

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

_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра

за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка»

(код і назва)

на тему: «Асинхронний електропривод механізму переміщення грейферного крану»

Виконав (-ла): студент 4 курсу, групи ЕП-51

(шифр групи)

Федорос Юрій Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник ст. викладач к.т.н. Бовкунович В.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент асист. Монахов Є. А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент (-ка) _____

(підпис)

Київ – 2019 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	6.050702.c5128.017.БР	Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	6.050702.c5128.017.БР	Пояснювальна записка	70	
3	A1	6.050702.c5128.017.БР	Креслення загального виду	1	
4	A1	6.050702.c5128.017.БР	Схема електричних з'єднань	1	
5	A4	6.050702.c5128.017.БР	Специфікація	1	
6	A1	6.050702.c5128.017.БР	Функціональна схема електроприводу	1	

				6.050702.c5128.017.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата	Асинхронний електропривод механізму переміщення грейферного крану	Лист	Листів
Розробн.	Федорос Ю.М.				2	70
Керівн.	Бовкунович В.С.				НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП- 51	
Консульт.						
Н/контр.	Приймак Б.І.					
Зав.каф.	Пересада С.М.					

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)

Напрямок підготовки – 6.050702 електромеханіка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С. М. Пересада

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Федорос Юрій Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Асинхронний електропривод механізму переміщення
грейферного крану» ,

керівник проекту ст. викладач к.т.н. Бовкунович В.С.

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

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

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Мостовий кран з максимальною масою вантажу 16
т, проліт крана 16.5 м, швидкість переміщення 1.33 м/с, діаметр ходових
коліс 0.71 м, число ходових коліс 4.

4. Зміст пояснювальної записки Зміст. Вступ. 1 Аналітичний огляд. 2 Вибір двигуна та розрахунок його потужності. 3 Система керування електроприводу. 4 Дослідження динамічних процесів у двигунах. 5 Розробка функціональної схеми асинхронного електроприводу та розрахунок основних елементів силової частини.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Загальний вигляд. Схема електрична принципова. Графіки перехідних процесів. Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування.

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 05.03.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд. Опис технологічного процесу (установки)	19.03.2019	
2	Визначення потрібної потужності двигуна	26.03.2019	
3	Вибір електродвигуна та силового електрообладнання	02.04.2019	
4	Математична модель електромеханічного об'єкта. Розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу	09.04.2019	
5	Синтез (проектування) системи керування	16.04.2019	
6	Опис схеми керування (о)	30.04.2019	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Пояснювальна записка
до дипломного проекту

на тему: «Асинхронний електропривод механізму переміщення
грейферного крану»

Київ – 2019 р.

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра містить 70 сторінок, 18 рисунків, 5 таблиць, 20 джерел інформації, 3 аркуші графічної частини.

Об'єкт дослідження – електропривод грейферного крану вантажопідйомністю 16 тон.

Ціль роботи – виконати проектування асинхронного векторно регульованого електроприводу механізму переміщення грейферного крану відповідно вимогам технічного завдання та дослідження його роботи методом моделювання MATLAB.

В ході роботи був розроблений електропривод, що задовольняє умови технічного завдання.

Дипломна робота виконана в текстовому редакторі Microsoft Word 2010 на білому папері формату А4, з використанням програм MathCAD 14, пакет MATLAB 7.9 Simulink 6.3, Splan, Microsoft Visio 2013.

Ключові слова: мостовий кран, механізм переміщення, асинхронний двигун, перетворювач частоти, асинхронний векторно – регульований електропривод, система автоматичного управління, статичні та динамічні характеристики.

					6.050702.c5128.017.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Асинхронний електропривод механізму переміщення грейферного крану Реферат	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Федорос Ю. М.						
Перевір.		Бовкунович В.С.					6	70
Рецензент		Монахов Є. А.				НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» Каф.АЕМС		
Н. Контр.		Приймак Б. І.						
Затверд.		Пересада С. М.						

THE SUMMARY

The final qualifying paper of the bachelor's degree contains 69 pages, 18 figures, 5 tables, 20 sources of information, 3 sheets of graphic part.

The object of the study is the electric grab crane with a carrying capacity of 16 tons.

The purpose of the work is to design an asynchronous vector controlled electric drive mechanism for moving the bridge magnetic graphene crane in accordance with the requirements of the technical task and study of its work MATLAB simulation method.

In the course of work was developed electric drive, which meets the conditions technical task.

The thesis is executed in the text editor Microsoft Word 2013 on white paper of A4 format, using MathCAD 14 programs, MATLAB 7.9 Simulink 6.3, Splan, Microsoft Visio 2013.

Keywords: bridge crane, displacement mechanism, asynchronous motor, frequency converter, asynchronous vector controlled electric drive, frequency converter, automatic control system, static and dynamic characteristics.

					6.050702. c5128.017.BR			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.	Y. Fedoros				Asynchronous electric drive mechanism for moving the crane <i>SUMMARY</i>	L.	Page	Pages
Checked	v. Bovkunovich						7	69
Reviewer	J. Monakhov					NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», <i>FEA, gr.</i> <i>EP-51</i>		
N. Contr.	B. Pryymak							
Approved.	S. Peresada							

З М І С Т

ВСТУП	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Перспектива розвитку вантажопідйомної техніки	12
1.2 Загальна будова мостового крана	13
1.3 Механізми пересування мостів і вантажних візків кранів	15
1.4 Металоконструкція мосту крана	18
1.5 Кабіна керування краном	21
1.6 Електрообладнання крана	23
Висновок за розділом 1	25
2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА	26
2.1 Постановка завдання	26
2.2 Формування вимог до електроприводу механізму переміщення мостового крана	27
2.3 Розрахунок електроприводу переміщення мостового крана	27
2.4 Попередній вибір двигуна	31
2.5 Побудова навантажувальної діаграми та перевірка правильності вибору двигуна	35
2.6 Вибір редуктора	37
2.7 Визначення параметрів схеми заміщення моделі асинхронного двигуна	37
Висновок за розділом 2	40
3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	41
3.1 Формулювання задачі векторного керування	41
3.2 Синтез системи непрямого векторного керування швидкістю	43
3.3 Алгоритм непрямого векторного керування АД	47
Висновок за розділом 3	48
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНАХ	50
Висновок за розділом 4	54

5. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ.....	55
5.1 Типові вимоги до перетворювача та функціональна схема асинхронного електроприводу.....	55
5.2 Розрахунок силової частини перетворювача.....	60
Висновок за розділом 5	66
ВИСНОВОК.....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	68

ВСТУП

Електропривод на сьогоднішній день застосовується напевно майже у всіх галузях народного господарства, де для приведення в дію робочих механізмів, машин енергія змінює свою природу, перетворюється з електричної в механічну.

Складність електроприводу полягає не тільки в складності поставленої задачі перед ним, але і в ступені автоматизації певного процесу. Великі виробництва сьогодні ми не можемо уявити без транспортних чи підйомних механізмів, вони відіграють велику роль у сучасній промисловості. З їхньою допомогою здійснюються переміщення, підйоми вантажів. Транспортні системи не тільки загальні, основні, процеси виконують, а й допоміжні роботи. Деякі процеси і взагалі неможливі без них. У промисловості для вертикального й горизонтального переміщенні певних вантажів застосовують крани з різною конструкцією. Проте, якщо не звертати на відмінності стосовно конструкції, крани мають загальні за призначенням вузли механізмів. З розвитком технологій багато чого змінюється, в тому числі й самі крани, з часом пройшли певні зміни починаючи з кранів з паровим двигуном, двигуном внутрішнього згоряння і закінчуючи електродвигуном.

На сьогоднішній день, майже всюди застосовуються крани з електричним приводом, так як при їх використанні робочі процеси відбуваються з великими швидкостями не тільки пересування, а й підйому вантажу. Використовуються також і крани з ручним приводом, але їх зазвичай експлуатують при монтажу та ремонту обладнання, для допоміжних операцій транспортування та підйому.

Особливістю, яка стосується електроприводу мостового крану є те, що він не має заданого циклу роботи. Так як режим роботи залежить від певних чинників, зазвичай це завдання, які поставлені перед механізмом: маса

вантажу, який треба перемістити, координати з яких починає і закінчує рухатись кран.

Метою бакалаврської роботи є розробка та дослідження асинхронного електроприводу механізму переміщення грейферного крану, що може вплинути на покращення енергетичних показників технологічних процесів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Перспектива розвитку вантажопідйомної техніки

Швидке розвинення електроніки та мікропроцесорної техніки призвело до створення нового типу обладнання - автоматичних маніпуляторів, названих- промисловими роботами. Робот (слово чеського походження "навчений роботі людини") означає машину з людиноподібною (антропоморфною) поведінкою, здатну частково або повністю виконувати виробничі функції людини.

По характеру зроблених операцій (різними виробничо-технічними ознаками) промислові роботи поділяють на групи: технологічні, які виконують основні операції технологічного процесу (виробляючі або оброблювальні машини); підйомно-транспортні, які виконують допоміжні операції типу "узяти - перенести - покласти", і універсальні, призначені для виконання основних і допоміжних технологічних операцій. За вітчизняними і зарубіжними даними близько 95% всіх діючих промислових роботів являються підйомно-транспортними, з них 20% обслуговує конвеєри і близько 18% зайняті на операціях складування.

Промисловий робот складається з двох частин: виконавчої, що впливає на технологічний процес (ТП) і включає маніпулятор (МП) , робочий орган якого забезпечений захватом, і пристрій пересування (ПП) (якщо робот нестационарний) і керуючою, що включає пристрій керування (ПК), що впливає на МП і ПП. Пристрій управління складається з пульта керування (ПК), який служить для введення та контролю завдання виданого оператором; запам'ятовувального пристрою (ЗП) для зберігання програм управління (інформації); обчислювального пристрою (ОП), корегуючого програму в процесі роботи робота, і блоку керування приводами (БКП) маніпулятора (МП) і пристрої пересування (ПК).

Пристрій керування може бути вмонтований в корпус робота або розміщено в окремому блоці. За допомогою пульта управління (ПУ) оператор

вводить програму (завдання на роботу) в обчислювальний пристрій (ОП), який виробляє сигнали управління і передає їх у запам'ятовувальний пристрій (ЗП), а потім в блок керування приводами (БКП), що впливають на технологічне устаткування, що обслуговується роботом (ТУ) і на технологічний процес (ТП), виконуваний роботом. Пристрій управління також включає вимірювальний пристрій, контролюючи зміни стану зовнішнього середовища (ЗС).

1.2 Загальна будова мостового крану

Вантажопідіймальний кран - це машина циклічної дії, призначена для підйому і переміщення в просторі вантажу, підвішеного за допомогою гака або утримуючи іншими вантажозахоплювальними органами.

Мостові крани називаються так тому, що їх несучі конструкції виконані у вигляді мосту, перекинутого через проліт цеху.

Залежно від призначення мостові крани можна розділити на наступні основні групи: загального призначення, спеціального призначення (з поворотним візком, з висувною поворотною та не поворотною стрілою та ін.) , металургійні (мульдо-завалочні, ливарні, штирові, для роздягання злитків, кування, колодцеві, з гнучким підвісом траверси , магнітні, грейферні та ін.)

Мостові крани загального призначення, забезпечені в основному вантажним гаком, призначений для виконання масових навантажувально-розвантажувальних робіт.

Мостові крани спеціального призначення, забезпечені спеціальними вантажозахоплювальними пристроями, призначені для роботи з певними вантажами. Мостові крани складаються з двох основних вузлів: мосту, що пересувається по цеху, і кранового візка або талі, що пересуваються по мосту.

Залежно від конструкції мосту мостові крани ділять на одно - балкові і двобалкові . Одно - балковий міст складається з головної балки, з'єднаної з

двома кінцевими балками. Двобалковий міст має дві головні балки, сполучені з двома кінцевими балками.

За способом обпирання на крановий шлях розрізняють мостові крани опорного і підвісного типу. До мостових кранів опорного типу відносять крани, що спираються ходовими колесами на кранові рейки, закріплені на підкрановій балки, встановленої на колонах цеху, естакадах. Мостові крани підвісного типу ходовими колесами опираються на нижні полиці двотаврових балок, підвішених до стельових конструкцій цеху.

За типом приводу мостові крани виконують з ручним або електричним приводами. Найбільше застосування знайшли крани з електричним приводом. Крани з ручним приводом механізмів застосовують при запальних підйомно-транспортних операціях, при ремонті та монтажу обладнання та інших роботах, для виконання яких не потрібні великі швидкості підйому і переміщення вантажів.

Мостовий кран складається з мосту, виконаного з головних (поздовжніх) і кінцевих (поперечних) балок, зварених між собою, і пересувається по надземній колії, покладеної на підкранові балки, закріплені на консолях колон будівлі (цеху) або естакади. По мосту (уздовж головних балок) пересувається вантажний візок, обладнаний механізмами підймання вантажу та пересування. По кінцях кінцевих балок мосту розміщені ходові візки з приводом, що забезпечують пересування крана вздовж прольоту будівлі (естакади).

Мостовий кран обслуговує практично всю площу цеху (крім вузьких смуг уздовж цеху), що є його основною перевагою. Крім того, мостовий кран пересувається по надземному крановому шляху, тому він не займає корисну площу підлоги цеху. Вантажопідйомність крана не залежить від положення вантажного візка щодо мосту і висоти підймання вантажу. Мостовий кран простий по конструкції, надійний в експлуатації і зручний в управлінні.

