

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

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

«___» _____ 2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
по спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(код та назва спеціальності)

на тему: «Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи
компенсації коливань вантажу у підйомних кранах»

Виконав: студент ІІ курсу, групи ЕП-з11мп
(шифр групи)

_____ Гусаковський Максим Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ доц. к.т.н. Волянський Р.С. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ Дубчак Є.М., ст.викл. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 р

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
	A4	141.8107.001.МД	Завдання на дипломний проект	1	
	A4	141.8107.001.МД	Пояснювальна записка	105	
	A3	141.8107.001.МД	Схема електрична принципова	1	
	A4	141.8107.001.МД	Графіки перехідних процесів без системи компенсації	1	
			коливань		
	A4	141.8107.001.МД	Графіки перехідних процесів з використанням системи компенсації коливань	1	
	A4	141.8107.001.МД	Функціональна схема електроприводу механізму пересування візка	1	
	A4	141.8107.001.МД	Функціональна схема електроприводу механізму підйому	1	
	A4	141.8107.001.МД	Структурна схема математичної моделі підйомно-кранової електромеханічної системи	1	

					141.8107.001.МД			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Гусаковський М.В			Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Волянський Р.С					2	105
Реценз.		Дубчак Є.М.				КПІ імені Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-з11мп		
Н. Контр.								
Затверд.		Ковбаса С.М						

Пояснювальна записка
до магістерської дисертації

На тему: «Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи
компенсації коливань вантажу у підйомних кранах»

Київ – 2022 р.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

С. М. Ковбаса

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Гусаковському Максиму Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах,
керівник проекту Волянський Р.С,

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2022 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Об'єкт дослідження Мостовий опорний кран _____

4. Предмет дослідження слугуватиме автоматизована система керування компенсації коливання вантажу _____

5. Вихідні дані Механізм підйому: кількість двигунів 1, потужність двигуна $P_{дв.м.п} = 20$ кВт, струм двигуна $I_{дв.м.п} = 42$ А напруга живлення 380 В, 50 Гц. Механізм пересування візка: маса візка $m = 4.5$ т, маса вантажу $m_v = 15$ т, діаметр колеса $D = 0.2$ м, діаметр ступиці $d_c = 50$ мм, коефіцієнт тертя ковзання $\mu = 0.02$, коефіцієнт тертя кочення $f = 0.5$, обертова жорсткість $c_o = 3$ МНм/рад, довжина переміщення візка $L = 4$ м, швидкість пересування з вантажем $V_p = 0.5$ м/с, швидкість пересування без вантажа $V_v = 0.5$ м/с, максимальне прискорення $a = 0.5$ м/с², кількість циклів за годину $z = 40$, сумарний час роботи, не більше $t_p = 30$ с.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналітичний огляд задач та методів підвищення надійності, безпечності та ефективності роботи кранового господарства. 2. Розрахунок, перевірка та вибір силової частини електромеханічної системи. 3. Розробка автоматизованої системи керування. 4. Перевірка запропонованих технічних рішень на математичних моделях. 5. Розробка стартап-проекту.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 1. Схема електрична принципова системи автоматизації компенсації коливань вантажу; 2. Графіки перехідних процесів керування механізмом візка без використання системи компенсації коливань; 3. Графіки перехідних процесів керування механізмом візка з використанням системи компенсації коливань; 4. Функціональна схема електроприводу механізму пересування візка; 5. Функціональна схема електроприводу механізму підйому; 6. Структурна схема математичної моделі підйомно-кранової електромеханічної системи
7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

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

7. Дата видачі завдання 06.09.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд задач та методів підвищення надійності, безпечності та ефективності	20.09.2022	
2	Розрахунок, перевірка та вибір силової частини електромеханічної системи	01.10.2022	
3	Розробка автоматизованої системи керування	15.10.2022	
4	Перевірка запропонованих технічних рішень на математичних моделях	12.11.2022	
5	Розробка стартап-проекту	03.12.2022	
6	Висновок	06.12.2022	
7	Список літератури	07.12.2022	

Студент

_____ (підпис)

Гусаковський М.В

Керівник проекту

_____ (підпис)

Волянський Р.С.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 105 сторінках та містить 53 рисунки та 20 таблиць, 1 лист графічної частини та 1 додаток.

Метою розробки є підвищення продуктивності роботи одного з цехів підприємства за рахунок впровадження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах.

В даній роботі виконано аналітичний огляд задач та методів підвищення надійності, безпечності та ефективності роботи кранового господарства, зроблено розрахунок, перевірка та вибір силової частини електромеханічної системи, розроблено автоматизовану систему керування, перевірено запропоновані технічні рішення на математичних моделях, по роботі в цілому зроблені висновки, наведено список використаної літератури.

Дану задачу вдалося реалізувати за допомогою обчислювальної техніки та програмного забезпечення (MATLAB, Simulink, AutoCAD Electrical).

ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНО – РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД, КОМПЕНСАЦІЯ КОЛИВАНЬ, МОСТОВИЙ КРАН, ПІДЙОМНИЙ МЕХАНІЗМ.

					141.8107.001.МД			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Гусаковський М.В			Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Волянський Р.С					6	105
Реценз.		Дубчак Є.М				КПІ імені Ігоря Сікорського		
Н. Контр.						Каф. АЕМС-ЕП		
Затверд.		Ковбаса С.М				Гр. ЕП-311мп		

ABSTRACT

The master's thesis consists of 105 pages and contains 53 figures and 20 tables, 1 sheet of graphic part and 1 appendix.

The purpose of the development is to increase the productivity of one of the company's workshops due to the introduction of an automated electromechanical system for compensation of load fluctuations in lifting cranes.

In this work, an analytical review of the tasks and methods of increasing the reliability, safety and efficiency of the operation of the crane industry was carried out, the calculation, verification and selection of the power part of the electromechanical system were made, an automated control system was developed, the proposed technical solutions were checked on mathematical models, conclusions were drawn on the work as a whole, a list of used literature is given.

This task was implemented with the help of computing equipment and software (MATLAB, Simulink, AutoCAD Electrical).

ELECTRIC DRIVE, ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY REGULATED DRIVE, COMPENSATION OF OSCILLATIONS, BRIDGE CRANE, LIFTING MECHANISM.

