d + \psi^*) + \frac{1}{\sigma} u_q - \dot{i}_{1q}^*; \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -\gamma\tilde{i}_q + \alpha\beta\tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega\tilde{\psi}_d + \frac{1}{\sigma} u_q - \dot{i}_{1q}^* - \gamma i_{1q}^* - \omega_0 i_{1d} - \beta p_n \omega\psi^*; \\ \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma\tilde{i}_q + \alpha\beta\tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega\tilde{\psi}_d; \\ u_{1q} &= \sigma(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq}\tilde{i}_q - x_q); \\ \dot{x}_q &= k_{ii}\tilde{i}_{1q};\end{aligned}\tag{4.17}$$

Регулятор струму по осі (q) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned}u_{1q} &= \sigma(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq}\tilde{i}_q - x_q); \\ \dot{x}_q &= k_{ii}\tilde{i}_{1q};\end{aligned}\tag{4.18}$$

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

Налаштування коефіцієнтів регуляторів:

$$\omega_{0\omega} = \frac{\omega_{0i}}{3,5} \approx 100;$$

$$\omega_{0\omega} = k_{\omega} = 100;$$

$$k_{\omega i} = \frac{k_{\omega}^2}{2} = 5000;$$

$$k_{iq} = k_{iq} = \omega_{0i}^2 = 62500;$$

$$k_q = k_q = \sqrt{4\omega_{0i}^2} \approx 500;$$

Структурна схема алгоритму керування зображена на рисунку 4.2.