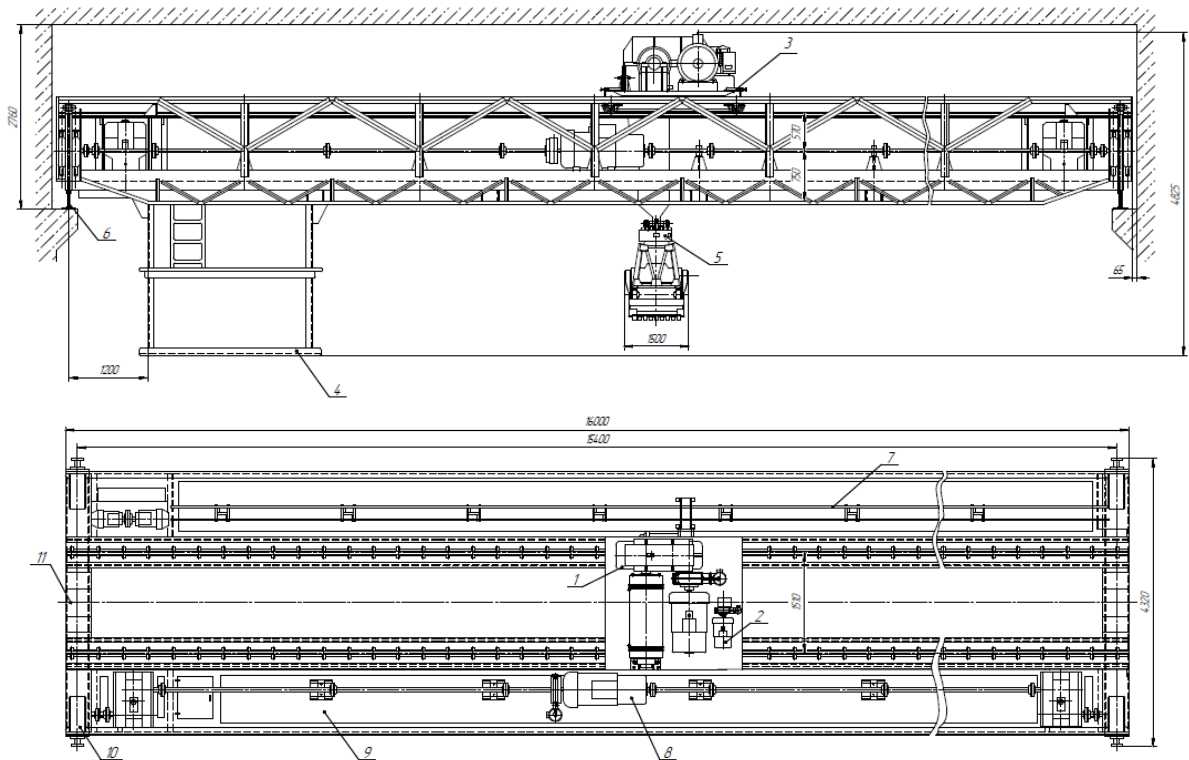


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд мостового крану з грейфером

1-механізм підйому, 2-механізм переміщення, 3-візок, 4-кабіна управління, 5-грейфер, 6-пуця підкранові, 7-тролеї, 8-механізм переміщення крана, 9-міст, 10-буфер, 11-кінцева балка

Зовнішній вигляд мостового крану з грейфером зображено на плакаті “Зовнішній вигляд грейферного крану” .

1.3 Механізми пересування мостів і вантажних візків кранів

Механізми візка забезпечують горизонтальне пересування мосту крана або його вантажного візка з рейковою колією. На розглянутих вантажопідіймальних кранах одержали поширення два типи механізмів пересування: перший - з приводними ходовими колесами і другий - з канатною тягою. У механізмі пересування першого типу всі деталі, включаючи приводні ходові колеса, розміщені на рамі, тому його застосовують для пересування самого крана або його вантажного візка. У разі, коли на рамі вантажного візка не вдається розмістити всі необхідні механізми, застосовують механізми судна другого типу. У цьому випадку вантажний візок виходить компактною, оскільки на ній встановлюють тільки

нерухомі блоки вантажного поліспаду, а інші деталі механізмів кріплять на мосту крана.

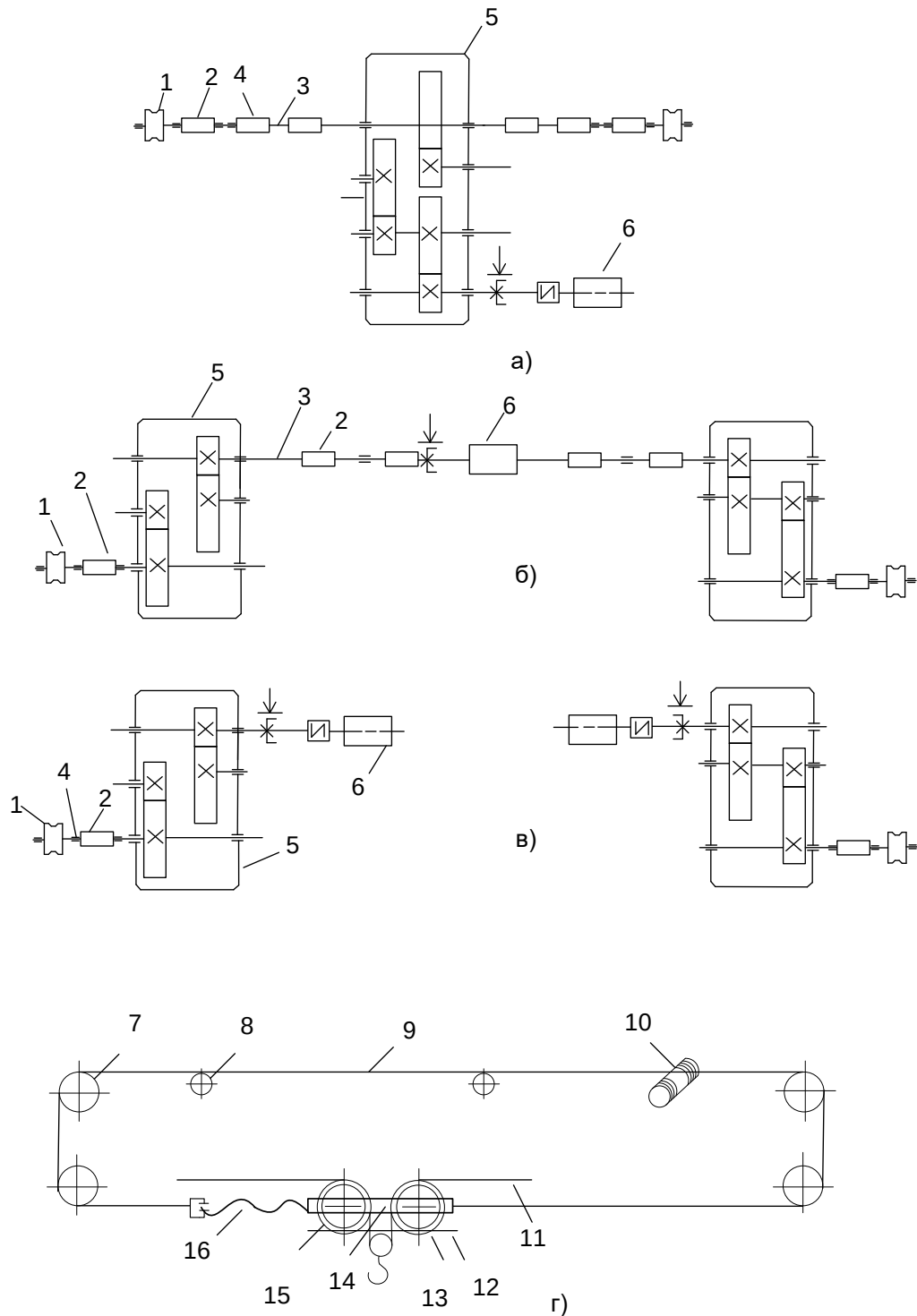


Рисунок 1.2 - Кінематичні схеми механізмів пересування мостового крана (першого типу) з тихохідним (а) і швидкохідним (б) валом трансмісії, з роздільним приводом (в) і вантажного візка (другого типу) (г)

Робочим органом механізму пересування першого типу є приводні ходові колеса 1. Залежно від типу крана, його конструкції і вантажних характеристик, механізми судна виконують з центральним або роздільним приводом рис.1.2. У механізмах пересування мостового крана з центральним приводом для зменшення перекосу крана електродвигун розташований в середині мосту крана, а крутний момент на приводні колеса передають трансмісійні вали. По конструкції розрізняють механізми з тихохідними (рис. 1.2.а), середньо-хідними і швидкохідними (рис. 1.2. б) трансмісійними валами. Зазначені схеми механізмів зазвичай застосовують на мостових, рідше козлових кранах. Трансмісійний вал виконаний з окремих секцій (зазвичай із труб) 3, сполучених зубчастими муфтами 2 і спираються на радіальні сферичні дворядні підшипники кочення 4. Розрізний вал є статично визначеної конструкцією, що спрощує його розрахунок. Кінематична схема механізму з тихохідним валом найбільш проста і поширена на мостових кранах і вантажних візках. Механізм має один центральний-розташований редуктор 5 і привід від електродвигуна 6.

Тихохідний трансмісійний вал, пов'язаний з вихідним валом редуктора і має малу частоту обертання, передає на ходові колеса максимальний крутний момент, у зв'язку з чим секції валу, муфти і підшипники мають значні габарити і маси. Зі збільшенням вантажопідйомності і прольоту крана число цих елементів і їх параметри зростають. На відміну від тихохідного швидкохідний трансмісійний вал пов'язаний з валом приводного двигуна, має високу частоту обертання і передає мінімальний крутний момент, тому його діаметр в 2...3 рази, а маса - в 4...6 разів менше. Однак необхідно пам'ятати, що його застосування вимагає високої точності монтажу деталей (особливо підшипників на жорстких опорах) і їх динамічного балансування. На роботу таких валів впливають деформації мосту, тому їх доцільно застосовувати в механізмах пересування кранових мостів з підвищеною жорсткістю конструкції при довжині прольоту більше 20 м.

Наявність двох бічних редукторів і довгих трансмісійних валів ускладнює і здорожує конструкцію механізму, тому останнім часом все більше застосування отримують механізми візка з роздільним приводом (рис. 1.2. в). Кожен електродвигун розраховують на 60% загальної необхідної потужності з урахуванням можливої нерівномірності їх завантаження.

Механізми пересування другого типу застосовують головним чином для пересування вантажних візків козлових кранів (рис. 2. г). Робочим органом такого механізму є барабан тягової лебідки, а тяговим органом – канат 9. Тягова лебідка встановлена на металоконструкції крана. Тяговий орган виконаний у вигляді двох гілок - верхній і нижній. Кінці обох гілок прикріплені до рами вантажного візка 14, а протилежні кінці гілок навиваються на барабан лебідки в протилежних напрямках. При цьому при обертанні барабана в певному напрямку одна гілка навивається на нього, а інша звивається, здійснюючи тим самим пересування візка на ходових колесах 13 по рейковому шляху 12. При реверсуванні барабана лебідки (механізму) вантажний візок рухається в протилежному напрямку. Так як механізм встановлений на рамі крана, то тяговий орган 9 проходить через систему підтримуючих 8 і відвідних 7 блоків. Вузол кріплення 16 тягового органу до візку передбачає можливість його натягу при запасці і в процесі експлуатації. В цьому випадку і механізм підйому вантажу розташований на металоконструкції крана, а вантажний канат огинає нерухомі блоки вантажного поліспасту, закріплені на візку.

1.4 Металоконструкція мосту крана

Міст крана є опорною конструкцією, на якій розміщені всі механізми крана. У плані металоконструкції мосту являє собою раму, утворену головними (або прогонними) і кінцевими балками. За головних балок, розташованих поперек прольоту цеху, пересувається кранова візок. Уздовж прольоту на кінцевих балках розташовані колеса для пересування мосту і привід.

Найбільше поширення має коробчаста конструкція мостового крана, що володіє високою втомної міцністю, найменшою загальною висотою мосту і можливістю застосування на кінцевих балках вкатних коліс; ця конструкція також легка у виготовленні. Головні балки коробчастого перетину виконують із чотирьох (рідше трьох) замкнутих просторових листових площин. Просторову жорсткість конструкції забезпечують діафрагми, встановлені всередині балки по довжині прольоту і ребра жорсткості.

Незалежно від конструкції головних балок мосту крана кінцеві балки мають, як правило, коробчастий поперечний переріз. З'єднання головних балок мосту з кінцевими здійснюють зварюванням.

Крім того, застосовують з'єднання головних і кінцевих балок мосту на болтах. Цей спосіб забезпечує швидкий, точний монтаж мосту на місці його експлуатації та виключає деформацію, можливу при з'єднанні зварюванням.

Двобалкові і деякі одно балкові мости кранів мають консольні робочі та перехідні майданчики для обслуговування обладнання. Майданчики складаються з горизонтальних кронштейнів, приварених до головних балок крана, покритих сталевим настилом і огорожених поручнями.

Міст крана є основною несучою конструкцією, на якій розміщені вантажний візок, механізми візка і кабіна керування крана. У плані металоконструкції мосту являє собою раму (рис. 1.3), утворену головними (прогонними) і кінцевими балками. По головних балок, розташованим поперек прольоту цеху (естакади), пересувається вантажний крановий візок. На кінцевих балках розташовані ходові колеса для пересування мосту і привід.

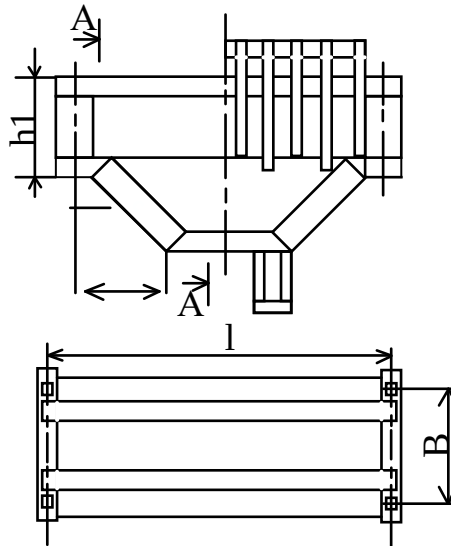


Рисунок 1.3 - Схема конструкції двобалкового мостового крана.

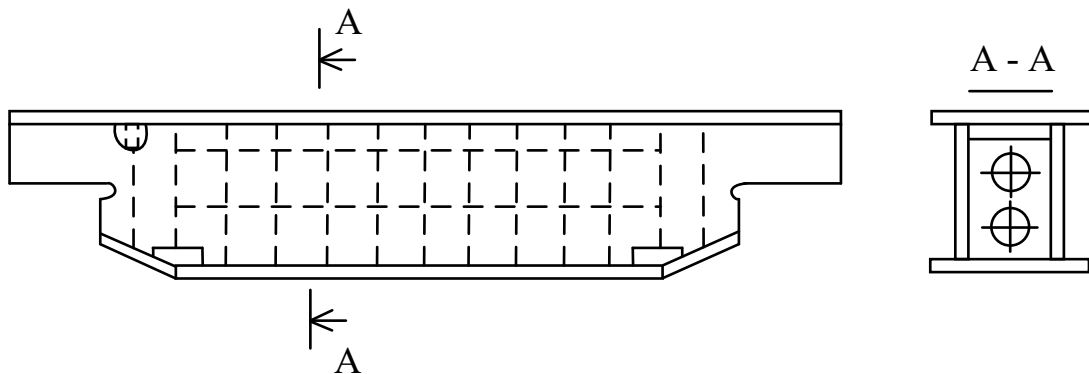


Рисунок 1.4 - Головна балка коробчастого перетину

Головна балка коробчастого перетину мостового крана (рис. 1.4) складається з нижнього пояса, бічних вертикальних стінок, великих і малих діафрагм, верхнього поясу і куточків.

Головні балки в залежності від вантажопідйомності моста і його прольоту відрізняються тільки розмірами перетину коробки і кількістю діафрагм, що дозволяє широко застосовувати уніфікацію в технологічному процесі їх виготовлення.