					141.8107.001.МД			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Гусаковський М.В			Розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Волянський Р.С					7	105
Реценз.		Дубчак Є.М				КПІ імені Ігоря Сікорського		
Н. Контр.						Каф. АЕМС-ЕП		
Затверд.		Ковбаса С.М				Гр. ЕП-311мп		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Причини та наслідки коливань вантажу при роботі підйомних машин.....	14
1.2 Алгоритми та методи компенсації коливань.....	15
1.3 Вибір та обґрунтування системи електроприводу підйомного крану	18
1.4 Висновок за розділом.....	21
2 РОЗРАХУНОК, ПЕРЕВІРКА ТА ВИБІР СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	23
2.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна пересування візка.....	23
2.2 Перевірка обраного двигуна за нагрівом та перевантажувальною здатністю	31
2.3 Розрахунок та вибір комплектного силового перетворювача	35
2.3.1 Електропривод механізмів горизонтального переміщення	35
2.3.2 Електропривод механізму підйому	38
2.4 Висновок за розділом.....	44
3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	45
3.1 Вибір обладнання для створення автоматизованої системи.....	45
3.2 Розробка схемотехнічних рішень, алгоритмів автоматизації та людино- машинного інтерфейсу для системи компенсацій коливань вантажу	50
3.3 Висновок за розділом.....	66
4 ПЕРЕВІРКА ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ НА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ.....	67
4.1 Розробка математичної моделі візка мостового крану.....	67
4.1.1 Моделювання механічної частини	67
4.1.2 Складання рівнянь Лагранжа	71
4.1.3 Трансформація рівнянь Лагранжа до нормальної форми	73
4.1.3 Математична модель АД у ортогональних координатах.....	80
4.1.4 Математична модель підйомно-кранової електромеханічної системи ...	84
4.2 Розробка структурної схеми математичної моделі	85
4.3 Дослідження підйомно-кранової електромеханічної системи.....	85
4.4 Висновок за розділом.....	89
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	90
5.1 Опис ідеї проекту.....	92
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	93

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	93
5.4 Розробка маркетингової програми стартап-проекту	96
5.5 Висновок за розділом.....	97
ВИСНОВКИ.....	98
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	99
ДОДАТОК А – Перелік елементів схеми електричної принципової	104

ВСТУП

Мостові крани використовуються в різних галузях народного господарства для внутрішньоскладських і внутрішньоцехових вантажно-розвантажувальних робіт.

На сучасному ринку через жорстку конкуренцію виробники повинні постійно шукати інновації для підвищення продуктивності. Одним з потенційних напрямків інновацій є вдосконалення технічних характеристик крана.

Як правило, крани використовуються в процесах виробництва або обслуговування, де продуктивність і безпека вважаються найважливішими вимогами. В той же час розгойдування вантажу під час руху крана вважається найбільш серйозною проблемою, що впливає на здатність працювати кран ефективно.

Одним із можливих шляхів вирішення проблеми коливання вантажу під час руху крана є розробка автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах.

Передбачається, що за допомогою впровадження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу на один із кранів виробництва знизиться ризик аварій і підвищиться швидкість а також надійність роботи крана. Також дане рішення дасть можливість безпечно керувати краном персоналу з базовою підготовкою. Це загалом дозволить підвищити продуктивність підприємства та безпеку його персоналу.

Метою розробки є підвищення продуктивності роботи одного з цехів підприємства за рахунок впровадження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах.

Для досягнення мети в магістерській дисертації вирішено наступні задачі:

1. Проведено аналітичний огляд задач та методів підвищення надійності, безпечності та ефективності роботи кранового господарства;
2. Виконано розрахунок, перевірка та вибір силової частини електромеханічної системи;

3. Здійснено розробку автоматизованої системи керування;

4. Перевірено запропоновані технічні рішення на математичних моделях, та впроваджено їх на практиці.

Об'єктом дослідження є процеси компенсації коливань вантажу при поступальному русі мостового крану.

Предмет дослідження є система керування швидкістю електропривода візка мостового крану.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувались: класичні методи теорії автоматичного керування, теорія керування електроприводами змінного струму, методи математичного моделювання.

Практична цінність. При виконанні магістерської роботи отримано наступні практичні результати:

1. Запропоновано алгоритм компенсації коливань вантажу, який базується на формуванні лінійного прискорення крана в залежності від висоти, на якій знаходиться пересуваємий вантаж.
2. Розроблено математичну модель мостового крану, яка враховує коливання вантажу та дозволяє досліджувати роботу асинхронних електроприводів підйому вантажу та пересування візка.
3. На математичних моделях підтверджена працездатність запропонованого алгоритму компенсації коливань
4. На основі розроблених моделей побудована система керування швидкістю візка мостового крану, яка зменшує коливання вантажу.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Крани мостового типу широко застосовуються в різних галузях народного господарства для внутрішньоскладських і внутрішньоцехових вантажно-розвантажувальних робіт.

Вони є частиною повсякденної роботи для переміщення важких предметів між виробничими лініями їх застосовують на металургійних заводах, в автомобільній промисловості для завантаження та розвантаження суден.

Найбільш розповсюдженими кранами мостового типу козлові, мостові, кабельні та мостово-кабельні і мостові перевантажувачі.

Мостові крани в залежності від призначення можна розділити на наступні групи: спеціального призначення (з висувною поворотною та неповоротною стрілою, з поворотним візком та ін.), загального призначення, металургійні (ливарні, мульдозавальні, штирові, для розвантаження злитків, магнітні, кувальні, колодцеві, грейфери та ін.) [1].

Мостові крани загального призначення, в основному комплектовані, вантажним гаком та застосовуються для виконання масових вантажно-розвантажувальних робіт.

Мостові крани спеціального призначення, комплектуються вантажозахоплюючими пристроями та призначені для робіт з певними вантажами. Цей тип кранів має два основні вузли: міст, який пересувається вздовж цеху, та крановий візок або таль, що пересувається по мосту [1].

В залежності від конструкції моста, мостові крани діляться на двобалкові та однобалкові. Однобалковий міст складається з двох кінцевих балок з'єднаних між собою головною балкою. Двобалочний міст має дві кінцеві балки які з'єднані між собою двома головними балками.