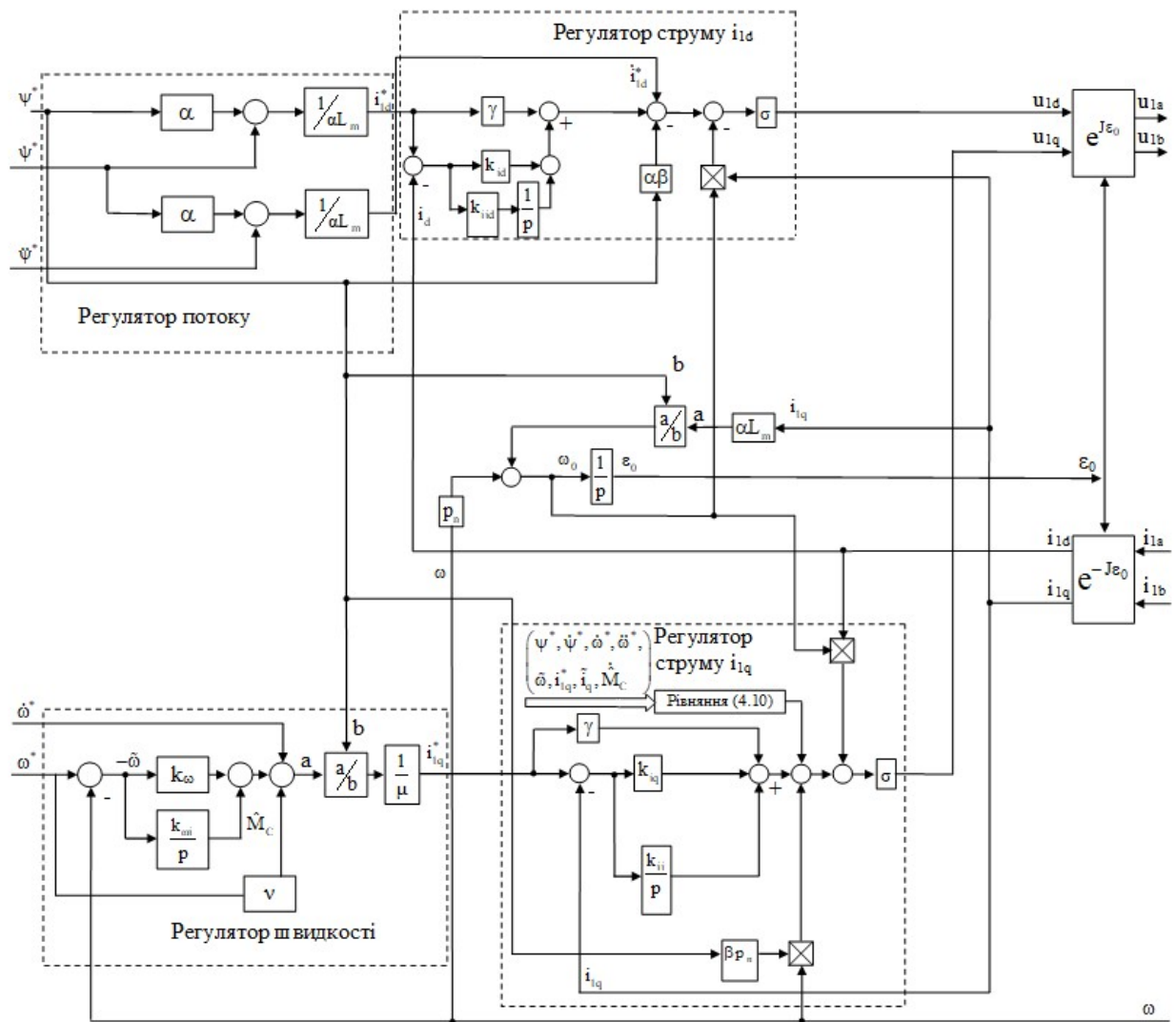


Рисунок 4.2 – Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування

4.2 Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи

Дослідження динамічних характеристик системи непрямого векторного керування буде проводитись в наступному порядку:

- 1) на проміжку часі ($0 < t < 2$ с) відбувається намагнічення двигуна за траєкторією другого порядку, при цьому вал ротора знаходиться у нерухомому стані. Слід врахувати що струм по осі d не має перевищувати номінальне амплітудне значення струму статора.
- 2) Після намагнічування двигуна відбувається розгін до заданої швидкості в 308 рад/с, що відповідає лінійній швидкості 8 м/с з використанням такої ПМ та рекудктора, за проміжок часу $t_{II} = 8$ с.
- 3) Момент навантаження прикладується в момент зрушення двигуна і формується за рівнянням статичних зусиль ШПУ.
- 4) Після розгону двигун обертається з усталеною швидкістю протягом 92 с.
- 5) Гальмування двигуна за інтервал часу $t_r = 8$ с.
- 6) Після зупинки двигуна знімається навантаження.
- 7) Після паузи тривалістю 10 с цикл роботи повторюється для опускання без вантажу. Слід врахувати, що в момент паузи двигун залишається намагніченим.

Алгоритм непрямого векторного керування швидкістю був налаштований наступним чином: коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів швидкості $k_{\omega} = 150$, $k_{\omega i} = 11000$; коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струмів $k_{id1} = k_{iq1} = 700$, $k_{id} = k_{iq} = 120000$; коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів потокозчеплення $k_{\psi} = 100$, $k_{\psi i} = 2500$;

Результати моделювання алгоритму прямого векторного керування АД в середовищі MATLAB Simulink наведені на рисунках 4.3 - 4.6.