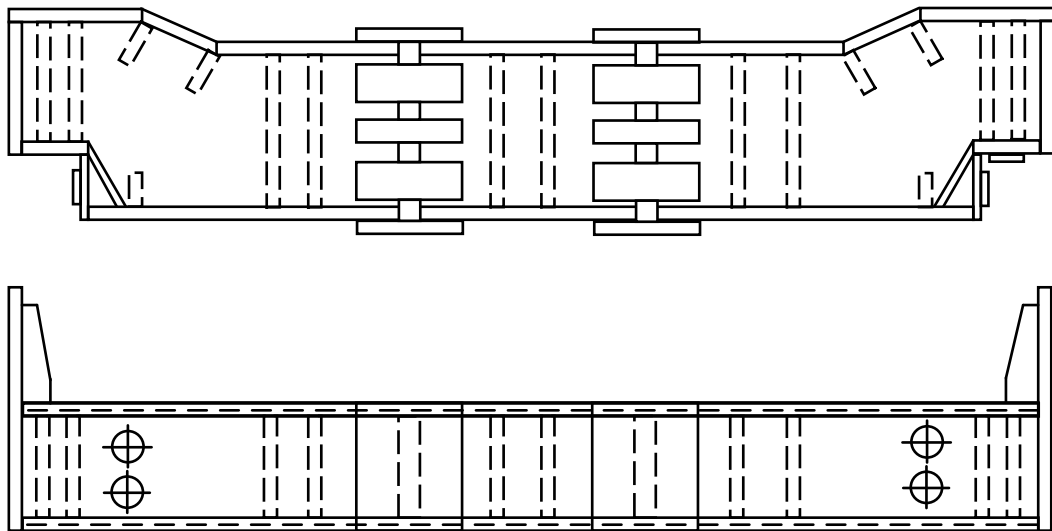


Рисунок 1.5 - Кінцева балка коробчастого перетину

Кінцева балка є опорним елементом головної балки і являє собою жорстку зварену металеву конструкцію (рис.1.5), найчастіше коробчастого перетину, з встановленою на ній ходовою частиною крана.

Металева конструкція кінцевими балки складається з двох поясів, двох вертикальних стінок і діафрагм, розміщених всередині балки. Для установки ходової частини крана до кінцевих балок приварюють посадочні пластини з обробленими поверхнями, до яких за допомогою болтів кріплять букси з ходовими колесами. З'єднання головних балок мосту з кінцевими здійснюють зварювання.

1.5 Кабіна керування краном

Кабіна повинна бути розташована в такому місці, щоб кранівник міг спостерігати за зачіпкою вантажу, вантажозахоплювальним органом і вантажем протягом роботи крана.

Кабіна встановлюється під галереєю мосту з протилежного боку від головних тролів або підвішується до рами візка. Допускається щоб кабіна розташовувалася з боку головних тролів, але в місті виходу обслуговуючого персоналу на посадкову площадку, тролі повинні бути захищені.

Кабіна керування повинна мати наступні мінімальні розміри:

- висоту - 2 м

- ширину - 0,9м
- довжину - 1,3 м
- мінімальний обсяг - 3м³

Кабіни бувають відкритого і закритого типу.

Кабіна відкритого типу повинна мати суцільне верхнє перекриття і суцільне огороження з усіх боків (по периметру) висотою не менш 1,1 м

Кабіна закритого типу повинна мати світлові отвори, які виконані зі скла, що не б'ється.(без осколкового).

Двері для входу в кабінку можуть бути розпашними або розсувними. Розпашні двері повинні відкриватися всередину кабінки за винятком випадків, коли перед входом в кабінку є тамбур або майданчик з відповідною огорожею. У цьому випадку двері можуть відкриватися назовні.

Підлога в кабінці крана з електричним приводом повинна мати настил не з металевих матеріалів і покрита діелектричним килимком (500 × 700)

Основними факторами, які визначають умови роботи кранівника є:

- температура і вологість навколишнього середовища,
- швидкість вітру,
- рівень шуму,
- запиленість,
- наявність шкідливих для здоров'я газів,
- видимість,
- вібрація,
- ступінь зручності робочого місця кранівника.
- кабіна крана повинна бути обладнана стаціонарним сидінням

регулюючого по висоті і поворотним.

У кабінці повинен бути забезпечений температурний режим, тому в кабінці можуть встановлюватися опалювальні прилади: стаціонарні, заводські закритого типу, повинні дотримуватися протипожежні заходи безпеки. Підключається опалювальний прилад після рубильника. У випадку, якщо

недостатньо освітлення в кабіні, має перебувати додаткове і ремонтне освітлення в мережі не повинно перевищувати 42 В (низьковольтні ланцюги). Ремонтне освітлення і освітлення кабіни підключається до рубильника. (Кран включений чи ні освітлення повинно працювати.)

1.6 Електрообладнання крана

Електрообладнання призначено для включення і виключення електродвигунів, гальм реверсування електродвигуна, регулювання швидкостей і обмеження робочого руху механізмів крана в заданих межах, захисту персоналу від враження електричним струмом, забезпечення умов зручного керування, обслуговування та максимально продуктивності вантажопідіймальності крана.

Кранове обладнання має маркування: буквене позначення вказує його назву, а наступні цифри - основну технічну характеристику і модифікацію.

За призначенням кранове електрообладнання поділяється на:

- основне
- допоміжне

До основного електрообладнання відносяться: електродвигуни, приводи гальм, гальмівні електромагніти, апарати управління електродвигунами і приводами гальм (контролери), контактори, магнітні пускачі, реле, опір регулюючий пуск.

Допоміжне обладнання-це обладнання робочого та ремонтного освітлення крана, прилади звукової та світлової сигналізації, вентиляції, опалення, зв'язку.

В якості додаткової апаратури застосовуються контролери для управління грейферним або вантажним електромагнітом, ножні педалі для управління окремими механізмами, автоматичні вимикачі різних ланцюгів, розподільні щити та інше обладнання.

Мостові крани отримують живлення також від цехових підстанцій або розподільних щитів. Напруга спочатку подається по дротах або кабелях, а

потім через контактні дроти (тролів) проложено по клонам цеху уздовж шляху крану, - на ковзаючи струмоприймачі, прикріплені до моста крану. Від струмоприймачів напруга поступає в захисну панель, що знаходиться в кабіні машиніста крану, і через контролери - до двигунів і гальмівних електромагнітів. На захисній панелі встановлені ввідний рубильник, контактори і захисні реле. Ця апаратура захищає двигуни від перевантажень і ушкоджень при коротких замиканнях. Електричні блокування передбачені в схемі захисної панелі, не дозволяють машиністові порушувати правильний порядок управління механізмами крану. Наприклад, апаратура захисної панелі включиться і подасть напругу до контролера тільки у тому випадку, якщо усі контролери будуть поставлені в нульове (неробоче) положення. Це одно з вимог техніки безпеки.

У комплект електроустаткування кожного механізму крану входять двигуни, гальмівні електромагніти, кінцеві вмикачі, контролера, контактори і пускорегулюючі опори. Двигуни приводять в дію усі механізми крану. За допомогою гальмівних електромагнітів управляються гальма механізмів кранів. Контролери з контакторами і опорами служать для пуску і зупинки двигунів і регулювання швидкості руху механізмів. Контролери з контакторами і опорами служать для пуску і зупинки двигунів і регулювання швидкості руху механізмів. Крани забезпечуються різними приладами безпеки:

- звуковий сигнал;
- обмежувачі ходу крана (кінцеві вимикачі);
- обмежувачі ходу кранового візка;
- обмежувачі підйому гака;
- обмежувачі вантажопідйомності;
- пристрій для зняття напруги з крана при виході кранівника на галерею;
- упори на кінцях кранових колій.

Висновок за розділом 1

Проведено аналіз мостового крану, було здійснено огляд мостового крану, його електрообладнання, механізм пересування як самого крану так і його візка, описано металоконструкції мосту, а також було розглянуто кабінку керування краном.

2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

2.1 Постановка завдання

Розробити електропривод переміщення мостового крану з наступними характеристиками (приведено у таблиці 2.1).

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Маса крану	$m_k = 19713(\text{кг})$
Вантажопідйомність крану	$m_{\text{в}} = 16000(\text{кг})$
Проліт крану	$L = 16.5(\text{м})$
Діаметр ходових коліс	$D_k = 0.71(\text{м})$
Швидкість переміщення	$V = 1.33(\text{м} / \text{с})$
Максимальне прискорення	$a_{\text{max}} = 0.25(\text{м} / \text{с}^2)$
ККД механізму	$\eta_{\text{мех}} = 80\%$
Число ходових коліс	$n_k = 4$
Число ведучих коліс	$n_{\text{вк}} = 2$
Час вмикання двигуна	$TB = 25\%$

2.2 Формування вимог до електроприводу механізму переміщення мостового крану

Для якісної роботи системи переміщення мостового крану його електроприводи повинні відповідати певним вимогам:

- Забезпечувати мінімальний показник швидкості;
- В рухомому і гальмівному режимах роботи, забезпечувати роботу електроприводу;
- При мінімальних тривалості перехідних процесів прискорення повинно обмежуватись до допустимих меж. Для основних типових кранів, прискорення у механізмі переміщення повинно відповідати певним межам від 0.1 до 0.8 м/с^2 . Окрім цього, прискорення механізмів також обмежується в залежності від певних типів вантажу, прикладом цього є перевезення рідких металів, прискорення якого повинно дорівнювати $0.1 - 0.2 \text{ м/с}^2$. Щоб забезпечувати певний рівень прискорення, у типових системах, тривалість пуску повинна дорівнювати $4 - 6 \text{ с.}$;
- Механічні характеристики повинні бути жорсткими, особливо регульовальні, щоб величина швидкості майже не залежала від навантаження;
- Регульована швидкість двигуна повинна забезпечуватись в порівняно широких межах: для звичайних кранів від $4:1$ до $70:1$

2.3 Розрахунок електроприводу переміщення мостового крану

Кінематична схема механізму переміщення мостового крану зображена на рис. 2.1.

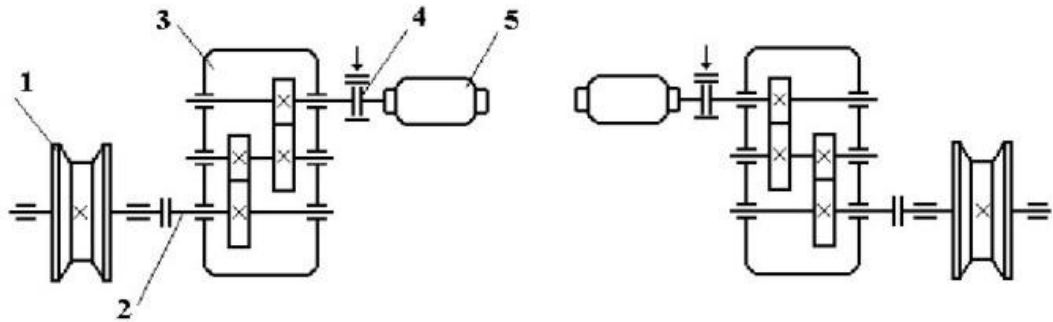


Рисунок 2.1 – Кінематична схема механізму переміщення мостового крану

1 – ходове колесо; 2 – кардан; 3 – редуктор; 4 – швидкохідна муфта з тормозом; 5 – електродвигун.

Побудова навантажувальної діаграми:

Час розгону та гальмування:

$$t_{pe} = \frac{V}{a_{\max}} = \frac{1.33}{0.25} = 5.32 \text{ (с)} \quad (2.1)$$

Відстань пройдена за час розгону і гальмування:

$$L_{pe} = \frac{a_{\max} \cdot t_{pe}^2}{2} = \frac{0.25 \cdot 5.32^2}{2} = 3.538 \text{ (м)} \quad (2.2)$$

Відстань при русі з усталеною швидкістю:

$$L_{yсм} = L - 2 \cdot L_{pe} = 16.5 - 2 \cdot 3.538 = 9.43 \text{ (м)} \quad (2.3)$$

Час при русі з усталеною швидкістю:

$$t_{yсм} = \frac{L_{yсм}}{V} = \frac{9.43}{1.33} = 7.09 \text{ (с)} \quad (2.4)$$

Загальний час при русі в одну сторону:

$$t_{заг} = t_{yсм} + 2 \cdot t_{pe} = 7.09 + 2 \cdot 5.32 = 17.73 \text{ (с)} \quad (2.5)$$

Загальний час роботи циклу:

$$t_p = 2 \cdot t_{заг} = 2 \cdot 17.73 = 35.46 \text{ (с)} \quad (2.6)$$

Час паузи:

$$t_n = t_p \cdot \left(\frac{100}{TB} - 1 \right) = 35.46 \cdot \left(\frac{100}{25} - 1 \right) = 106.38 \text{ (с)} \quad (2.7)$$

Час повного циклу:

$$T_{\text{ц}} = t_p + t_n = 35.46 + 106.38 = 141.84(\text{с}) \quad (2.8)$$

Оберемо швидкість обертання:

$$n = 1500(\text{об/хв})$$

Частота обертання:

$$\omega_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157(\text{рад/с}) \quad (2.9)$$

Кутова швидкість коліс:

$$\omega_k = \frac{2 \cdot V}{D_k} = \frac{2 \cdot 1.33}{0.71} = 3.746(\text{рад/с}) \quad (2.10)$$

Передаточне число:

$$i = \frac{\omega_d}{\omega_k} = \frac{157}{3.746} = 41.91 \quad (2.11)$$

Радіус інерції:

$$\rho = \frac{D_k}{2 \cdot i} = \frac{0.71}{2 \cdot 22.4} = 0.00847(\text{м}) \quad (2.12)$$

Тахограма обертання приводу механізму переміщення крану зображена на рис. 2.2.