Мостові крани виробляють з ручним або електричним типом привода.

В більшості випадків управління кранами здійснюється з кабіни, та в деяких випадках може здійснюватися з підлоги використовуючи при цьому виносний пульт. При використанні виносного пульта, швидкості пересування візка і моста значно знижені для забезпечення безпеки роботи з краном [1].

На рисунку 1.1 показано підвісний двоопорний однобалочний кран [2]. Однобалочні підвісні крани широко застосовують для транспортування вантажу з одного прольоту в інший, при цьому не застосовуючи наземний транспорт. В такому випадку головні балки двох кранів, знаходячись в сусідніх прольотах, з'єднуються між собою перехідними містками, які кріпляться на головних балках стиковими замками. Мостові двобалкові багатоопорні підвісні крани призначені для переміщення великогабаритних виробів.



Рисунок 1.1 – Підвісний однобалковий двоопорний кран

На рисунку 1.2 представлений однобалочний мостовий кран опорного типу, у якого необхідна жорсткість у горизонтальній площині забезпечена установкою з одного боку підкосів в площині верхнього стиснутого поясу двотавра, а з іншого - решітчастого зв'язку по всій довжині двотавра [1], [3].

У двобалкового мостового крану міст складається з двох окремих головних балок, ці балки з'єднані з кінцевими балками, та утворюють з ними горизонтальну раму. Ходові колеса крану встановлені у кінцевих балках мосту [1].



Рисунок 1.2 – Однобалковий мостовий кран опорного типу

1.1 Причини та наслідки коливань вантажу при роботі підйомних машин

В більшості випадків продуктивність виробництва залежить від швидкості переміщення вантажу. Тому власники підприємств вкладають зусилля та кошти, щоб покращити швидкість роботи та безпеку їх кранів.

Під час вдосконалення роботи кранів, можуть виникати безліч проблем. Найбільш складною і класичною проблемою в русі крана є коливання вантажу, яке виникає під час руху крана. Великі коливання в разі аварій створюють небезпеку персоналу та можуть завдати серйозної матеріальної шкоди. Кран який не обладнаний системою компенсації коливань має керуватися кваліфікованим персоналом із певним рівнем знань та досвідом, для забезпечення відповідної роботи крана. Впровадження системи компенсації коливань вантажу може значно знизити ризик аварій, підвищити продуктивність, а також надійність роботи крана. Тоді персонал з базовою підготовкою може безпечно керувати краном за допомогою автоматизованої системи анти-розгойдування [4].

Розгойдування вантажу на кранах — це ефект маятника, коли вантаж рухається незалежно від крана. Це не завжди має значення, коли вантаж знаходиться в повітрі (хоча велике коливання може вплинути на радіус навантаження, а отже, на стійкість деяких кранів). Однак це стає надзвичайно важливим, коли кранівник намагається точно поставити вантаж [4].

Отже, як відбувається коливання? Вантаж на кінці довгого підйомного троса діє скоріше як маятник. У випадку з маятником, як тільки валик або вагу буде зміщено від вертикалі, він повернеться назад у точку на такій самій відстані з іншого боку від вертикалі. У середовищі без тертя маятник продовжував би коливатися назад і вперед вічно, але в реальному світі тертя повітря та внутрішнє тертя мотузки гальмують рух, який поступово згасає. Після цього гиря зупиниться вертикально під точкою підвісу [4].

Період часу, потрібний вантажу для коливання за один цикл із початкового положення й назад, називається «періодом маятника». Це залежить від довжини

маятника і не залежить від маси вантажу. У випадку крана, як правило, рухається точка опори або точка підвіски вантажу, а не вантаж [4].

Якщо уявити собі мостовий кран, який здійснює переміщення вантажу по довжині цеху, коли підйомний пристрій рухається і прискорює вантаж на підйомному тросі, вантаж буде відставати від точки підвіски або точки опори і почне коливатися як маятник. Потім вантаж рухатиметься вниз серією різких рухів, спочатку відстаючи від точки опори, яка рухається з постійною швидкістю, а потім обганяючи її [4].

Коли вантаж сповільнюється, а точка опори зупиняється над бажаною точкою приземлення, вантаж продовжуватиме рухатися вперед до кінця свого гойдання та продовжуватиме коливатись назад і вперед, доки тертя не змусить його зупинитися [4].

1.2 Алгоритми та методи компенсації коливань

Існує ряд систем, які різною мірою долають проблему коливання вантажу на кранах.

Найдовше існують механічні рішення, які використовують спеціальну техніку підйому та/або схему утримання вантажних блоків. Вони спрямовані на те, щоб запобігти виникненню коливання, а не контролювати його, коли воно вже виникло. Ефективні механічні рішення є дорогими як для покупки, так і для обслуговування.

Контейнерні або гумові козлові крани зазвичай використовують гідравлічні системи амортизації коливання (наприклад, вироблені Rima Group в Італії). У цих системах гідравлічні контури використовуються для розсіювання енергії коливання вантажу шляхом дії на похилі допоміжні троси, що обертаються на розширювачах для підйому контейнерів. Керування зусиллями на цих канатах зазвичай досягається за допомогою гідравлічних циліндрів або лебідок [5], [6].

Ці гідравлічні системи амортизації коливань є пасивними системами, які гасять існуюче коливання, але не перешкоджають його запуску. Вони мають додатковий недолік у тому, що коли пересування зупиняється, кранівнику

доводиться чекати короткий час, перш ніж коливання припиняться, і він зможе опустити вантаж.

Як і у випадку з механічними системами, гідравлічні системи мають значні вимоги до обслуговування, а отже, і витрати.

З появою частотно-регульованих приводів і ПЛК останнім часом стало простіше використовувати мікропроцесори, щоб подолати проблему коливання навантаження, і на ринку є багато таких систем [7], [8].

Усі «електронні» системи проти розгойдування працюють, контролюючи прискорення та уповільнення приводів руху крана без додаткових канатів чи механізмів механічних та гідравлічних систем.

Набір математичних правил або алгоритмів змінює швидкість руху крана таким чином, щоб будь-яке коливання не почалося або швидко гасилося. Ці алгоритми використовуються або в системі з замкнутим циклом, або в системі з відкритим контуром [9].