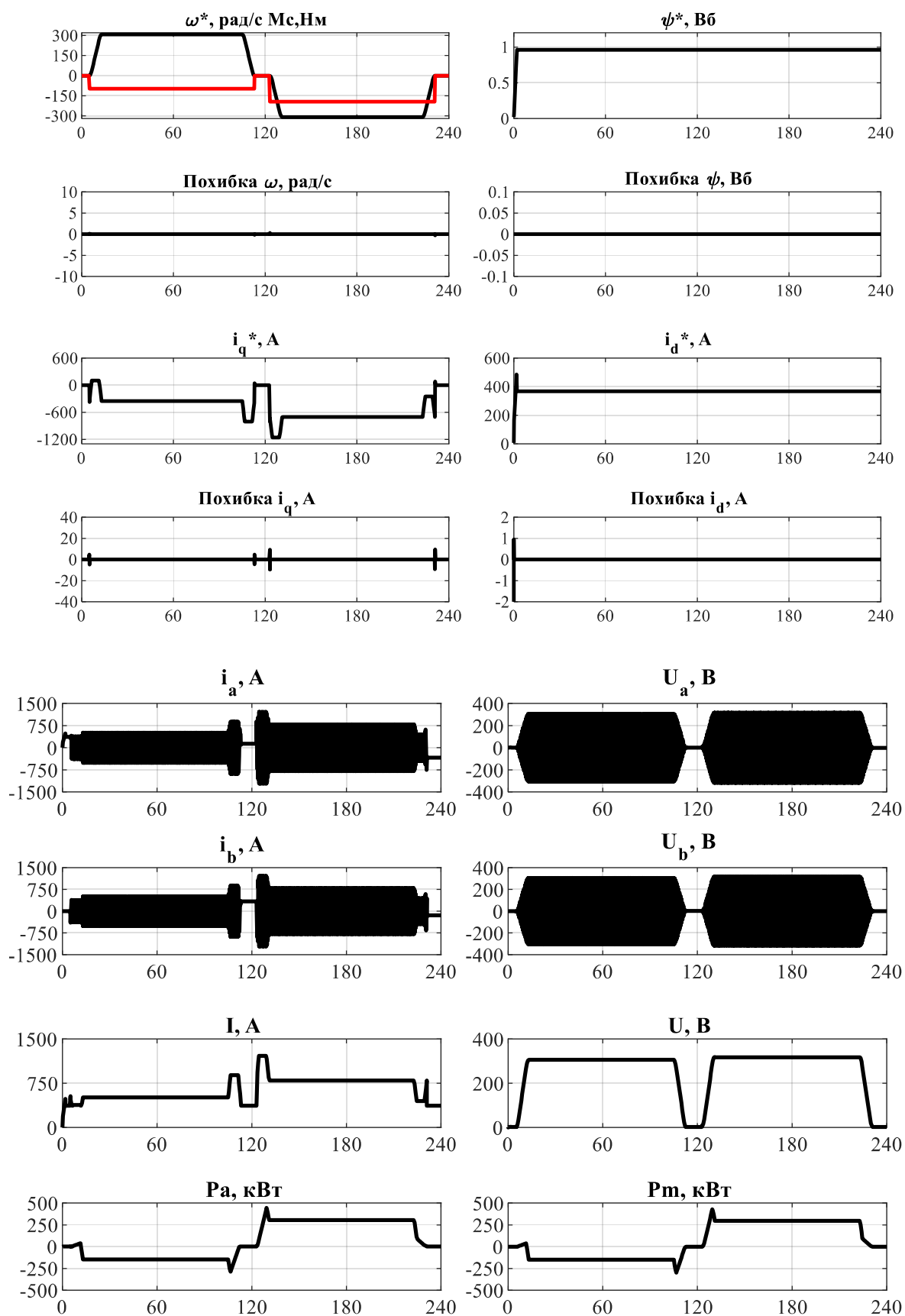


Рисунок 4.3 – Графіки перехідних процесів ЕП при підйомі вантажу

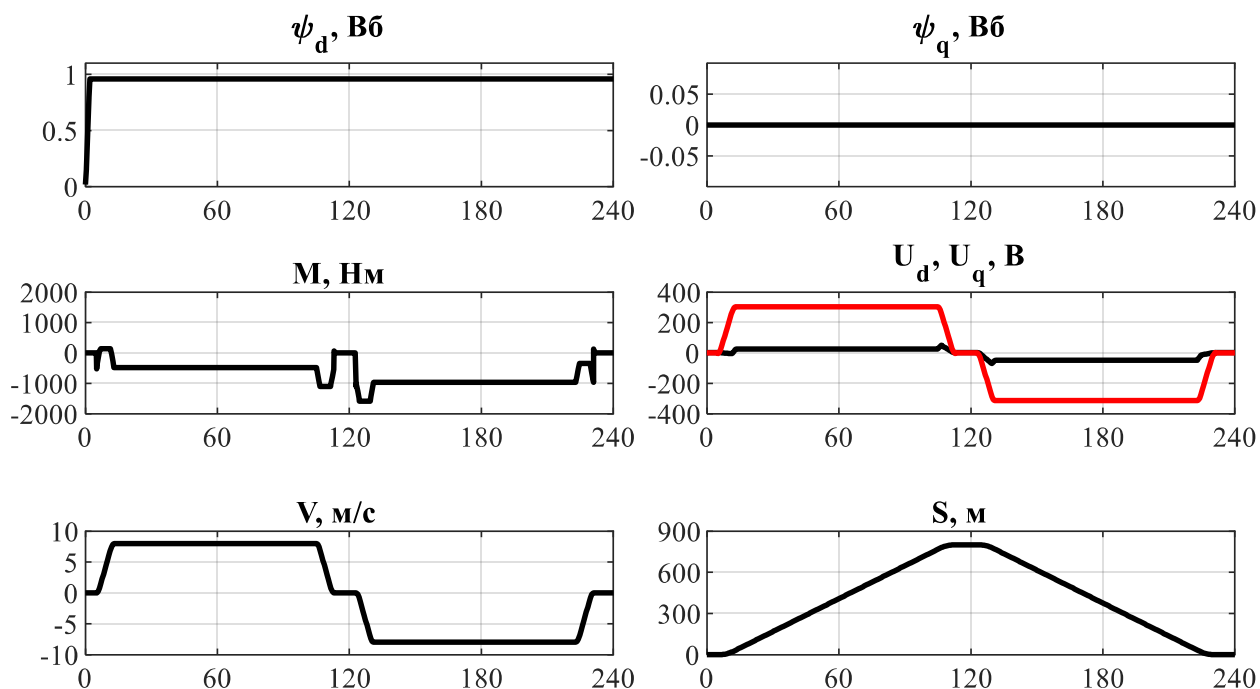


Рисунок 4.4 – Графіки перехідних процесів ЕП при підйомі вантажу

З графіків перехідних процесів видно що система відпрацьовує задано траєкторію руху ШПУ. При розгоні на етапі опускання момент двигуна динамічний момент двигуна значно менший ніж при розгоні на етапі підйому. Це пов'язано з тим що момент навантаження що створюється клітью направлений в тому ж самому напрямку що і швидкість обертання валу двигуна. На етапі підйому момент двигуна не перевищує критичного значення.