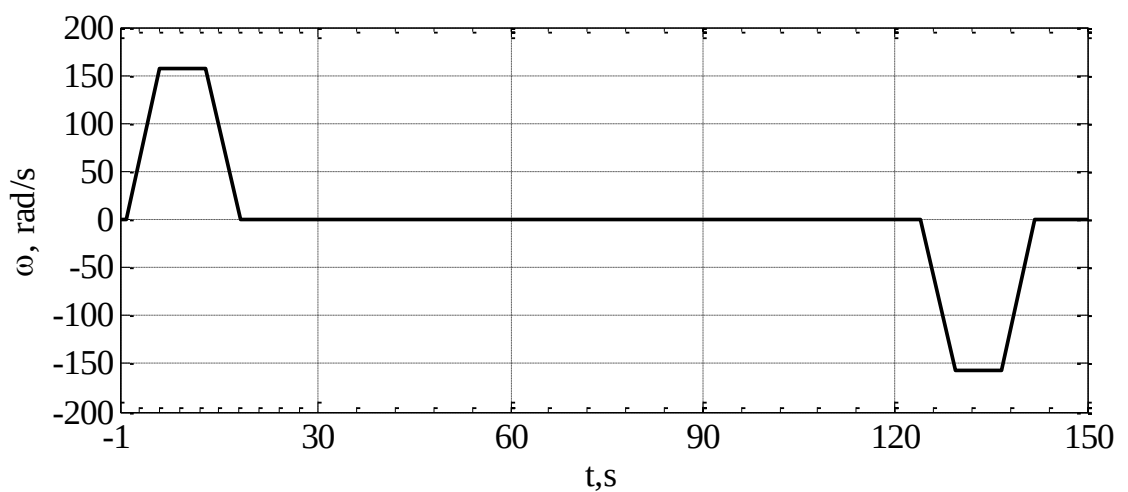


Рисунок 2.2 - Тахограма обертання приводу механізму переміщення крану

Оберемо наступні значення параметрів та коефіцієнтів:

Коефіцієнт запасу на динаміку: $K_3 = 1.2$;

Коефіцієнт, що враховує тертя в ребордах: $K_p = 1.5$;

Коефіцієнт тертя ковзання: $\mu = 0.08$;

Коефіцієнт тертя кочення: $f = 0.003$;

Радіус цапфи: $R_u = 0.045(\text{м})$;

Статичний момент крану з вантажем:

$$M_{c1} = \frac{g \cdot K_p \cdot (m_k + m_e) \cdot (\mu \cdot R_u + f)}{i \cdot \eta_{\text{мех}}},$$

$$M_{c1} = \frac{9.81 \cdot 1.5 \cdot (19713 + 16000) \cdot (0.08 \cdot 0.045 + 0.003)}{41.91 \cdot 0.8} = 103.448 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.13)$$

Статичний момент крану без вантажу:

$$M_{c2} = \frac{g \cdot K_p \cdot m_k \cdot (\mu \cdot R_u + f)}{i \cdot \eta_{\text{мех}}},$$

$$M_{c2} = \frac{9.81 \cdot 1.5 \cdot 19713 \cdot (0.08 \cdot 0.045 + 0.003)}{41.91 \cdot 0.8} = 57.1 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.14)$$

Навантажувальна діаграма механізму переміщення по статичному моменту зображена на рис. 2.3.

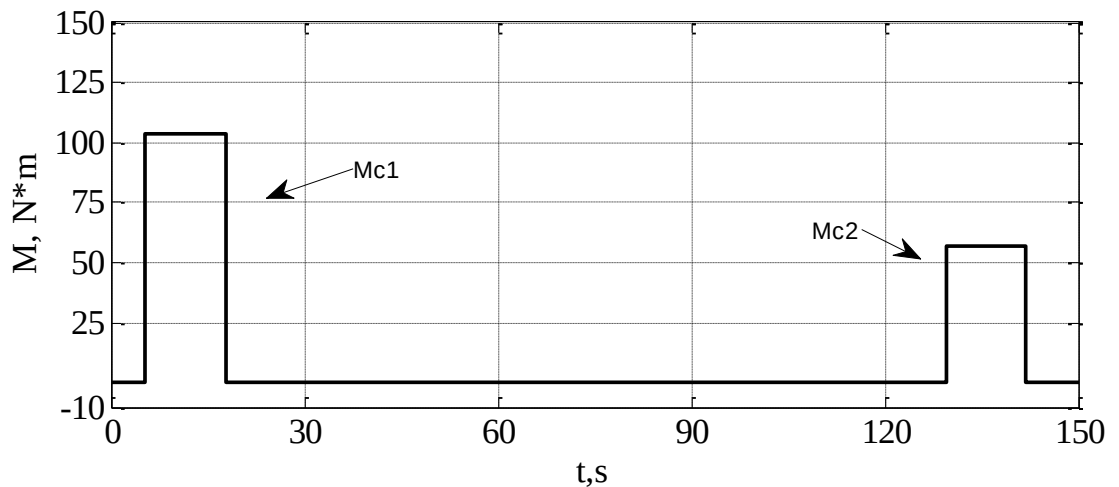


Рисунок 2.3 – Навантажувальна діаграма механізму переміщення по статичному моменту

Знайдемо еквівалентний момент:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 \cdot t_{заг} + M_{c2}^2 \cdot t_{заг}}{2 \cdot t_{заг}}},$$

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{103.448^2 \cdot 17.73 + 57.1^2 \cdot 17.73}{2 \cdot 17.73}} = 83.553 (H \cdot m) \quad (2.15)$$

Приведемо тривалість включення до найближчого стандартного значення

($TB_H = 25\%$):

$$M'_{екв} = M_{екв} \cdot \sqrt{\frac{TB}{TB_H}} = 83.553 \cdot \sqrt{\frac{25}{25}} = 83.553 (H \cdot m) \quad (2.16)$$

Знаходимо розрахункову потужність:

$$P_{роз} = K_z \cdot M'_{екв} \cdot \omega_d = 1.2 \cdot 83.553 \cdot 157 = 15741 (Bm) \quad (2.17)$$

2.4 Попередній вибір двигуна

З отриманого значення потужності на валу: $P = 15.7$ (кВт) попередньо вибираємо два двигуни потужністю 8 (кВт).

Варто було обрати спеціальний двигун, який використовується для кранових механізмів, призначених для приводу підйомно-транспортних установок, таких як кран-балка, автокран, мостовий кран, але так як параметри спеціальних кранових двигунів [8] були неповними, то було обрано асинхронний двигун [7] з короткозамкненим ротором серії: 4A132S1Y3. Цей двигун має дві схеми підключення (трикутник / зірка) в залежності від напруги мережі 220/380 В. Потужність електродвигуна дорівнює 8 кВт, а частота обертання – 1500 об/хв. Двигун призначений для роботи в повторно-короткочасному режимі роботи.

Паспортні дані двигуна 4A132S1Y3, при з'єднанні обмоток статора в зірку, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані двигуна 4A132S1Y3

Номінальна потужність двигуна	$P_n = 8 \text{ (кВт)}$
Частота обертання двигуна	$n_n = 1500 \text{ (об / хв)}$
Коефіцієнт потужності двигуна	$\cos\varphi = 0.85$
Момент інерції двигуна	$J_{\partial\partial} = 0.028 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$
Перенавантажувальна здатність двигуна	$\lambda = 2.2$
Номінальний ККД двигуна	$\eta = 87.5\%$
Число пар полюсів двигуна	$p_n = 2$
Номінальна лінійна напруга двигуна	$U_{\text{лн}} = 380 \text{ (В)}$
Номінальне ковзання двигуна	$s_n = 9.6\%$
Критичне ковзання двигуна	$s_k = 42.7\%$
Номінальна частота напруги двигуна	$f_n = 50 \text{ Гц}$
Параметри схеми заміщення - Г-подібної у відносних одиницях	
Індуктивний опір розсіювання статора	$x'_1 = 0.085$
Активний опір статора	$R'_1 = 0.048$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$x''_2 = 0.13$

Приведений активний опір ротора	$R_2'' = 0.033$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 3$

Розрахунок синхронної швидкості [9]:

$$\omega_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ (рад / с)} \quad (2.18)$$

Розрахунок номінальної швидкості:

$$\omega_n = \omega_c \cdot (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.096) = 141.928 \text{ (рад / с)} \quad (2.19)$$

Розрахунок кутового прискорення:

$$\varepsilon = \frac{a_{\max}}{\rho} = \frac{0.25}{0.00847} = 29.516 \text{ (рад / с}^2\text{)} \quad (2.20)$$

Розрахунок моментів двигуна:

Номінальний момент:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{8000}{141.928} = 56.366 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.21)$$

Критичний момент:

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.2 \cdot 56.366 = 124 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.22)$$

Розрахунок кутової частоти напруги статора:

$$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад / с)} \quad (2.23)$$

Розрахунок фазної номінальної напруги двигуна:

$$U_n = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393 \text{ (В)} \quad (2.24)$$

Номінальний струм статора:

$$I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{8000}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.875 \cdot 0.85} = 16.342 \text{ (А)} \quad (2.25)$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.268(B) \quad (2.26)$$

Амплітудне значення струму:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 16.342 = 23.111(A) \quad (2.27)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $r_1 = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{on}} = \frac{310.268}{314} = 0.99 (B\bar{o}) \quad (2.28)$$

Приведення моментів інерції:

Моментом інерції гальмівного шківів та редуктора – знехтуємо:

$$J'_{u} = J'_p = 0 (\kappa\bar{z} \cdot m^2) \quad (2.29)$$

Рух крану з вантажем:

$$J'_{\Sigma 1} = J_{\partial} \cdot 1.2 + \frac{(m_{\partial} + m_{\kappa}) \cdot \left(\frac{D_{\kappa}}{4}\right)^2}{i^2 \cdot \eta},$$

$$J'_{\Sigma 1} = 0.028 \cdot 1.2 + \frac{(19713 + 16000) \cdot \left(\frac{0.71}{4}\right)^2}{41.91^2 \cdot 0.875} = 0.765 (\kappa\bar{z} \cdot m^2) \quad (2.30)$$

Рух крану без вантажу:

$$J'_{\Sigma 2} = J_{\partial} \cdot 1.2 + \frac{m_{\kappa} \cdot \left(\frac{D_{\kappa}}{4}\right)^2}{i^2 \cdot \eta} = 0.028 \cdot 1.2 + \frac{19713 \cdot \left(\frac{0.71}{4}\right)^2}{41.91^2 \cdot 0.875} = 0.437 (\kappa\bar{z} \cdot m^2) \quad (2.31)$$

2.5 Побудова навантажувальної діаграми та перевірка правильності вибору двигуна

Розрахунок динамічних моментів:

Пуск мостового крану з вантажем:

$$M_{пв} = \varepsilon \cdot J'_{\Sigma 1} + M_{c1} = 29.516 \cdot 0.765 + 103.448 = 126.028 (H \cdot m) \quad (2.32)$$

Рук мостового крану зі сталою швидкістю і вантажем:

$$M_{уств} = M_{c1} = 103.448 (H \cdot m) \quad (2.33)$$

Гальмування мостового крану з вантажем:

$$M_{зв} = -\varepsilon \cdot J'_{\Sigma 1} + M_{c1} = -29.516 \cdot 0.765 + 103.448 = 80.868 (H \cdot m) \quad (2.34)$$

Пуск мостового крану без вантажу:

$$M_{пбв} = \varepsilon \cdot J'_{\Sigma 2} + M_{c2} = 29.516 \cdot 0.437 + 57.1 = 70 (H \cdot m) \quad (2.35)$$

Рук мостового крану зі сталою швидкістю без вантажу:

$$M_{устбв} = M_{c2} = 57.1 (H \cdot m) \quad (2.36)$$

Гальмування мостового крану без вантажу:

$$M_{збв} = -\varepsilon \cdot J'_{\Sigma 2} + M_{c2} = -29.516 \cdot 0.437 + 57.1 = 44.203 (H \cdot m) \quad (2.34)$$

Побудована навантажувальна діаграма системи переміщення мостового крану із врахуванням динамічного моменту зображена на рис. 2.4.

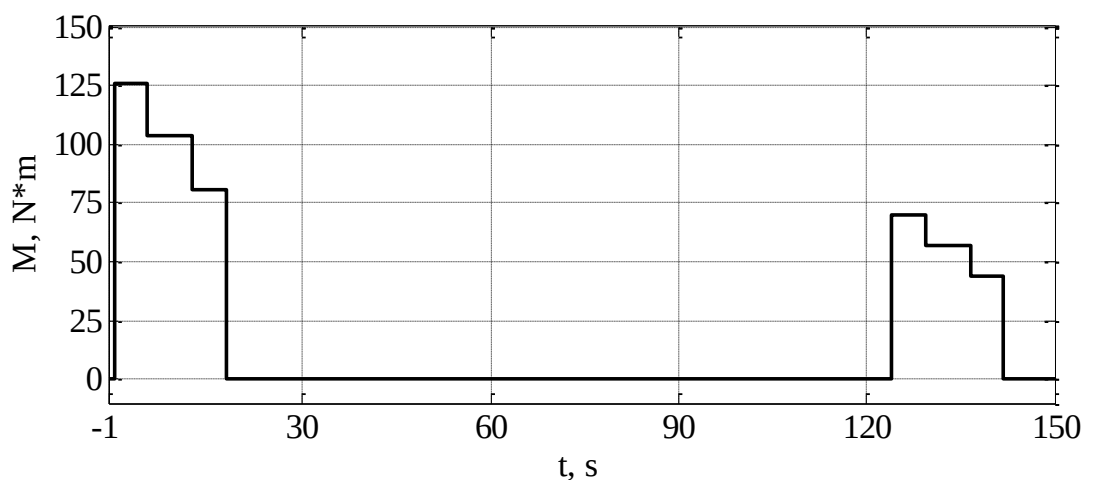


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма із врахуванням динамічного моменту

Оскільки дана система використовує два однакових двигунами, то:

$$M_{пвн} = \frac{M_{пв}}{2} = \frac{126.028}{2} = 63.014 (H \cdot м) \quad (2.35)$$

Перевірка двигуна по перевантажувальній здатності:

$$\lambda \cdot M_n = 2.2 \cdot 56.366 = 124 (H \cdot м) > M_{пвн} = 63.014 (H \cdot м) \quad (2.36)$$

Отже, даний двигун задовольняє умову перевантажувальної здатності і проходить по ній.

Перевірка двигуна на нагрів по еквівалентному моменту:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{(M_{зв}^2 + M_{збв}^2 + M_{пв}^2 + M_{пбв}^2) \cdot t_{pg} + (M_{c1}^2 + M_{c2}^2) \cdot t_{уст}}{2 \cdot (2 \cdot t_{pg} + t_{уст})}},$$

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{(80.868^2 + 44.203^2 + 126.028^2 + 70^2) \cdot 5.32}{2 \cdot (2 \cdot 5.32 + 7.09)}} +$$

$$+ \sqrt{\frac{(103.448^2 + 57.1^2) \cdot 7.09}{2 \cdot (2 \cdot 5.32 + 7.09)}} = 84.758 (H \cdot м) \quad (2.37)$$

Оскільки дана система використовує два однакових двигунами, то:

$$M_{еквн} = \frac{M_{екв}}{2} = \frac{84.758}{2} = 42.379 (H \cdot м) \quad (2.38)$$

Для врахування погіршення умов, які впливають на вентиляцію перерахуємо ТВ:

$$TB' = \frac{2 \cdot (2 \cdot t_{pg} + t_{уст})}{2 \cdot t_{уст} + 4 \cdot t_{pg} \cdot \gamma + t_n \cdot \beta_0} \cdot 100,$$

$$TB' = \frac{2 \cdot (2 \cdot 5.32 + 7.09)}{2 \cdot 7.09 + 4 \cdot 5.32 \cdot 0.75 + 106.38 \cdot 0.5} \cdot 100 = 42.5 \% \quad (2.39)$$

Де: $\gamma = 0.75$ - коефіцієнт погіршення тепловіддачі в режимах гальмування та пуску;

$\beta_0 = 0.5$ - коефіцієнт погіршення тепловіддачі в період паузи.

$$M'_{еквн} = M_{еквн} \cdot \sqrt{\frac{TB'}{TB_n}} = 42.379 \cdot \sqrt{\frac{42.5}{25}} = 55.255 (H \cdot m) \quad (2.40)$$

$$M'_{еквн} = 55.255 (H \cdot m) < M_n = 56.366 (H \cdot m) \quad (2.41)$$

Вибраний двигун задовольняє умови нагріву.