У замкнутому контурі або системі зворотного зв'язку інформація про положення та швидкість вантажу вимірюється та порівнюється з бажаними значеннями, а також вноситься коригування [9].

Системи з відкритим контуром, з іншого боку, покладаються на коригування швидкості рухів крана на основі математичної моделі, яка приблизно відповідає реакції крана та його елементів керування. Ці системи не можуть впоратися з розгойдуванням через вітер або вплив вантажу, і тому зазвичай використовуються на внутрішніх мостових кранах [10].

Компанія KCI Konecranes у Фінляндії виготовила систему запобігання розгойдуванню для кранів RTG, яка, як стверджується, поєднує в собі найкращі електронні та гідравлічні системи, оскільки використовує чотири лебідки з двигуном змінного струму, які керують чотирма допоміжними канатами.

Допоміжні канати витягуються з основного барабана підйомних канатів до головного блоку, а потім назад до допоміжних лебідок на візку. Ці мотузки нахилені як у напрямку руху візка, так і в платформі, завдяки чому запобігає хитанню в обох напрямках.

Кожна лебідка незалежно контролюється системою PLC крана за допомогою алгоритмів для регулювання зусиль на допоміжних канатах, щоб запобігти хитанню вантажу [10].

Шведський машинобудівний гігант АВВ виробляє дві системи запобігання хитання крана. Одна з них – система замкнутого циклу для використання на контейнерних кранах, яка, вимірюючи параметри переміщення вантажу, може гасити не тільки коливання маятника від переміщення вантажу, але й коливання від зовнішніх впливів, таких як вітрове навантаження. Управління системою запобігання розгойдування включено в основний ПЛК керування краном.

Інша система – це система з відкритим контуром, яка може запобігати та пом'якшувати коливання, викликане рухом вантажу, але не може компенсувати зовнішні впливи, оскільки немає зворотного зв'язку щодо фактичного положення вантажу. Тому він призначений для використання всередині приміщень, наприклад для мостових кранів на заводах. Система запобігання розгойдування змінює команди операторів крана для приводів руху крана таким чином, щоб прискорення або уповільнення не спричиняло коливання вантажу [11], [12], [13].

Це досягається за допомогою математичної моделі, яка передбачає поведінку навантаження на підйомному канаті як маятнику та розраховує відповідне прискорення в будь-який момент, щоб уникнути хитання. Параметри маятника в будь-який момент часу оцінюються системою за положенням барабана підйомника і характеристиками навантаження [11], [12], [13].

Система замкнутого циклу може бути виправданою на відкритому повітрі (наприклад, при обробці контейнерів або розвантаженні суден), де на навантаження можуть впливати зовнішні сили, такі як вітер або вплив інших навантажень, а час циклу має бути мінімальним [11], [12], [13].

У закритих приміщеннях, таких як фабрика, де зовнішні впливи менш значущі, а тривалість циклу, можливо, не настільки критична, система з відкритим контуром з меншими початковими витратами та витратами на обслуговування є більш доцільною [11], [12], [13].

1.3 Вибір та обґрунтування системи електроприводу підйомного крану

Більшість промислових підприємств, які активно використовують електричні вантажопідіймальні крани, стикаються з проблемою невідповідності підйомного обладнання сучасним технічним вимог. В якості кранового електроприводу мали широке застосування асинхронні двигуни з фазним ротором, керування якими здійснювалось за допомогою силових контролерів або низьковольтними комплектними пристроями (панелями керування). Основною перевагою таких електроприводів є простота їх використання, низька вартість та ремонтпридатність. Однак ці електроприводи мають суттєві недоліки

Ось деякі з них:

- великі втрати енергії, зумовлені низьким $\cos\phi$ та ККД;
- вихід з ладу електродвигунів через перекося в роторних ланцюгах, викликаних втратою контактів у ланцюгах опорів чи контакторах прискорень;
- ударна зміна моменту двигунів, і як наслідок динамічні перевантаження вузлів крана, зумовлені ступінчастим виведенням опорів із ланцюга ротора;
- відсутність режиму силового спуску порожнього гака та легких вантажів у електроприводах механізмів підйому з панелями управління;
- відсутність електричного гальмування в електроприводах механізмів пересування;
- низька зносостійкість релейно-контакторної апаратури;
- великі втрати енергії при спуску та гальмуванні електроприводів у інтенсивному режимі роботи [14].

Найчастіше промислові підприємства, де встановлені крани, змінюють технологію виробництва та номенклатуру виготовленої продукції, роблять перепланування виробничих та складських приміщень, крани керовані з кабіни, переводяться на керування з підлоги по радіоканалу і т.д.

Найефективнішим методом модернізації електрообладнання крана в наш час є встановлення частотно-керованого електроприводу [14].

Використання частотно-керованих електроприводів забезпечує наступні переваги:

- суттєве, до 60%, зниження енергоспоживання;
- підвищення точності та якості регулювання швидкості;
- плавність пуску та гальмування збільшують термін служби всіх механічних елементів, підвищують комфортність управління та забезпечують збереження вантажу;

– асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором дешевші та надійніші двигунів з фазним ротором та двошвидкісних двигунів.

Вбудовані функції перетворювача легко дозволяють використовувати їх в електроприводи підйомно-транспортного обладнання. Перетворювач частоти завдяки має великий функціонал та може виводити інформацію про аварії та помилки на свій графічний термінал. Функція керування гальмом призначена для видачі сигналу на відкриття гальма (по досягненні двигуном необхідного моменту) та сигналу на накладення гальма (при зниження швидкості до мінімального рівня). Для коригування струму зняття гальма в залежності від ваги вантажу може використовуватись функція ваговимірювання, для чого використовується зовнішній датчик вантажу [14].

Розгін та гальмування приводів з використанням частотного перетворювача здійснюється за S-подібним законом, що забезпечує плавне наростання моментів та зусиль у всіх вузлах та механізмах крана. Оскільки кероване гальмування виконує сам електропривод, а гальмо служить для утримання механізму після повної зупинки, суттєво зменшується розгойдування вантажу після зупинки. У процесі розгону та/або гальмування електроприводу можлива зміна часу пуску та гальмування зовнішнім сигналом або після досягнення певної вихідній частоти перетворювача. Профіль кривих пуску та гальмування дозволяють вибрати найбільш відповідний для конкретного механізму закон керування швидкості.