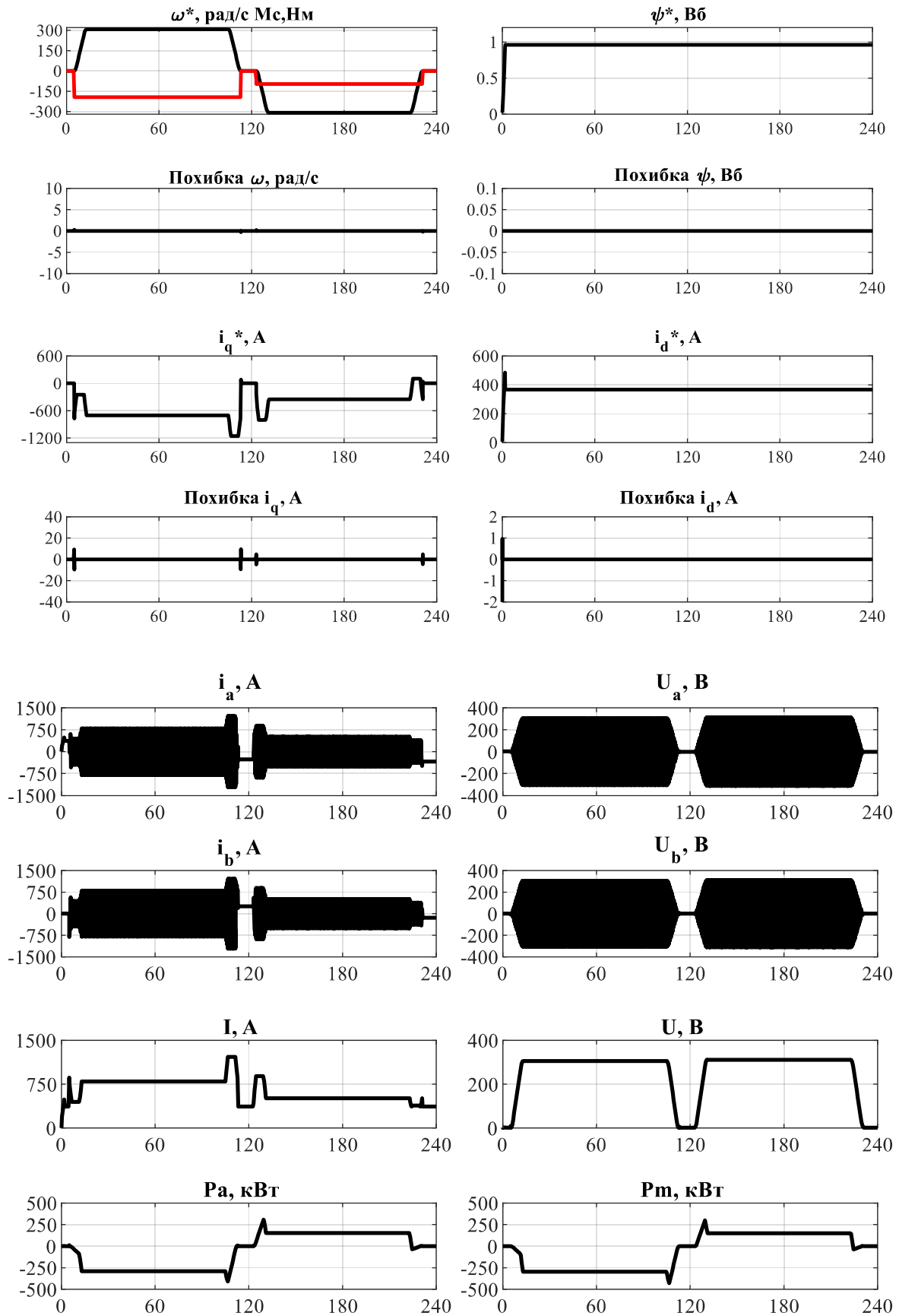


Рисунок 4.5 – Графіки перехідних процесів ЕП при опусканні вантажу

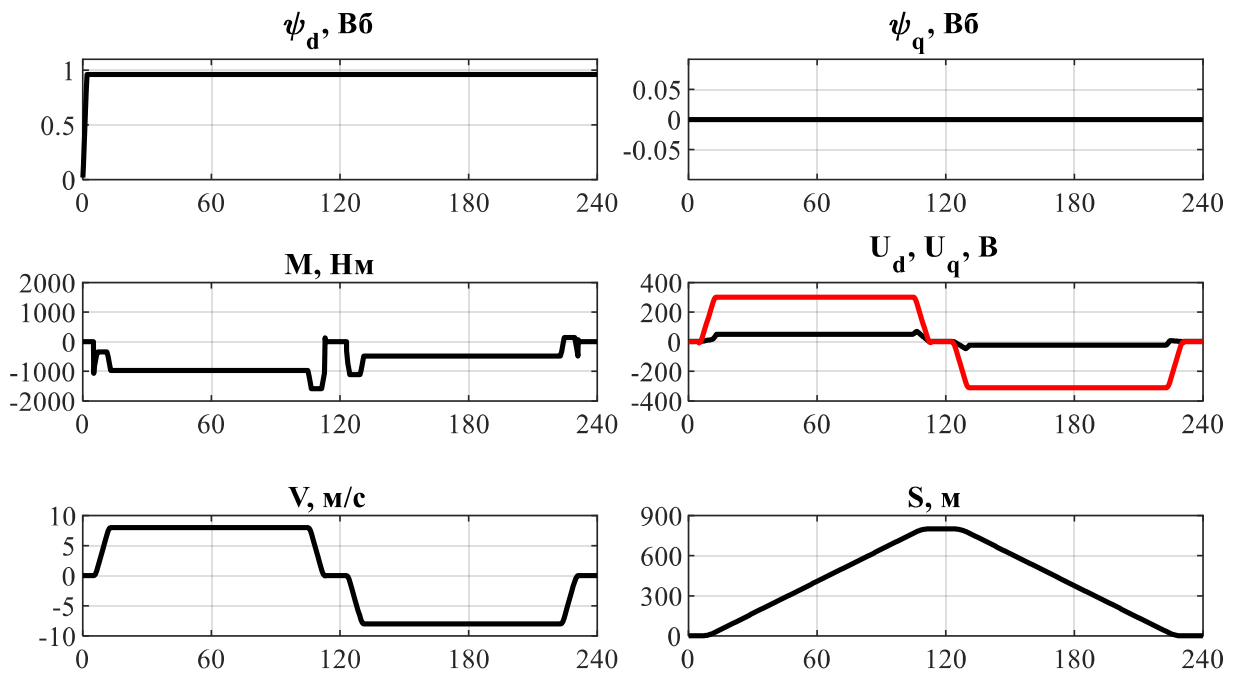


Рисунок 4.6 – Графіки перехідних процесів ЕП при опусканні вантажу

З графіків що представлені на рисунках 4.5 та 4.6 видно що при опусканні вантажу момент двигуна від’ємний при опусканні вантажу. Це пов’язано з тим що, напрям прикладання зусилля та напрям обертання співпадають за напрямом і момент йде на те що б двигун не розганявся під дією навантаження.

Висновки до розділу 4:

В даному розділі було розглянуто концепцію полеорієнтованого керування за вектором потокозчеплення ротора. Розроблено алгоритм непрямого векторного керування швидкістю АД. Методом математичного моделювання в програмному забезпеченні було досліджено динамічні характеристики системи векторного керування ШПУ при підйомі та опусканні вантажу в шахту. На основі отриманих графіків можна зробити висновки що система працездатна та може бути використана в ШПУ. Найбільш складним режимом є режим підймання вантажу, але при цьому момент не перевищує значення критичного.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Охорона праці - це сукупність законодавчих механічних та організаційних заходів, спрямованих на зменшення травматизму на виробництві та підтримку здоров'я людини.

Незалежно від виду професійної діяльності питання охорони праці людини має вирішуватися на всіх стадіях трудового процесу. Забезпечення безпечних та здорових умов праці багато в чому залежить від правильної оцінки небезпечних та небезпечних факторів виробництва. Однакова складність змін людського організму може бути викликана різними причинами. Це можуть бути фактори виробничого середовища, надмірні фізичні та психічні навантаження, нервові та емоційні навантаження та різні комбінації цих причин.