2.6 Вибір редуктора

Для даної системи електроприводу вибираємо циліндричний мотор-редуктор IRON серії ITH 112/3.

Даний редуктор має такі характеристики:

Кількість ступенів: 2/3;

Передаточне число: 5.38-247;

Діаметр вихідного валу: 35 (мм);

Можливий крутний момент до: 3500 (H · м);

Вихідний момент: 700 (H · м);

Максимальне радіальне навантаження: 22500 (Н);

Потужність двигуна: 0.25-9.2 (кВт).

2.7 Визначення параметрів схеми заміщення моделі асинхронного двигуна

Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми заміщення в Т-подібну використовують наступну методику:

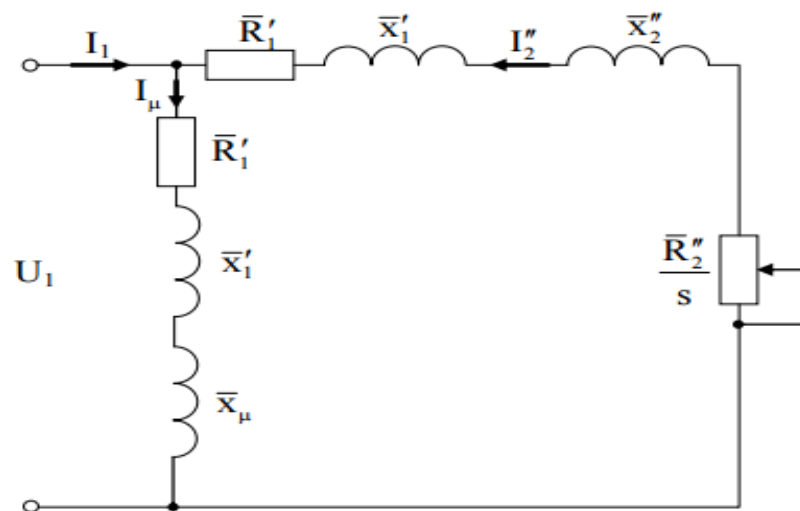


Рисунок 2.5 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

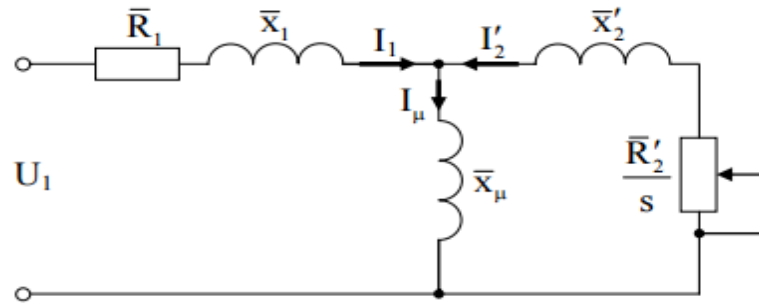


Рисунок 2.6 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Амплітудні та номінальні діючі значення фазного струму та напруги було розраховано і записано вище в рівняннях (2.24)-(2.27).

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення у абсолютних одиницях:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.085 \cdot \frac{219.393}{20.972} = 1.141(\text{Ом}) \\
 R_1 &= \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.048 \cdot \frac{219.393}{20.972} = 0.644(\text{Ом}) \\
 x_2' &= \bar{x}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.13 \cdot \frac{219.393}{20.972} = 1.745(\text{Ом}) \\
 R_2' &= \bar{R}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.033 \cdot \frac{219.393}{20.972} = 0.44(\text{Ом}) \\
 x_\mu &= \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 3 \cdot \frac{219.393}{20.972} = 40.275(\text{Ом})
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Розрахунок індуктивності:

Намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_c} = \frac{40.275}{314} = 0.128(\text{Гн}) \tag{2.43}$$

Розсіювання ротора і статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_c} = \frac{1.141}{314} = 0.0036(\Gamma_H)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_c} = \frac{1.745}{314} = 0.0055(\Gamma_H)$$
(2.44)

Ротора і статора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.128 + 0.0036 = 0.1316(\Gamma_H)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.128 + 0.0055 = 0.1335(\Gamma_H)$$
(2.45)

На основі даних розрахунків, обчислимо значення параметрів α , β , γ , σ :

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0.44}{0.1335} = 3.296(Ом / \Gamma_H)$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.1316 - \frac{0.128^2}{0.1335} = 0.0089(\Gamma_H)$$
(2.46)

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.128}{0.1335 \cdot 0.0089} = 107.73(1 / \Gamma_H)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.644}{0.0089} + 3.296 \cdot 0.128 \cdot 107.73 = 117.809(Ом / \Gamma_H)$$

Розрахунки параметрів двигуна 4A132S1Y3 занесені до Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Обчислені параметри двигуна 4A132S1Y3

$P_H, \kappa Bm$	8	$R_1, Ом$	0.644
$\omega_{xx}, рад / с$	157	$R_2', Ом$	0.44
$\omega_n, рад / с$	141.928	L_1, Γ_H	0.1316
$M_n, H \cdot m$	56.366	L_2, Γ_H	0.1335
$M_k, H \cdot m$	124	L_m, Γ_H	0.128
λ	2.2	$J_{\partial}, \kappa з / м^2$	0.028

I_n, A	16.342	α	3.296
$\psi_{1xx}, B\bar{b}$	0.99	β	107.73
η	0.875	γ	117.809
$\cos(\varphi)$	0.85	σ	0.0089

Висновок за розділом 2

В цьому розділі було розглянуто завдання на дипломний проект, сформульовано вимоги до механізму переміщення мостового крану, було здійснено розрахунок потужності та вибір двигуна. З отриманих значень обрали два однакові двигуни з короткозамкненим ротором серії: 4A132S1Y3 потужність кожного дорівнює 8 кВт. Також здійснили вибір мотор-редуктора, максимальний крутний момент якого сягає $3500 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Також для моделюючої програми було розраховано параметри схеми заміщення асинхронного двигуна.

3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Найпоширенішими на сьогоднішній день електричними двигунами є асинхронні двигуни, за рахунок своєї низької ціни, а також надійності. Яскравим прикладом таких електродвигунів є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, якого надійність і низька ціна забезпечується, тим що будова ротора являє собою короткозамкнену “білячу клітку”, яка не потребує підводу живлення для створення магнітного потоку. Швидкість обертання ротору теоретично є усталеною і на пряму залежить від числа пар полюсів та частоти мережі. Але регулювати її складно, із-за нелінійності залежності моменту двигуна і струму ротору.

В цьому розділі виконано розробку системи непрямого векторного керування, згідно із поставленою задачею.

3.1 Формулювання задачі векторного керування

Для того щоб моделювати систему керування асинхронного двигуна прийнято використовувати математичну модель, що записується в синхронній системі координат $(d - q)$ [15], [16]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, & M &= \mu(\psi_{2d}i_{1q} - \psi_{2q}i_{1d}), \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_o i_{1q} + \alpha\beta\psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d}, \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_o i_{1d} - \alpha\beta\psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q}, \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha\psi_{2d} + p_n \omega_2 \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha\psi_{2q} - p_n \omega_2 \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q},\end{aligned}\tag{3.1}$$

де: ω – кутова швидкість ротора, $\omega_2 = \omega_o - \omega$, $(i_{1d}, i_{1q})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат $(d - q)$, $(\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$ –

компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(u_{1d}, u_{1q})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, ν – коефіцієнт в'язкого тертя.

Для того щоб спростити регулювати асинхронним двигуном вводиться поняття синхронної системи координат, що позначається як $(d-q)$. Синхронна система координат обертається відносно стаціонарної системи координат в $(a-b)$ зі швидкістю ω_0 , рис. 3.1.

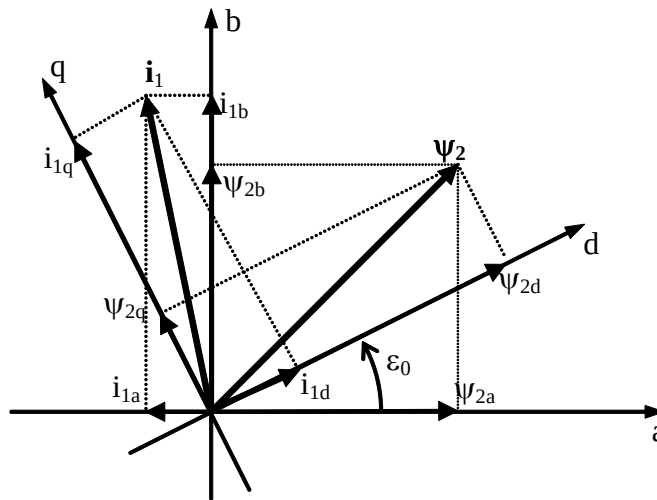


Рисунок 3.1 - Розташування векторів асинхронного двигуна

Перетворення координат виконується наступним чином:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-j\epsilon_0} \mathbf{x}_{ab} \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{j\epsilon_0} \mathbf{x}_{dq} \end{aligned} \quad \text{де} \quad \mathbf{e}^{-j\epsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\epsilon_0 & \sin\epsilon_0 \\ -\sin\epsilon_0 & \cos\epsilon_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

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

Проблема відпрацювання траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення, які задаються – формулюється наступним чином [10]. Припустимо, що для моделі асинхронного двигуна, заданої в (3.1), виконується наступне:

A.1. Струми статора і кутова швидкість ротора можна виміряти, вони є доступними.

A2. Параметри асинхронного двигуна є відомими та незмінними.

A3. Момент навантаження M_c є невідомим, постійним та обмеженим.

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

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів як прямого так і непрямого векторного керування що забезпечують:

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (3.3)$$

при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних, де $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$, $\tilde{\psi} = \psi - \psi^*$

O2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0 \quad (3.4)$$

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

O4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними і електромагнітними координатами асинхронного двигуна.

3.2 Синтез системи непрямого векторного керування швидкістю

Синтез алгоритмів векторного керування по вимірюваному виходу виконується у два етапи: першим ділом синтезується підсистема керування потокозчепленням, а вже потім підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються із використанням зворотної покрокової процедури проектування.

Записуємо похибки потокозчеплень:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_q &= \psi_q - \psi_q^*, \\ \tilde{\psi}_d &= \psi_d - \psi_d^*, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Згідно з О2 задаємо, що $\tilde{\psi}_q = \psi_q$. Отже можна вважати, що $\psi_d^* = \psi^*$. Тоді записуємо похідні для потокозчеплень:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_q &= \dot{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{\psi}}_d &= \dot{\psi}_d - \dot{\psi}^*,\end{aligned}\tag{3.6}$$

Наступним кроком підставимо рівняння для потокозчеплень із (3.1) у похибках відпрацювання:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d - \alpha\psi^* + p_n\omega_2\tilde{\psi}_q + \alpha L_m\dot{i}_{1d} - \dot{\psi}^*, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - p_n\omega_2\tilde{\psi}_d - p_n\omega_2\psi^* + \alpha L_m\dot{i}_{1q},\end{aligned}\tag{3.7}$$

Враховуючи, що треба компенсувати всі складові першого рівняння з (3.7), які не містять похибки, записуємо рівняння для струму $i_{1d} = i_{1d}^*$:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m}(\alpha\psi^* + \dot{\psi}^*),\tag{3.8}$$

З рівняння (3.8) можна легко знайти похідну:

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m}(\alpha\dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*),\tag{3.9}$$

З другого рівняння (3.7) можна отримати рівняння, яку забезпечує полеорієнтування системи $(d - q)$:

$$\omega_o = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*},\tag{3.10}$$

$$\dot{\varepsilon}_o = \omega_o,$$

Після цього отримуємо наступні рівняння для похибок потокозчеплень:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d + p_n\omega_2\tilde{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - p_n\omega_2\tilde{\psi}_d,\end{aligned}\tag{3.11}$$

При записі функції Ляпунова для (3.11) отримуємо:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2), \\ \dot{V} &= -\alpha(\tilde{\psi}_d + \tilde{\psi}_q), \end{aligned} \quad (3.12)$$

З (3.12) слідує, що система (3.11) асимптотично прямує до нуля при додатних коефіцієнтах. Тому ми отримуємо виконання умови $\lim_{t \rightarrow \infty}(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q) = 0$.

Оскільки $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_q = 0$, то можна сказати, що полеорієнтування присутнє.

Для забезпечення відпрацювання швидкості запишемо перше рівняння (3.1) у вигляді похибок:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega} &= \omega - \omega^*, \quad \dot{\tilde{\omega}} = \dot{\omega} - \dot{\omega}^*, \\ \dot{\tilde{\omega}} &= \mu(\psi_d i_{1q} - \psi_q i_{1d}) + \tilde{M}_c - v(\tilde{\omega} + \omega^*) - \dot{\omega}^*, \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\text{де } \tilde{M}_c = \frac{1}{J} M_c - \hat{M}_c, \quad \mu = \frac{1}{J} \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n.$$

Враховуючи, що ψ_q при векторному керуванні має бути рівне нулю, а $\psi_d = \psi_d^*$, нижнє рівняння перепишеться як:

$$\dot{\tilde{\omega}} = \mu \psi_d^* i_{1q} + \tilde{M}_c - v(\tilde{\omega} + \omega^*) - \dot{\omega}^*, \quad (3.14)$$

Регулювання в цьому рівнянні здійснює момент, а саме струм i_{1q} . Тоді рівняння керуючої дії запишеться так:

$$\begin{aligned} i_{1q} &= \frac{1}{\mu \psi_d^*} (\hat{M}_c - k_\omega \tilde{\omega} + \dot{\omega}^* + v \omega^*), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

де $k_\omega, k_{\omega i} > 0$ – пропорційна та інтегральна складові регулятора кутової швидкості.