Перетворювач частоти має можливість підключення до його логічних входів кінцевих вимикачів, таким чином вимикачі можуть слугувати для зниження швидкості а також до повної зупинки роботи електроприводу.

Обмеження моменту при векторному керуванні дозволяє формувати необхідну механічну характеристику, причому для рухового та генераторного режиму роботи обмеження моменту може задаватися індивідуально.

На практиці при використанні перетворювача частоти, енергія що генерується двигуном під час опускання вантажу або при гальмуванні інерційного механізму, передається на гальмівні резистори та перетворюється в теплову. Гальмування при якому застосовуються зовнішні гальмівні резистори найбільш розповсюджене.

Проте, такий спосіб гальмування має низку недоліків. Одним із недоліків є те, що до кожного перетворювача частоти необхідно під'єднати власний гальмівний резистор, це призводить до збільшення вартості електроприводу та погіршенню масогабаритних показників установки. Гальмівна енергія виділяється у вигляді теплової на гальмівному резисторі та призводить до його значного нагрівання, таким чином відбувається нераціональне використання електричної енергії гальмуванні. Альтернативою такому нераціональному використанню енергії є застосування модулів рекуперації, які замінюють гальмівні резистори в приводах тривалою роботою в генераторному режимі або мають велику гальмівну потужність, як, наприклад, підйомні та інерційні механізми. В такому випадку гальмівна енергія електропривода повертається в мережу живлення [14].

Сьогодні, з розвитком перетворювальної техніки, з одного боку, та тарифами на електроенергію, що постійно зростають, з іншого боку, застосування модулів рекуперації стає дедалі актуальнішим.

Основні якості (переваги) модулів рекуперації:

- компактність;
- просте введення в експлуатацію без необхідності програмування та налаштування;

- можливість підключити до ланки постійного струму кількох перетворювачів частоти;
- можливість паралельного підключення до 4 модулів рекуперації;
- завдяки енергозбереженню та з урахуванням вартості виключених з схеми гальмівних опорів забезпечується окупність протягом 1-2 років.

Ціна комплекту «частотний перетворювач – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором» можна порівняти з ціною інших рішень, як, наприклад, прикладу «пусковий дросель двигун із фазним ротором».

В цілому, застосування частотно-регульованого електроприводу є найсучаснішим рішенням для кранового електроприводу.

1.4 Висновок за розділом

Згідно з вищерозглянутих причин та наслідків коливань вантажу при роботі підйомних машин, а також розглянутих алгоритмів та методів компенсації цих коливань, можна зробити висновки, що існують різні причини виникнення коливань, основні з них це коливання спричинені від зовнішніх впливів та коливання які викликані рухом вантажу. Відповідно до цього застосовуються система замкнутого циклу яка може гасити не тільки коливання маятника від переміщення вантажу, але й коливання від зовнішніх впливів, таких як вітрове навантаження, та система з відкритим контуром, яка може запобігати та пом'якшувати коливання, викликане рухом вантажу, але не може компенсувати зовнішні впливи, оскільки немає зворотного зв'язку щодо фактичного положення вантажу.

В даній роботі буде розроблено систему автоматизації з відкритим контуром, для модернізації та впровадження її в існуючий мостовий кран підприємства.

Дане питання, а саме розробка такої системи виникла через те, що рішення проти розгойдування значно знизить ризик аварій і підвищить швидкість а також надійність роботи крана. Також дане рішення дасть можливість безпечно керувати краном персоналу з базовою підготовкою.

На основі аналітичного огляду встановлено, що тема «розробка та дослідження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу у підйомних кранах» є актуальною, для вирішення якої необхідно:

1. Виконати розрахунок, перевірку та вибір силової частини електромеханічної системи;
2. Розробити автоматизовану систему керування;
3. Перевірити запропоновані технічні рішення на математичних моделях, та впровадити систему на практиці.

2 РОЗРАХУНОК, ПЕРЕВІРКА ТА ВИБІР СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна пересування візка

Розрахунок моментів статичних опорів та попередній розрахунок потужності електродвигуна

Час пуску t_n до усталеної швидкості з допустимим прискоренням, гальмування t_r від усталеної швидкості до зупинки

$$t_n = t_r = \frac{V_y}{a} = \frac{0,5}{0,5} = 1 \text{ с}, \quad (2.1)$$

де v_y - задана швидкість руху, м/с, a - максимальне прискорення, м/с²

Шлях, який проходить візок за час пуску та гальмування, в даному випадку буде однаковим:

$$a_n = a_r = \frac{V_y^2}{2a} = \frac{0,5^2}{2 \cdot 0,5} = 0,25 \text{ м}. \quad (2.2)$$

З урахуванням (2.2) можна обчислити час усталеного режиму:

$$t_y = \frac{a - (a_n + a_r)}{V_y} = \frac{4 - (0,25 + 0,25)}{0,5} = 7 \text{ с}. \quad (2.3)$$

Обчислені тривалості пуску, гальмування і усталеного режиму, дозволять визначити середньоквадратичний момент, що діє протягом усього часу роботи електроприводу.

Для обрахунку середньоквадратичного моменту необхідно визначити момент опору на кожній ділянці роботи. Момент опору надалі матиме назву момент робочого органу машини M_{po} . Він складається із статичної $M_{рост}$ і динамічної $M_{родін}$ складової:

$$M_{po} = M_{рост} + M_{родін}. \quad (2.4)$$

Для обчислення динамічної складової моменту необхідно обчислити моменти інерції робочого органу з вантажем та без вантажу:

$$J = m \frac{D^2}{4}. \quad (2.5)$$

Підставивши дані у вираз (2.5) отримуємо моменти інерції для випадку з вантажем:

$$J_{\text{рoвант}} = (4,5 + 15) \cdot 10^3 \cdot \frac{0,2^2}{4} = 195 \text{ кгм}^2. \quad (2.6)$$

Моменти інерції без вантажу:

$$J_{\text{рoпуст}} = (4,5) \cdot 10^3 \cdot \frac{0,2^2}{4} = 45 \text{ кгм}^2. \quad (2.7)$$