У цьому розділі ми розглянемо основні правила охорони праці в шахтах.

Шахтний підйом

5.1 Максимальні норми підйому та опускання людей і вантажів при вертикальних і похилих роботах визначаються проектом.

5.2. Коли кут нахилу робочого навантаження при максимальному рівні становить 30° , при зниженні навантаження середнє значення уповільнення підйомного пристрою під час безпечного гальмування повинно бути не менше $0,75 \text{ м / с}^2$, а якщо кут нахилу робочого навантаження більше 30° , він повинен бути не менше $1,5 \text{ м / с}^2$.

5.3. Для запобігання надмірного підйому та перевищенню швидкості гірничі підйомники повинні бути обладнані такими запобіжними пристроями:

а) кожна підйомна посудина (противага) - кінцевим вимикачем, що встановлений у виробці або на копрі та призначений для вмикання запобіжного

гальма при підйманні посудини на 0,5 м вище рівня верхнього приймального майданчика (нормального стану при вивантажуванні).

При операціях нахилу слід встановити кінцевий вимикач на верхній приймальній платформі. Кінцевий вимикач повинен бути на відстані 0,5 м від нормальних умов, викликаних робочим процесом.

Підйомні установки з перекидними клітьми повинні мати додаткові кінцеві вимикачі, установлені на копрі на 0,5 м вище рівня майданчика, призначеного для посадки людей у кліть. Робота цих кінцевих вимикачів повинна також дублюватися кінцевими вимикачами, установленими на покажчику глибини (в апараті завдання і контролю ходу). Ця вимога не поширюється на підйомні установки з самоперекидними цебрами при проходженні вертикальних стволів.