Після підстановки (3.15) в (3.14) отримаємо рівняння динаміки у похибках:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\hat{M}}_c = k_{\omega i} \tilde{\omega}, \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -k_\omega \tilde{\omega} + \tilde{M}_c + \mu \psi_d^* i_{1q}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

З (3.16), по аналогії із (3.11) отримаємо, буде виконуватись умова $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\omega}, \tilde{M}_c) = 0$ якщо $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_{1q} = 0$.

За умови струмового керування $i_{1q} = i_{1q}^*$ тому ми можемо знайти похідну від i_{1q}^* , де замість $\dot{\tilde{\omega}}$ ставиться рівняння (3.16):

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} (\hat{M}_c - k_\omega \tilde{\omega} + \dot{\omega}^* + v\omega^*), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \\ i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu\dot{\psi}^*} \left(\dot{\hat{M}}_c - k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \tilde{M}_c + \mu\psi^* \tilde{i}_{1q}) + \ddot{\omega}^* + v\dot{\omega}^* \right) - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \end{aligned} \quad (3.17)$$

Оскільки $\tilde{M}_c$ є складовою - не відомою, то як алгоритм регулятора записуємо лише відомі складові.

Тепер виконаємо перевірку відпрацювання асимптотичності струмів. Для початку сформуємо керуючі напруги:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma(-\omega_o i_{1q} + v_d), \\ u_{1q} &= \sigma(\omega_o i_{1d} + v_q), \end{aligned} \quad (3.18)$$

Тепер запишемо струми (3.1) у похибках регулювання, підставивши (3.18) в рівняння для них:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^*, & \dot{\tilde{i}}_{1d} &= \dot{i}_{1d} - \dot{i}_{1d}^*, \\ \tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*, & \dot{\tilde{i}}_{1q} &= \dot{i}_{1q} - \dot{i}_{1q}^*, \\ \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma(\tilde{i}_{1d} + i_{1d}^*) + \alpha\beta(\tilde{\psi}_{2d} + \psi^*) + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} - \dot{i}_{1d}^* + v_d, \\ \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma(\tilde{i}_{1q} + i_{1q}^*) - \alpha\beta\tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega(\tilde{\psi}_{2d} + \psi^*) - \dot{i}_{1q}^* + v_q, \end{aligned} \quad (3.19)$$

Доповнюємо керуючі дії усіма складовими, що можуть бути скомпенсовані:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_o i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_{1d} + x_d \right), \\ \dot{x}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \\ u_{1q} &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1d}^* + \omega_o i_{1d} + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_i \tilde{i}_{1q} + x_q \right), \\ \dot{x}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_{1q}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

де $k_i, k_{ii} > 0$ – пропорційна та інтегральна складові регулятора струму.

Підставляємо всі керуючі дії у рівняння (3.18), отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma \tilde{i}_{1d} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q}, \\ \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma \tilde{i}_{1q} - \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2d}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

Якщо врахувати, що виконується умова $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q) = 0$, тоді отримуємо два диференціальні рівняння першого порядку, що при додатних коефіцієнтах прямують до нуля, і здійснюється виконання умови $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{1d}, \tilde{i}_{1q}) = 0$.

3.3 Алгоритм непрямого векторного керування АД

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить в собі [11], [12]:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) \quad (3.22)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (3.23)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*}, \quad (3.24)$$

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

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \end{aligned} \quad (3.25)$$

- регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + v \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (3.27)$$

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

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{1q}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

Визначення коефіцієнтів регуляторів, налаштування на модульний оптимум $k_{\omega i} = \frac{k_\omega^2}{2}, \xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Визначаємо коефіцієнти струмового контуру, враховуючи, що для нього $\omega_{oi} = 5 \cdot \omega_0 = 530$:

$$k_{ii} = \omega_{oi}^2 = 122500$$

$$k_i = \sqrt{2 \cdot k_{ii}} = 700$$

Визначаємо коефіцієнти контуру швидкості:

$$k_{\omega i} = \omega_0^2 = 11250$$

$$k_\omega = \sqrt{2 \cdot k_{\omega i}} = 150$$

Висновок за розділом 3

В даному розділі було виведено систему непрямого векторного керування швидкістю з моделі АД в синхронних координатах (3.1).

Під час виводу було забезпечено полеорієнтування і асимптотичне регулювання потокозчеплення з рівнянь (3.11) - (3.12). Також було

досягнуто асимптотичності регулювання кутової швидкості з рівняння (3.16) і досягнуто струмового керування із рівняння (3.21). Таким чином розроблений алгоритм забезпечує умови $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$, полеорієнтування, асимтотичну лінеаризацію векторів, і розв'язку керування не тільки електричними але і електромеханічними координатами.

Також було виконано розрахунок пропорційних, а також інтегральних складових регуляторів струму і часу пуску двигуна з номінальним моментом, які в подальшому будуть використані для моделювання і перевірки алгоритму.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНАХ

За допомогою математичного моделювання, виконується дослідження динамічних, а також статичних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який є одним із двох двигунів, які використовуються в системі переміщення мостового крану. Оскільки двигуни однакові, то будемо враховувати те, що їх динамічні процеси будуть однакові.

Основою математичної моделі стануть рівняння непрямого векторного керування по швидкості, а саме: розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення, регулятор струму по осі (d), регулятор струму по осі (q), регулятор кутової швидкості. Траєкторії потокозчеплення, моменту та швидкості, що задаються можна розглянути на рис.4.3 – 4.4.

Система, яка досліджується, зібрана і промодельована за допомогою програми "SIMULINK" програмного пакету "MATLAB".

Регулятори струму та швидкості, які використовуються в алгоритмах налаштовані однаково, їх розрахунки записані в попередньому розділі.

При даному дослідженні було використано номінальні параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, вони записані в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Номінальні параметри АД

Потужність двигуна, кВт	8
Активний опір статора, Ом	0.691
Приведений до статора активний опір ротора, Ом	0.475
Індуктивність намагнічуючого контуру, Гн	0.137
Індуктивність статора, Гн	0.1413
Індуктивність ротора, Гн	0.1434

В даному дослідженні проходить ряд послідовних операцій керування двигуном: за час 0 - 0.25 с досліджувана машина збуджується, магнітний потік досягає номінального значення 0.99 Вб, починаючи з $\Psi^*(0) = 0.2$ Вб, на проміжку часу 0.5 – 18.2 с можна побачити крутний момент, який формує машина, він сягає $M = 42.379(H \cdot m)$. Модель досліджуваної системи зображена на рис. 4.1, а блоки регуляторів струму і швидкості, які використовуються в моделі зображені на рис. 4.2 та 4.3.

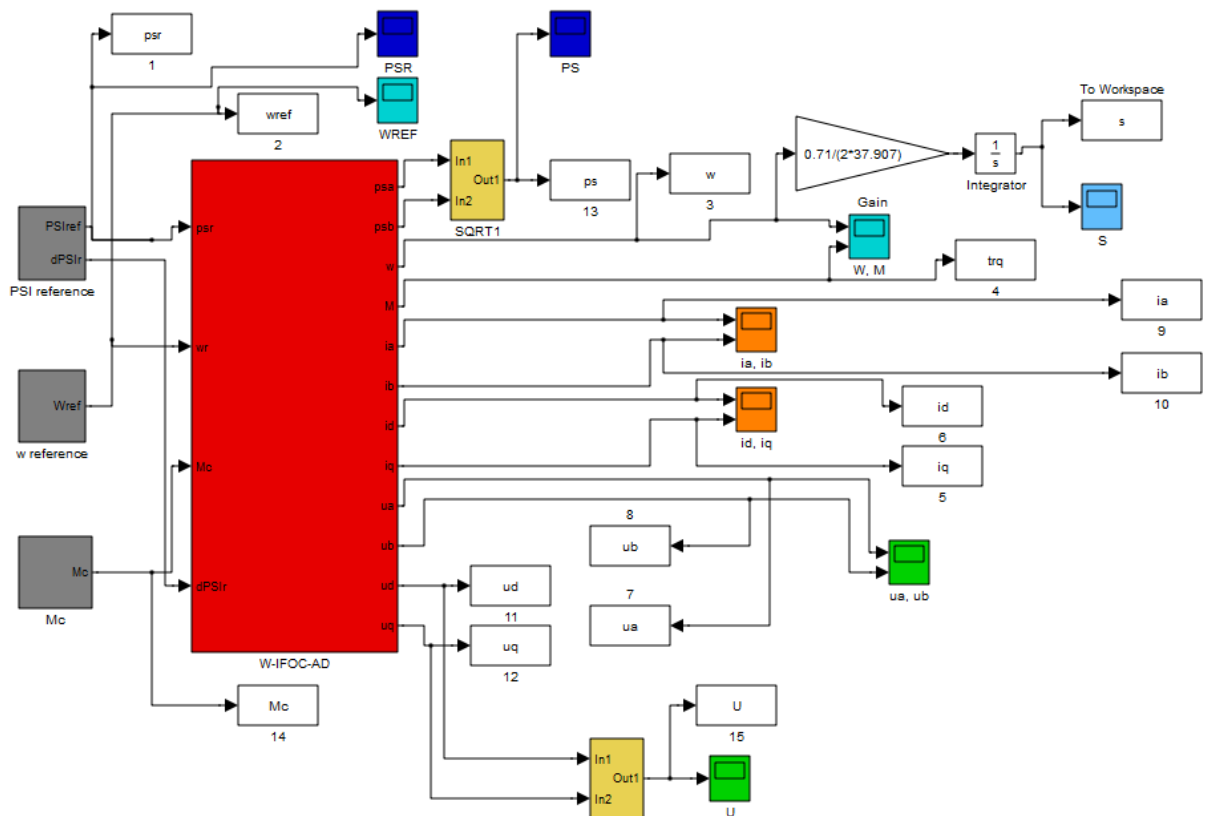


Рисунок 4.1 – Модель векторного керування швидкістю АД

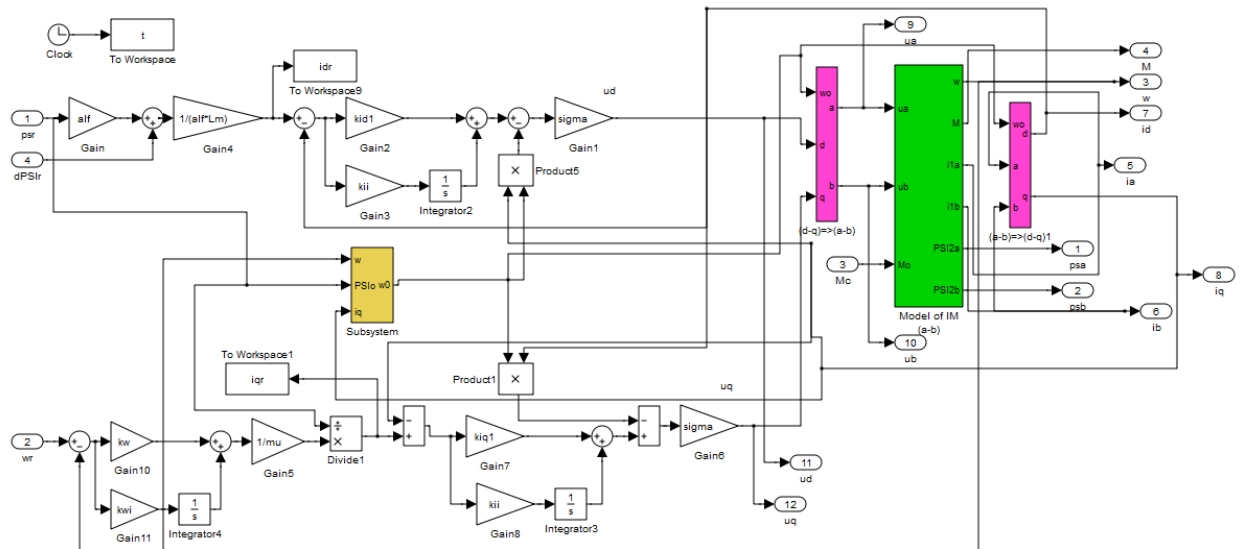


Рисунок 4.2 – Блоки регуляторів системи керування

Промодельовавши систему, отримаємо наступні графіки перехідних процесів двигуна на яких чітко видно відпрацювання двигуна, а саме, компоненти вектора струму та напруги статора знаходяться в допустимому діапазонні значень, момент двигуна відпрацьовується правильно без будь-яких відхилень, шлях пройдений краном збігається із величиною прольоту досліджуваного крану. Це ми можемо побачити, розглянувши отримані графіки на рис. 4.3 – 4.4.

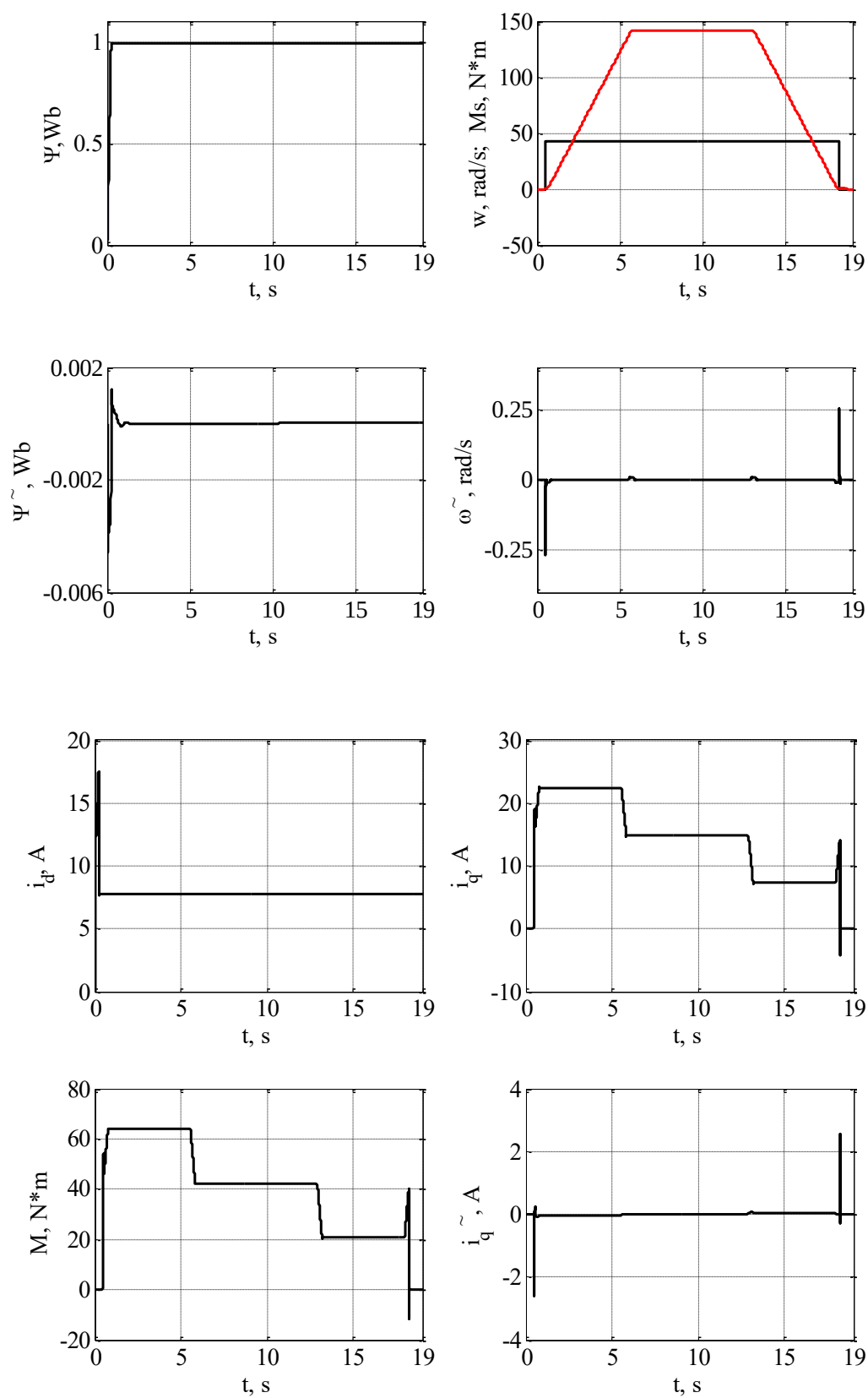


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси, пуск і гальмування двигуна