Динамічний момент визначається:

$$M_{\text{рoдин}} = J \frac{2a}{D}. \quad (2.8)$$

Обчислюємо динамічний момент для розгону та гальмування з вантажем:

$$M_{\text{рoдинвант}} = 195 \cdot \frac{2 \cdot 0,5}{0,2} = 975 \text{ Нм}. \quad (2.9)$$

Динамічний момент при розгоні без вантажу:

$$M_{\text{рoдинпуст}} = 45 \cdot \frac{2 \cdot 0,5}{0,25} = 225 \text{ Нм}. \quad (2.10)$$

Статична складова моменту визначається за формулою:

$$M_{\text{рoст}} = k_p \cdot (M_{\text{тп}} + M_{\text{тк}}); \quad (2.11)$$

$$k_p = 1,35.$$

Момент сил тертя у підшипниках з вантажем:

$$M_{\text{тпв}} = \frac{md_c \mu g}{2} = \frac{(4.5 + 15) \cdot 10^3 \cdot 0.05 \cdot 0.02 \cdot 10}{2} = 97,5 \text{ Нм.} \quad (2.12)$$

Момент сил тертя у підшипниках без вантажа:

$$M_{\text{тпв}} = \frac{md_c \mu g}{2} = \frac{4,5 \cdot 10^3 \cdot 0.05 \cdot 0.02 \cdot 10}{2} = 22,5 \text{ Нм.} \quad (2.13)$$

Момент сил кочення з вантажем:

$$M_{\text{ткв}} = mfg = (4.5 + 15) \cdot 10^3 \cdot 0.0005 \cdot 10 = 97,5. \quad (2.14)$$

Момент сил кочення без вантажа:

$$M_{\text{ткв}} = mfg = 4,5 \cdot 10^3 \cdot 0.0005 \cdot 10 = 22,5. \quad (2.15)$$

Визначаємо статичну складову моменту з вантажем:

$$M_{\text{роств}} = 1,35 \cdot (97,5 + 97,5) = 263,25 \text{ Нм.} \quad (2.16)$$

Статична складова моменту без вантажа:

$$M_{\text{ростп}} = 1,35 \cdot (22,5 + 22,5) = 60,75 \text{ Нм.} \quad (2.17)$$

Обчислюємо повний момент робочого органу:

Під час пуску з вантажем:

$$M_{\text{ро01}} = M_{\text{роствант}} + M_{\text{родинвант}} = 263,25 + 975 = 1238,25 \text{ Нм.} \quad (2.18)$$

Рух із вантажем:

$$M_{\text{ро12}} = M_{\text{роствант}} = 263,25 \text{ Нм.} \quad (2.19)$$

Гальмування з вантажем:

$$M_{\text{ро23}} = M_{\text{роствант}} - M_{\text{родинвант}} = 263,25 - 975 = -711,75 \text{ Нм.} \quad (2.20)$$

Розгін без вантажу:

$$M_{po45} = M_{ростпуст} + M_{родинпуст} = 60,75 + 225 = 285,75 \text{ Нм.} \quad (2.21)$$

Рух без вантажу:

$$M_{po56} = M_{ростпуст} = 60,75 \text{ Нм.} \quad (2.22)$$

Гальмування без вантажу:

$$M_{po67} = M_{ростпуст} - M_{родинпуст} = 60,75 - 225 = -164,25 \text{ Нм.} \quad (2.23)$$

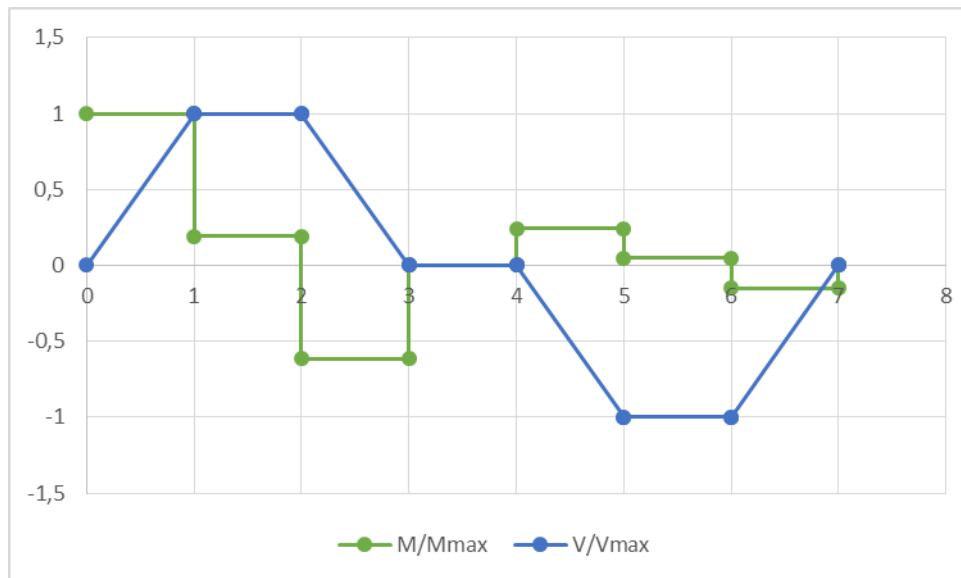


Рисунок 2.1 – Попередня робоча характеристика

На рисунку 2.1 позначені такі ділянки: 0-1: розгін із вантажем, 1 с; 1-2: рух із вантажем, 7 с; 2-3: гальмування з вантажем, 1 с; 3-4: стоянка; 4-5: розгін без вантажу, 1 с; 5-6: рух без вантажу, 7 с; 6-7: гальмування без вантажу, 1 с.