Якщо для живлення використовується окремий кабель, повторний кінцевий вимикач на тому ж рівні, що і основний вимикач, можна встановити на суху кригу.

Додаткові кінцеві вимикачі (основні та дублюючі) на установках з перекидними клітьми повинні включатися до ланцюга захисту в залежності від заданого режиму "вантаж" і "люди". Для перевірки справності та правильності установлення вимикачів (основних і дублюючих) на пульті машиніста повинні бути установлені кнопки або перемикачі (без фіксування положення);

5.4. Підйомник шахти повинен бути обладнаний такими пристроями захисту та фіксації:

а) Пристрій для запобігання надмірного зносу гальмівних колодок, який може спрацювати за рахунок збільшення зазору між ободом барабана та гальмівними колонками більш ніж на 2 мм. Ця вимога не поширюється на підземні та тунельні лебідки.

б) максимальним та нульовим захистом;

в) захистами від провисання струни та напуску каната у ствол;

г) захистом від жорсткої посадки клітей людського та вантажно-людського

підйомів;

г) пристроєм блокування запобіжних ґрат, який унеможлиблює їх відкривання до приходу підйомальної посудини на приймальний майданчик і вмикає сигнал "стоп" у машиніста при відкритих ґратах. Дозволяється відкривання запобіжних ґрат при розміщенні підйомних посудин поза приймальними майданчиками при опусканні-підйманні негабаритних вантажів у режимі "Обладнання" та при огляді підйомного комплексу в режимі "Ревізія";

д) пристроєм блокування, який дозволяє вмикати двигун після перепідйому посудини тільки в бік ліквідації перепідйому;

е) пристроєм, що подає сигнали машиністу й ствольовому при висмикуванні гальмівних канатів у місці їх кріплення в зумпфі;

є) пристроєм, що подає сигнал машиністу при недопустимому піднятті петлі врівноважувального каната;

и) пристроєм, що сигналізує машиністу про положення майданчиків, які гойдаються, і посадочних кулаків;

і) автоматичним дзвінком, що сигналізує про початок періоду уповільнення (за винятком вантажних підйомних установок, що працюють в автоматичному режимі).

5.5. Для стволів (свердловин), обладнаних одним підйомом, який використовується в аварійних випадках і для ремонтних робіт, повинні бути розроблені заходи виведення людей із підйомної посудини, що застрягла (зависла).

Дозволяється відсутність стаціонарної аварійно-ремонтної підйомної установки за наявності на озброєнні ДВГРС, який обслуговує шахту, пересувної підйомної установки.

Для шахт глибиною до 100 м дозволяється застосування для цієї мети ручних лебідок, обладнаних гальмами і храповим зупинником.

На нижньому поверсі робочого помосту повинна знаходитися аварійна канатна драбина необхідної довжини для виходу людей із вибою ствола на

прохідницький поміст. У випадку можливості проходження рятівної драбини через поміст до вибою наявність на помості аварійної канатної драбини не обов'язкова.

При проходці стволів глибиною до 100 м лебідки для підвіски аварійно-рятівних драбин можуть мати тільки ручний привід і повинні бути обладнані гальмами і храповим зупинником.

5.6. Людям заборонено проходити через підйомну камеру стовбура.

На всіх горизонтах шахти перед стволами повинні бути встановлені запобіжні ґрати для попередження переходу людей через підйомні відділення. На проміжних горизонтах забороняється застосування посадочних кулаків.

Дозволяється на діючих шахтах застосування на верхньому приймальному майданчику дверей гільйотинного типу за наявності додаткової огорожі, яка перешкоджає доступу людей до ствола до повної зупинки кліті і в період її відправлення.

Вимоги сигналу "стоп" (пункт 4.7.4 "г" цих Правил) не поширюються на підйомні установки, обладнані дверима гільйотинного типу.

5.7. У стволах шахт, у яких не передбачене опускання та підймання людей, користуватися підйомними установками дозволяється тільки особам, зайнятим на огляді та ремонті цих стволів, за винятком аварійної ситуації.

При проходженні стволів під час опускання-підймання устаткування прохідницькими лебідками робота підйому дозволяється тільки для пересування працівників і технічного персоналу, який наглядає за виконанням цих робіт.