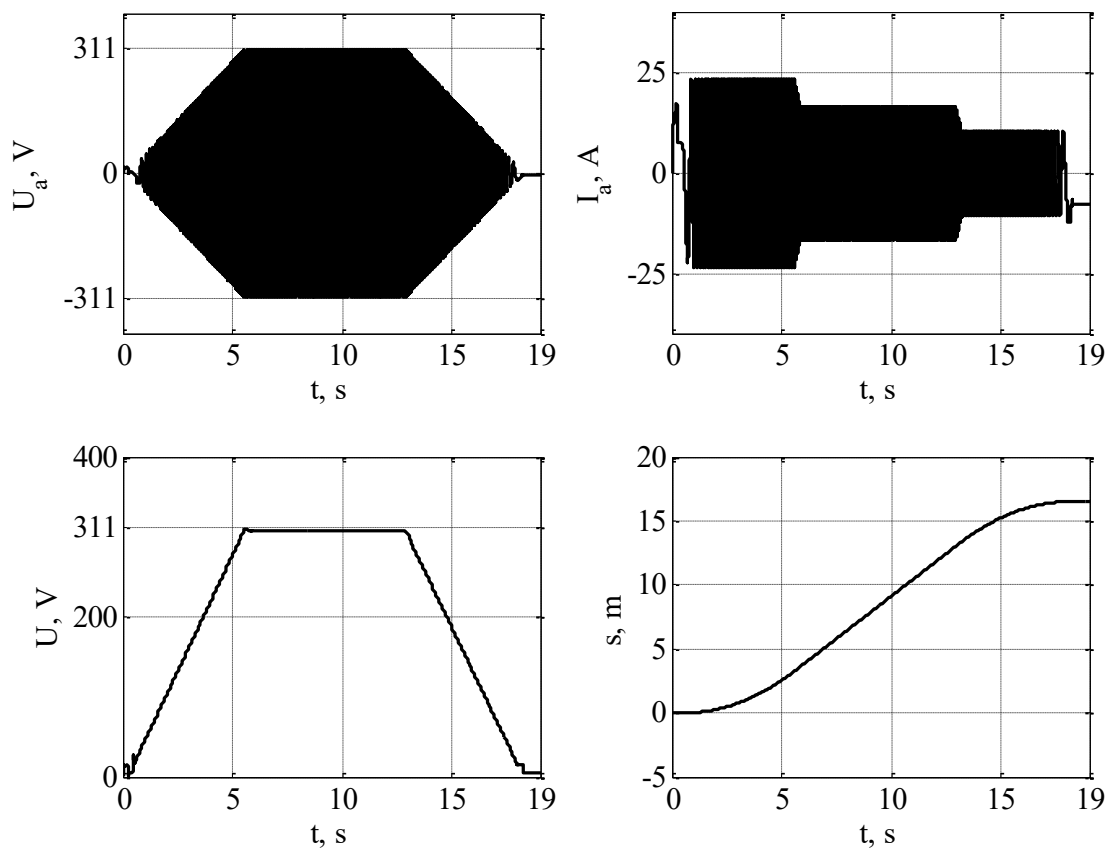


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси, пуск і гальмування двигуна
Дані графіки зображено на плакаті “Перехідні процеси досліджуваної системи”.

Висновок за розділом 4

В даному розділі було промодельовано за допомогою програми "SIMULINK" програмного пакету "MATLAB" систему векторного керування швидкістю асинхронного двигуна. Здійснено вивід графіків перехідних процесів пуску і гальмування двигуна. Отримані дані, які видно на графіках не перевищують максимальні значення, момент відпрацьовується правильно, як і швидкість двигуна.

5. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

5.1 Типові вимоги до перетворювача та функціональна схема асинхронного електроприводу

Ознайомившись з технічними характеристиками основних виробників перетворювачів частоти, до яких відносяться такі, як Siemens, ABB, Mitsubishi, Alien Bradley та інші, можна сформулювати певні вимоги до сучасних асинхронних електроприводів, які ставляться кінцевими споживачами:

1) в стандартній збірці електропривод має забезпечувати такі можливості інтерфейсу, як:

- Шість гальванічно-розв'язаних дискретних входів;
- Два канали аналогових входів, перший канал – 0...10 В, другий – 4...20 мА;
- Один аналоговий вихід – 0...10 В;
- Два виходи релейного типу;
- Інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, які є гальванічно розв'язаними – CAN;
- Присутність вбудованого ПД-регулятора технологічного параметру;
- Для обслуговування зовнішніх підключень дискретних, а також аналогових сигналів – наявність джерела живлення +24 В та +10 В.

2) алгоритм керування, який реалізується перетворювачем:

- Векторне керування бездатчикове, або з датчиком швидкості;
- Частотне керування з лінійною U/f характеристикою або з квадратичною з можливістю компенсації не тільки ковзання, а й IR-компенсації.

3) напруга живлення повинна сягати 380 В і 50 Гц в трьох фазній системі, або 220 В і 50 Гц в однофазній.

4) вихідна частота повинна знаходитись в діапазоні від 0 до 400 Гц.

Функціональна схема електроприводу змінного струму будується на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, зображено на рис 5.1. З даного рисунку можна побачити, що перетворювач частоти, який є основою асинхронного електроприводу, поєднує в собі керуючий та перетворювальний пристрій.

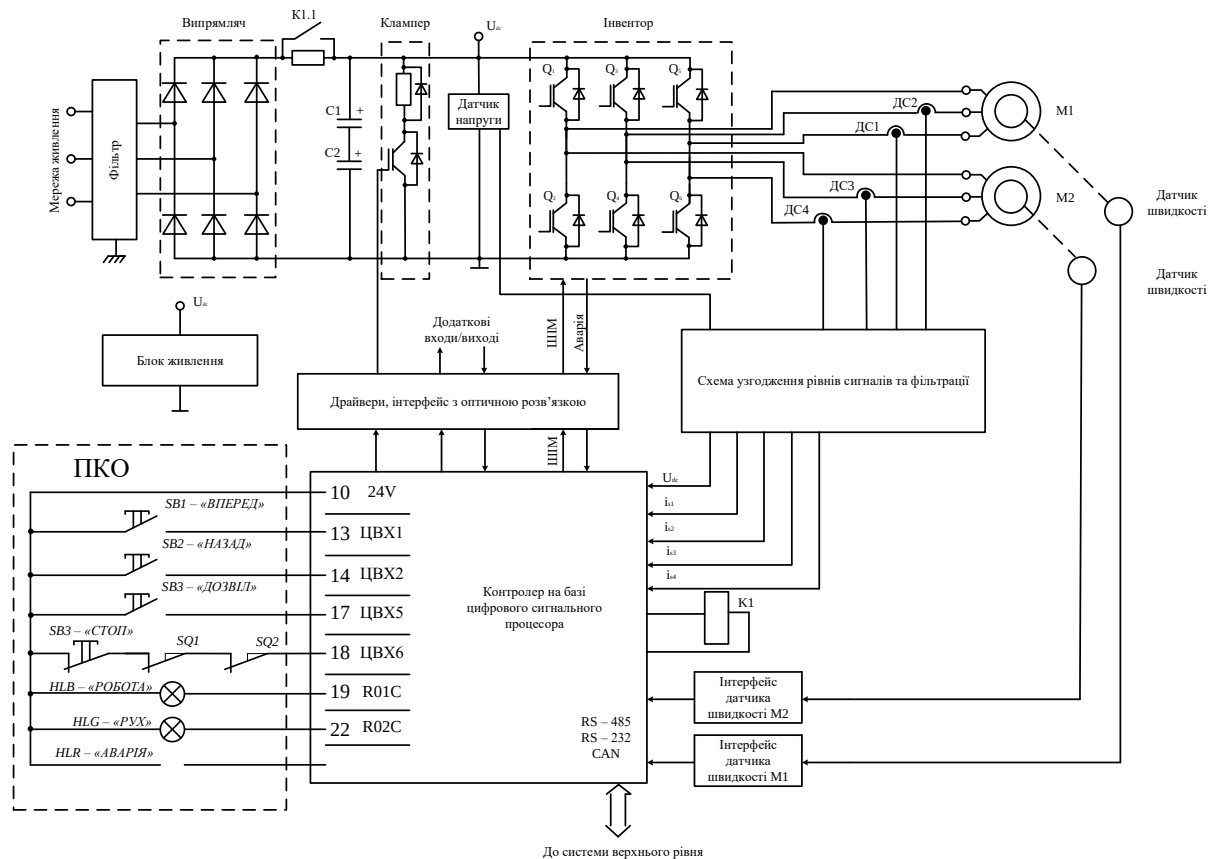


Рисунок 5.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу

Дана схема зображена на плакаті “ Функціональна схема асинхронного електроприводу ” .

Перетворювачі розділяють на дві частини:

силова, яка складається з вхідного фільтру, некерованого випрямляча, зарядного кола, клампера, ємнісного фільтру випрямляча, блоку живлення, датчика напруги ланки постійного струму, датчиків струму на виході, інвертору та схеми з драйверами і гальванічної розв'язки сигналів керування ключами клампера та інвертора;

керуючий контролер, який складається з цифрового контролера, який базується на цифровому сигнальному процесорі, а також схеми узгодження сигналів.

Розглянемо якомога детальніше елементи і основні модулі зображені на рис. 5.1.

Фільтр – складається з двох частин: одною з яких є варистори, які використовуються для запобігання перенапруги в ланці постійного струму внаслідок стрибків напруги мережі живлення, а іншою – фільтр радіоперешкод, який призначений для запобігання розповсюдження в мережу живлення високочастотних перешкод, що виникають за рахунок комутації ключів інвертора.

Випрямляч – пристрій, здатний перетворювати напругу зі змінної напруги мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму. Випрямлячі є різних видів, тому їх класифікують за певними ознаками:

- 1) за схемами випрямлення, бувають: однофазні, трифазні, багатофазні;
- 2) за типом їхнього керування: керовані і некеровані;
- 3) за призначенням.

Керовані випрямлячі не тільки можуть змінювати величину вихідної напруги, а також забезпечують можливість, яка здатна повернути енергію в мережу при роботі електроприводу в генераторному режимі. Але даний тип має недолік – необхідність розробки системи керування, це збільшує вартість даного пристрою.

Тому, в сьогоденні, більшість перетворювачів частоти використовують некеровані випрямлячі.

Параметрами, які характеризують діоди випрямляча, є:

- 1) на відкритому діоді – пряме падіння напруги;
- 2) струм діода є максимально прямим;
- 3) прямий постійний струм діода;
- 4) максимальні зворотна напруга та імпульсний струм діода;
- 5) напруга є пробивною;

За конструкцією своєї будови діоди бувають:

- Дискретні (в одному корпусі наявний тільки один діод);
- діодні збірки (всі діоди випрямляча розміщені в одному корпусі);
- напівмостові;

Під час розробки випрямляча найкращим способом є використання силових діодів, які розміщені окремо. Так як виробництво пропонує силові діоди з різними параметрами у великих кількостях. Також є можливість використання готових збірок, які являють собою трифазну мостову схему, яка знаходиться у одному корпусі, але не завжди є можливість знайти потрібний виріб з параметрами, які необхідні.

Параметри на які звертають увагу при виборі діодних збірок і окремих діодів:

- максимальна зворотна напруга повинна перевищувати максимальну напругу ланки постійного струму;
- струм який проходить через діод повинен перевищувати розрахункове значення струму;

Ємнісний фільтр – фільтр, який призначений для того, щоб згладити випрямлену напругу на виході з випрямляча.

Зарядне коло – складається з зарядного резистора R_z та реле $K1$, призначене для забезпечення плавного заряду ємнісного фільтру випрямляча при подачі живлення на перетворювач. Коли процес зарядки закінчується контакт реле $K1.1$ замикається.

Клампер – пристрій, який при генераторних режимах роботи двигуна за рахунок яких енергія здійснює рекуперацію в ланку постійного струму, стабілізує напругу в даній ланці.

Датчик напруги – передає інформацію про напругу ланки постійного струму в керуючий контролер, де дана інформація використовується для забезпечення захисних функцій, генерування імпульсів за рахунок яких здійснюється керування ключами інвертора за законами широтно-імпульсної

модуляції, а також для контролю величини заряду ємнісного фільтру випрямляча.

Інвертор – пристрій за допомогою якого перетворюється постійна напруга ланки постійного струму в задану трифазну напругу при виході з перетворювача.

Датчики струму – призначенні для передачі інформації про фазні струми двигуна у керуючий контролер, за рахунок цієї інформації здійснюється організація в системах векторного керування – зворотних зв'язків, а також для організації захисних функцій двигуна та інвертора.

Датчик швидкості – призначений для надання інформації про кутову швидкість контролеру для того щоб виміряти її, а також для організації захисних функцій інвертора та двигуна, організації зворотних зв'язків.

Драйвери – підсилюють сигнал, який виходить з контролера, а також перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, для того щоб забезпечити надійне відкриття та закриття IGBT ключів.

Опторозв'язка – для підвищення завадо захищеності керуючого контролера забезпечує гальванічну розв'язку дискретних сигналів керування, а також не дозволяє вийти йому з ладу при аварійних режимах роботи в силовій частині перетворювача.