Оскільки момент зводиться до квадрату, знак можна не враховувати. Вираз для середньоквадратичного моменту:

$$M_{сркв} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}. \quad (2.24)$$

Підставивши в (2.24) відомі значення отримуємо:

$$M_{\text{срkv}} = \sqrt{\frac{1238,25^2 \cdot 1 + 263,25^2 \cdot 7 + 711,75^2 \cdot 1 + 285,75^2 \cdot 1 + 60,75^2 \cdot 7 + 164,25^2 \cdot 1}{1 \cdot 4 + 7 \cdot 2}} = 384,38 \text{ Нм.}$$

(2.25)

У знаменнику (2.25) знаходиться величина, що характеризує час роботи електроприводу $t_p=18\text{с}$. Знаючи цю величину та знаючи кількість циклів на годину $z = 90$, можна знайти фактичну тривалість включення електроприводу:

$$TB_{\phi} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_p z}{3600} = \frac{18 \cdot 90}{3600} = 0,20 = 20\%.$$

(2.26)

Потужність двигуна можна знайти за таким співвідношенням:

$$P_{\text{дв}} = k_1 M_{\text{срkv}} \frac{2V_y}{D} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{\text{кат}}}},$$

(2.27)

де k_1 – коефіцієнт враховує динамічні навантаження, обумовлені обертаючими елементами електроприводу, (двигун, редуктор), а також втрати потужності в редукторі, $k_1=1,4$; $TB_{\text{кат}}$ - найближче каталожне значення тривалості включення. Так як у каталозі кранових асинхронних двигунів потужності наведено до $TB = 25\%$, для розрахунків приймемо $TB_{\text{кат}} = 25\% = 0,25$.

$$P_{\text{дв}} = 1,4 \cdot 384,38 \frac{2 \cdot 0,5}{0,22} \sqrt{\frac{0,2}{0,25}} = 2406,58 \text{ Вт.}$$

(2.28)

Для повторно короткочасного режиму роботи слід вибрати двигуни спеціальних серій, призначених для цього режиму (режим роботи S3).

Двигун вибирається за каталогом таким чином, щоб значення його потужності при $TB_{\text{кат}}$ було рівне або дещо більше потужності $P_{\text{дв}}$, розрахованої за формулою (2.28).

З каталогу обрано двигун серії 4МТF(Н)112LB6. Його номінальні дані зведені до таблиці:

Таблиця 2.1 – Параметри двигуна 4МТF(Н)112LB6

Параметр	Значення
Номінальна потужність P_n , кВт	3,7
Номінальна швидкість обертання n_n , об/хв	900
Номінальний струм I_{1n} , А	11,2
Пусковий струм I_{2n} , А	13,8
Пусковий момент M_{max} , Нм	88
Критичний момент M_k , Нм	225
Момент інерції ротора $J_{дв}$, кгм ²	0,045

Передатне число редуктора визначається наступним виразом:

$$j_p = \frac{\omega_n D}{2V_y}. \quad (2.29)$$

де ω_n – номінальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 900}{30} = 94,25 \frac{рад}{с}. \quad (2.30)$$

Тоді передатне число редуктора:

$$j_p = \frac{94,25 \cdot 0,25}{2 \cdot 0,5} = 23,56 \approx 24. \quad (2.31)$$

Вибираємо циліндричний двоступінчастий спеціальний крановий редуктор Ц2-350. Даний редуктор витримує навантаження на тихохідний вал 10000 Н і момент 1750 Нм. Передатне число редуктора – 25, ККД – 0,96.

Наведені статичні моменти системи електроприводу – робочої машини розраховують для кожної ділянки з урахуванням режиму роботи електроприводу за формулою:

У режимі руху:

$$M_c = \frac{M_{рост}}{j_p \eta_p} + \Delta M_x. \quad (2.32)$$

У режимі гальмування:

$$M_c = \frac{M_{\text{рост}} \eta_p}{j_p} + \Delta M_x, \quad (2.33)$$

де ΔM_x - момент втрат холостого ходу двигуна.

Момент втрат холостого ходу асинхронного двигуна M_x розрахувати досить складно через відсутність каталожних даних щодо опорів статора та ротора. Тому в розрахунках асинхронного електроприводу можна не враховувати момент втрат холостого ходу ($\Delta M_x \approx 0$), а електромагнітний момент в усталеному режимі, приймати рівним статичному моменту.

Визначимо наведений статичний момент на кожній ділянці:

$$M_{c01} = M_{c12} = \frac{263,25}{25 \cdot 0,96} = 10,97 \text{ Нм}, \quad (2.34)$$

$$M_{c23} = \frac{263,25 \cdot 0,96}{25} = 10,11 \text{ Нм}, \quad (2.35)$$

$$M_{c45} = M_{c56} = \frac{60,75}{25 \cdot 0,96} = 2,53 \text{ Нм}, \quad (2.36)$$

$$M_{c67} = \frac{60,75 \cdot 0,96}{25} = 2,33 \text{ Нм}, \quad (2.37)$$

Також необхідно розрахувати динамічний приведений момент. Для його розрахунку потрібно знайти приведений момент інерції, який розраховується з урахуванням моменту інерції двигуна:

$$J = \delta J_d + J_{\text{пр}}, \quad (2.38)$$

де δ - коефіцієнт, що враховує момент інерції інших елементів електроприводу: муфт, гальмівного шківів, редуктора та ін. У проекті допускається розраховувати момент інерції електроприводу приблизно, приймаючи у формулі (2.38) коефіцієнт $\delta = 1,3 \dots 1,5$.

Приведений момент інерції:

$$J_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{ро}}}{j_p^2}. \quad (2.39)$$

З (2.38) та (2.39) отримаємо вираз для розрахунку моменту інерції, приведенного до валу двигуна:

З вантажем:

$$J_{\text{вант}} = \delta J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{рвант}}}{j_p^2} = 1,4 \cdot 0,045 + \frac{195}{25^2} = 0,38 \text{ кгм}^2; \quad (2.40)$$

Без вантажа:

$$J_{\text{пуст}} = \delta J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{ропуст}}}{j_p^2} = 1,4 \cdot 0,045 + \frac{45}{25^2} = 0,14 \text{ кгм}^2; \quad (2.41)$$

Приведений динамічний момент:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{2aj_p}{D}. \quad (2.42)$$

З вантажем:

$$M_{\text{динвант}} = J_{\text{вант}} \frac{2aj_p}{D} = 0,38 \cdot \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 25}{0,2} = 47,5 \text{ Нм}; \quad (2.43)$$

Без вантажа:

$$M_{\text{динпуст}} = J_{\text{пуст}} \frac{2aj_p}{D} = 0,14 \cdot \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 25}{0,2} = 17,5 \text{ Нм}. \quad (2.44)$$

Таким чином, можна знайти електромагнітний момент, приведений до валу двигуна, на кожній ділянці.