5.8. Усі середні, нижні та верхні приймальні майданчики вертикальної осі (для підйому та опускання вантажу візка) та платформа перед самоскидом повинні бути обладнані блокувальними пристроями для забезпечення єдиного вимірювання та запобігання візку випадковим коченням.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

В даній бакалаврській роботі було розглянуто автоматизацію електромеханічної системи шахтної підйомної установки. В ході виконання роботи було проведено наступні етапи:

1. На основі огляду літератури були розглянуті конструктивні особливості шахтного підйомника. Експлуатаційні вимоги шахтного підйомного обладнання залежать від можливих змін технічних параметрів використовуваного підйомного механізму.
2. Проведено розрахунок зусиль що виникають в електроприводі при русі кліті під час руху з вантажем та без нього. На основі даних зусиль було розраховано орієнтовну потужність привідного двигуна.
3. Проведено розрахунок параметрів привідного двигуна. Розглянуто основні принципи побудова перетворювачів частоти. На основі потужності обраного двигуна обрано перетворювач частоти ATV 71 т модуль безпеки Preventa XPS AT. Розроблено схему електричну принципову підключення силової частини електроприводу.
4. Синтезовано систему непрямого векторного керування асинхронним двигуном що забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої діаграми руху шахтної підйомної установки. Методом математичного моделювання досліджено динамічні характеристики системи в двох режимах. В першому режимі відбувається опускання порожньої кліті в ствол шахти і підйом вантажу. В другому режимі відбувається процес опускання вантажу в шахту і підйом порожньої кліті. З графіків 4.3-4.6 бачимо що система непрямого векторного керування асимптотично відпрацьовує задану траєкторію руху а напруга та струми статора не перевищують допустимих значень обраного перетворювача.

Список використаної літератури

1. Бешта О.С., Балахонцев О.Б. Электропривод шахтных подъемных установок. Перспективы розвитку // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2007. – Вип.78/2007. с.115-118.
2. Остроухов І.О., Борисенко В.Ф. Порівняльний аналіз систем електроприводів шахтних підйомних установок // Збірник трудів ДонНТУ. - 2005. –с.143-145.
3. Дацьковський Л.Х. Роговий В.І. Электропривод шахтных стационарных установок. Сучасний стан та перспективи// Електромашинобудування та обладнання. – 2006. – Вип. 66/2006. с.85-93
4. Тулин В.С. Электропривод и автоматика многоканатных рудничных подъемных машин. – М.: Недра, 1964. – 181 с.
5. Белый В.Д., Найдено И.С. Шахтные многоканатные подъемные установки.– М.: Недра, 1966. – 312 с.
6. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 277с.
7. Підйомні установки.: Навчально-методичний посібник/ М.Г.Попович, Б.М.Мацко – К.: НТУУ „КПІ”, 2002.– 149 с.
8. Кабанов В.А. Расчет и конструирование шахтных подъемных установок многоканатного подъема – Л.: ЛГИ, 1979. – 86 с.
9. Песвианидзе А.В. Расчет шахтных подъемных установок – М.: Недра, 1992. –250 с.
- 10.А. Э. Кравчик Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504с.

- 11.Белобров В.И., Дзензерский В.А., Самуся В.И., Ильин С.Р. Динамика шахтных подъемных установок – Днепропетровск, Изд-во Днепропетровского университета, 2000 – 384 с.
- 12.Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. –New York: Oxford University Press Inc, 2000.
- 13.Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем // Техн. електродинаміка. –2002. –№4. –С.17–22.
- 14.Peresada S. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor / S. Peresada, A. Tonielli // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – Vol. 14. – P. 177-200.
- 15.Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. –96 с.
- 16.Пересада С.М. Метод синтеза линеаризуемых обратной связью нелинейных САУ по измеряемому выходу / С.М. Пересада // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1998. – С. 28– 31.
- 17.ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ [Електронний ресурс] // Наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 22 серпня 2000 року N 215 – Режим доступу до ресурсу: <https://ips.ligazakon.net/document/REG4936?an=2>.