Керуючий контролер – виконує функції автоматизації перетворювача, розраховує алгоритм керування двигуном, отримує завдання на регульовані координати, здійснення комунікацій із системами верхнього рівня, а також генерує імпульси керування ключами.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – потрібна для приведення рівнів сигналів, що отримуються від датчиків напруги та струмів до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Також фільтрацію використовують для підвищення завадостійкості в системі керування.

Інтерфейс датчика швидкості – дозволяє підключити фото імпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів до контролера, також містить гальванічну розв'язку.

Блок живлення - забезпечує живленням елементи перетворювача: живлення контролера, зовнішні +10 В і + 24 В, драйвера, датчики та ін. В сучасних перетворювач напруга, яка береться на вхід блоку живлення від ланки постійного струму, забезпечує безпечну зупинку системи при зникненні напруги в мережі живлення.

Зовнішні термінали – застосовуються для підключення до перетворювача дискретних та аналогових виходів і входів.

Панель оператора – застосовується для того, щоб налаштувати параметри системи, для подачі команд перетворювача або завдання на регульовану величину в ручному режимі, а також для діагностики та спостереження за контрольними величинами.

Додаткові входи/виходи – застосовуються для керування додатковими системами, прикладом є: включення вентилятора системи охолодження, контролю спрацювання реле.

5.2 Розрахунок силової частини перетворювача

Досліджувана система використовує в собі два однакові двигуни, оскільки вони ідентичні, то занесемо паспортні дані одного з них до табл. 5.1, які потрібні для подальшого розрахунку та вибору елементів схеми.

Таблиця 5.2 – Паспортні дані двигуна

Номінальна потужність	$P_{2n} = 8 \text{ (кВт)}$
Номінальна лінійна напруга	$U_{лн} = 380 \text{ (В)}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$

Момент інерції	$J_D = 0.028(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$
Номінальний ККД	$\eta = 87.5\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi)_H = 0.85$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$s_H = 9.6\%$
Критичне ковзання	$s_K = 42.7\%$
Номінальна частота напруги	$f_H = 50 \text{Гц}$

Амплітудні та фазні напруги та струми були попередньо розраховані в (2.24) - (2.27).

Розрахунок фазної номінальної напруги двигуна:

$$U_n = \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393(\text{В}) \quad (2.24)$$

Номінальний струм статора:

$$I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{8000}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.875 \cdot 0.85} = 16.342(\text{А}) \quad (2.25)$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.268(\text{В}) \quad (2.26)$$

Амплітудне значення струму:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 16.342 = 23.111(\text{А}) \quad (2.27)$$

Для того, щоб розрахувати максимальне значення струму в фазі двигуна потрібно визначити перевантажувальну здатність електроприводу k_{ov1} , яка залежить від типу механізму, наприклад: $k_{ov1} = (1.1 \div 1.3)$ – для

турбомеханізмів, $k_{ov1} = (1.4 \div 2)$ – для екструдерів, підйомно-транспортних механізмів, конвеєрів, $k_{ov1} = (2 \div 3)$ – для приводів подачі. В даному випадку приймемо, що $k_{ov1} = 2$, так як досліджуваний кран можна віднести до підйомно-транспортних механізмів.

Розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача:

Оскільки в даній схемі використовуються два ідентичні двигуни, які будуть використовувати один перетворювач, то приймемо, що:

$$I_{\max} = 2 \cdot k_{ov1} \cdot I_{na} = 2 \cdot 2 \cdot 23.111 = 92.444 \text{ (A)} \quad (5.5)$$

Коли перетворювач живиться від трифазної мережі живлення $U_{\text{grid}} = 380 \text{ (В)}$ напруга в ланці постійного струму за рахунок ідеальної фільтрації буде дорівнювати:

$$U_{\text{dcn}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{grid}} \approx 540 \text{ (В)} \quad (5.6)$$

Коли вибираємо IGBT для автономних інверторів напруги потрібно звернути увагу, що максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути як мінімум у 1.5 разів вищою від максимальної напруги в ланці постійного струму, тобто: $U_{ce} > 1.5 \cdot U_{\text{dcmax}}$. Для перетворювачів з однофазним живленням $U_{\text{grid}} = 220 \text{ (В)}$, для трифазних – $U_{\text{grid}} = 375 \text{ (В)}$ та 380 (В) , а в ланці постійного струму, максимальна напруга, в сучасних перетворювачах, залежить від напруги встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно $U_{\text{grid}} = 750 \text{ (В)}$.

Отже:

$$U_{ce} = 1.5 \cdot U_{\text{dcmax}} = 1.5 \cdot 750 = 11250 \text{ (В)} \quad (5.7)$$

Вибір IGBT здійснюється за певним критерієм: $I_c > I_{\max}$; $U_{ce \max} > U_{ce}$, I_c - тривалий струм колектора, а $U_{ce \max}$ - напруга колектор-емітер, ці дані розміщені в паспортних даних IGBT. Для

побудови силової частини перетворювача використаємо IGBT-модуль, тому що він складається з шести- семи транзисторів, які розміщені в одному корпусі, а також в ньому наявний випрямляч. Дані модулі випускають певні виробники [13], [14], [15], та інші, які мають стандартний ряд максимальних напруг колектор – емітер: 250,600,1200,1700,3300 (В).

Оберемо з каталогу [22] IGBT модуль типу FP100R12KT4 з параметрами $U_{ce} = 1200 (В)$, $I_c = 100 (А)$.

Після вибору IGBT модуля, здійснимо вибір ємнісного фільтру ланки постійного струму випрямляча. Для цього потрібно здійснити розрахунок за наступною формулою:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p \cdot m \cdot f \cdot R_0} \quad (5.8)$$

Для розрахунку ємності обираємо коефіцієнт пульсації випрямленої напруги, значення якого для даного перетворювача частоти знаходиться в діапазоні від 0.02 до 0.05, отже $k_p = 0.04$, також потрібно знайти еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму R_0 , для цього необхідно розрахувати значення струму ланки постійного струму з урахуванням перевантажень:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} \cdot P_n}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{2 \cdot 16000}{540 \cdot 0.875 \cdot 0.96} = 70.546 (А) \quad (5.9)$$

$\eta_{inv} = (0.95 \div 0.07)$ - коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Оскільки струм ланки постійного струму був обчислений, то можна розрахувати еквівалентний опір навантаження:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{70.546} = 7.654 (Ом) \quad (5.10)$$

Здійснимо розрахунок ємності:

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 7.654} = 3467.373 (\text{мкФ}) \quad (5.11)$$

За допомогою каталогу [16] вибираємо конденсатор типу В437*1В4828М00 ємність якого дорівнює 8200 (мкФ), а максимальна напруга – 350 (В). Ємність яка нам потрібна, а також робоча напруга досягається за рахунок послідовного включення двох конденсаторів, сумарна ємність дорівнюватиме:

$$C_{12} = \frac{C_1}{2} = \frac{8200}{2} = 4100 (\text{мкФ}) \quad (5.12)$$

Для того щоб обрати датчик струму необхідно звернути увагу на те, що його діапазон вимірювання повинен бути вищим від максимально допустимого струму в системі. Оскільки для керування координатами двигунів використовуються методи, що не потребують організації зворотних зв'язків за струмом, а струм вимірюється лише для того, щоб захистити систему, то можна на виході з інвертора не встановлювати датчики, обмежитись тільки датчиками струму в ланці постійного струму для того щоб зробити перетворювач дешевшим.

Отже з каталогу [17] виберемо датчик типу НО 80-NPW-0000, номінальний струм якого дорівнює 80А, діапазон вимірювання – 150А.

Канал за допомогою якого вимірюється напруга ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25 NP, який також був обраний з каталогу [19], його схема підключення зображена на рис. 5.2.

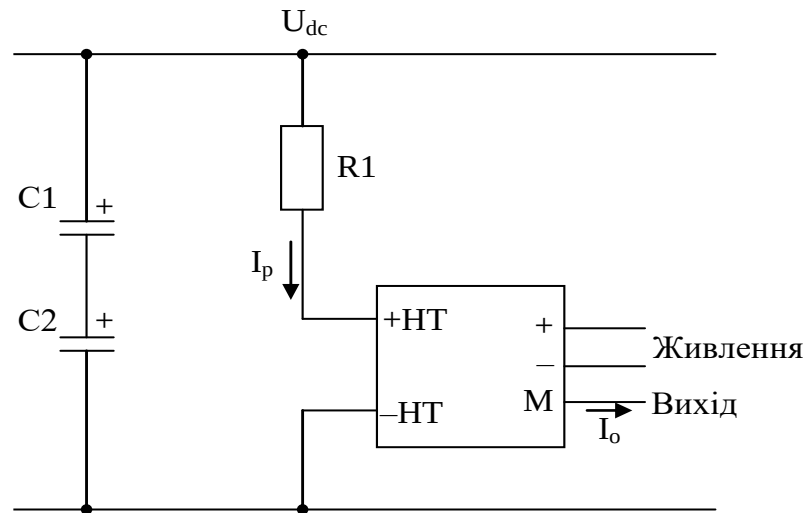


Рисунок 5.2 – Канал з підключенням датчика напруги

В паспортних даних датчика вказано, що максимальний струм первинного кола: $I_{p\max} = 14(\text{мА})$. Тому значення опору резистора R1 дорівнюватиме:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.014} = 53571(\text{Ом}) \quad (5.13)$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R1 = 56 \text{ кОм}$.

Обираємо оптичний енкодер **HEDS 5500** [20], з двома каналами сигналів з робочою зоною частоти в 100 Гц, розподільча здатність 1024 імпульсів на оберт.

Нехай, датчик має розподільчу здатність, яка вказана в його паспорті, N, (імп/об).

Тоді ціна одного імпульсу результуючої послідовності буде рівною:

$$\theta_{1i} = \frac{2\pi}{4N} = 0.0015(\text{рад}) \quad (5.14)$$

Виміряна кутова швидкість розраховується як

$$\omega = \frac{n\theta_{1i}}{T_{s\omega}} \quad (5.15)$$

де n – кількість імпульсів результуючої послідовності АВ, які надійшли від датчика за час $T_{s\omega}$.

Оскільки дана система використовує два двигуни то на кожний двигун буде виділено два датчики струму та один датчик швидкості.

Для даної системи керування обрали перетворювач частоти серії АВВ ACS 550-01-038А-4 [21]. Характеристиками якого є: допустима потужність двигуна з яким співпрацює перетворювач - 18.5 кВт, напруга живлення - 380 В, максимальна частота на виході – 500 Гц.

Висновок за розділом 5

В даному розділі були розраховані параметри основних елементів електроприводу, таких як еквівалентний опір навантаження, ємність, IGBT модуль який складається з випрямляча, клампера та інвертора, давачі струму, напруги та швидкості. Побудовано функціональну схему електроприводу.

Давачі струму слугують для захисту та забезпечення зворотного зв'язку, який необхідний для алгоритму прямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Давач швидкості забезпечує зворотній зв'язок за швидкістю, яка входить в алгоритм прямого векторного керування швидкістю. Давач напруги слугує для захисту, контролю заряду конденсатора та для формування сигналів ШІМ.

ВИСНОВОК

В даній роботі виконано дослідження системи переміщення грейферного крану. Було проведено аналіз крану даного типу, ознайомились з будовою грейферного крану, яка зображена на рисунку в додатку 1, здійснили огляд механізму переміщення як самого крану так і його візка, оглянули його електрообладнання і кабіну керування.

Для приводу системи переміщення здійснили розрахунки після яких було обрано два приводні двигуни серії 4A132S1Y3 потужністю 8 кВт кожен. Здійснено перевірки по нагріву, за перевантажувальною здатністю та умовами пуску, перевірки виконуються, двигун обрано і працює правильно.

Для керування швидкістю двигуна системи переміщення мостового крану було обрано непрямий векторний закон керування швидкістю. Було здійснено дослідження та моделювання за допомогою програми "SIMULINK" програмного пакету "MATLAB". Побудувавши модель непрямого векторного керування були досліджені перехідні процеси пуску та гальмування двигуна, виведено і побудовано графіки. На графіках видно, що двигун який є складовою системи переміщення працює правильно.

Обрали для керування системи перетворювач частоти, а також його елементи. Побудовано схеми керування.

Виходячи з проведеної роботи можна зробити певний висновок, спроектований електропривід відповідає поставленому перед ним завданню і знаходить застосування в реальних системах переміщення мостового крану.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. А.А. Богорад, А.Т. Загузін "Вантажопідіймальні крани машинобудівних підприємств", *Вища школа*, 1999р.
2. Н.С. Ушаков "Мостові електричні крани", *Ленінградське відділення*, 1988р.
3. І.Я. Оберман "Стропування вантажів", *Довідник "Металургія"*, 1988р
4. Підйомно-транспортні машини. Навчально-методичний посібник. Навчально-методичний комплекс / І. М. Бендера, О. Я. Стрельчук, В. В. Підлісний, Г. О. Іванов. – *Камянець-Подільський, ФОП Сисин О.В., Абетка*, 2014. – 368 с.
5. Андреев В.П. Основы электропривода, Ю.А. Собинин. – [2-е изд., перераб], - М-Л, : *Госэнергоиздат*, 1963. – 722 с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М. *Энергоатомиздат*, 2001. – 704 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник/А 90 Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. – М. : *Энергоиздат*, 1982, - 504 с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Издание 6-е, исправленное. *Москва, Энергия*, 1977 г.
9. Кравчик А. Э. Соболенская. М А. Шлаф, В. И Асинхронные двигатели серии 4А: *Київ*, 1982. 34 — 90 с.
10. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости, *Техн. електродинаміка. Київ* 1999. 32с.
11. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости, *Техн. електродинаміка*. –1999. –№ 4. – С. 26–31.

12. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблем, *Техн. електродинаміка. Київ*, 1999. 27 – 32с.
13. Виробник елементів URL: www.ixyspower.com (дата звернення 05.06.2019).
14. Виробник елементів URL: www.semikron.com (дата звернення 05.06.2019).
15. Виробник елементів URL: www.lem.com (дата звернення 05.06.2019).
16. Каталог IGBT URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules/igbt-modules-up-to-1200v/fp100r12kt4/> (дата звернення 05.06.2019).
17. Каталог конденсаторів URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/30/db/aec/B43701_B43721.pdf (дата звернення 05.06.2019).
18. Датчик струму URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ho-npw_series.pdf (дата звернення 05.06.2019).
19. Енкодери та їх підбір по параметрам двигуна URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/AV02-1046EN.pdf> (дата звернення 05.06.2019).
20. Датчик напруги URL: <https://in.element14.com/lem/lv-25-p/voltage-transducer-pcb/dp/1617416> (дата звернення 05.06.2019).
21. Перетворювач частоти URL: <https://ewi-engineering.com.ua/abb-ac550-01-038a-4-185-kvt-380-v.html> (дата звернення 05.06.2019)