Під час пуску з вантажем:

$$M_{01} = M_{c01} + M_{\text{динвант}} = 10,97 + 47,5 = 58,47 \text{ Нм.} \quad (2.45)$$

Рух із вантажем:

$$M_{12} = M_{c12} + M_{\text{динвант}} = 10,97 + 0 = 10,97 \text{ Нм.} \quad (2.46)$$

Гальмування з вантажем:

$$M_{23} = M_{c23} - M_{\text{динвант}} = 10,11 - 47,5 = -37,39 \text{ Нм.} \quad (2.47)$$

Розгін без вантажу:

$$M_{45} = M_{c45} + M_{\text{динпуст}} = -2,53 - 17,5 = -20,03 \text{ Нм.} \quad (2.48)$$

Рух без вантажу:

$$M_{56} = M_{c56} + M_{\text{динпуст}} = -2,53 + 0 = -2,53 \text{ Нм.} \quad (2.49)$$

Гальмування без вантажу:

$$M_{67} = M_{c67} + M_{\text{динпуст}} = -2,33 + 17,5 = 15,17 \text{ Нм.} \quad (2.50)$$

Коефіцієнт жорсткості системи електропривод – робоча машина визначається так:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_k}{j_p^2} = \frac{3 \cdot 10^6}{25^2} = 4500 \frac{\text{Н}}{\text{м}}. \quad (2.51)$$

2.2 Перевірка обраного двигуна за нагрівом та перевантажувальною здатністю

Щоб перевірити двигун за продуктивністю, необхідно визначити час його роботи. Воно має бути меншим за максимальний час роботи t_p .

Час перехідного процесу на i -м ділянці визначається наступним виразом:

$$t_i = J \frac{\omega_c}{M_{cp} - M_c}, \quad (2.52)$$

де M_{cp} – середній момент двигуна, ω_c – усталена швидкість обертання двигуна:

$$\omega_c = \frac{2V_y j_p}{D} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 25}{0,2} = 125 \frac{рад}{с}. \quad (2.53)$$

При живленні від перетворювача із задатчиком інтенсивності середній момент двигуна можна прийняти рівним моменту, припустимому до прискорення. Тобто при пуску $M_{cp} = M_{п}$, при гальмуванні $M_{cp} = M_{т}$.

Кут повороту валу під час перехідного процесу:

$$\alpha_i = \frac{\omega_c t_i}{2}. \quad (2.54)$$

Таким чином, для кожного перехідного процесу можна визначити кут повороту валу двигуна та час:

Пуск з вантажем:

$$t_{01} = 0,38 \cdot \frac{125}{58,47 - 10,97} = 1 \text{ с}, \quad (2.55)$$

$$\alpha_{01} = \frac{125 \cdot 1}{2} = 62,5 \text{ рад}. \quad (2.56)$$

Гальмування з вантажем:

$$t_{23} = 0,38 \cdot \frac{125}{-37,39 - 10,11} = 1 \text{ с}; \quad (2.57)$$

$$\alpha_{01} = \frac{125 \cdot 1}{2} = 62,5 \text{ рад}. \quad (2.58)$$

Пуск без вантажу:

$$t_{45} = 0,14 \cdot \frac{125}{20,03 - 2,53} = 1 \text{ с}, \quad (2.59)$$

$$\alpha_{01} = \frac{125 \cdot 1}{2} = 62,5 \text{ рад.} \quad (2.60)$$

Гальмування без вантажу:

$$t_{67} = 0,14 \cdot \frac{125}{15,17 + 2,33} = 1 \text{ с;} \quad (2.61)$$

$$\alpha_{01} = \frac{125 \cdot 1}{2} = 62,5 \text{ рад.} \quad (2.62)$$

Кут повороту валу двигуна, що відповідає величині переміщення в даному режимі:

$$\alpha = \frac{2Lj_p}{D} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 25}{0,2} = 1000 \text{ рад.} \quad (2.63)$$

Тоді час усталеного часу роботи:

$$t_{12} = \frac{\alpha - (\alpha_{01} + \alpha_{23})}{\omega_c} = \frac{1000 - (62,5 + 62,5)}{125} = 7 \text{ с;} \quad (2.64)$$

$$t_{56} = \frac{\alpha - (\alpha_{45} + \alpha_{67})}{\omega_c} = \frac{1000 - (62,5 + 62,5)}{125} = 7 \text{ с.} \quad (2.65)$$

Сумарний час роботи $t_\Phi = 18 \text{ с.}$ Це менше, ніж $t_p = 30 \text{ с.}$ Таким чином, перевірку щодо продуктивності пройдено.

Щоб перевірити двигун по нагріву, необхідно знайти його номінальний момент, приведений до фактичної тривалості включення, і порівняти його з середньоквадратичним моментом.

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{3700}{94,25} = 39,26 \text{ Нм.} \quad (2.66)$$

Момент, приведений до тривалості включення:

$$M_{\text{доп}} = M_{\text{н}} \sqrt{\frac{TB_{\text{кат}}}{TB_{\text{ф}}}} = 39,26 \cdot \sqrt{\frac{0,25}{0,2}} = 43,97 \text{ Нм.} \quad (2.67)$$

Середньоквадратичний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{сркв}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}; \quad (2.68)$$

$$M_{\text{сркв}} = \sqrt{\frac{58,47^2 \cdot 1 + 10,97^2 \cdot 7 + 37,39^2 \cdot 1 + 20,03^2 \cdot 1 + 2,53^2 \cdot 7 + 15,17^2 \cdot 1}{18}} = 18,76 \text{ Нм.} \quad (2.69)$$

Таким чином двигун проходить перевірку по нагріванню.

Таблиця 2.2 - Попередній розрахунок навантажувальних діаграм.

Ділянка:	0-1	1-2	2-3	4-5	5-6	6-7
t, с	1	7	1	1	7	1
α , м	0,25	3,75	0,25	0,25	3,75	0,25
$M_{\text{росг}}$, Нм	263,25	263,25	263,25	60,75	60,75	60,75
$J_{\text{ро}}$, ГМ ²	195	195	195	45	45	45
$M_{\text{родин}}$, Нм	975	0,00	975	225	0	225
$M_{\text{ро}}$, Нм	1238,25	263,25	711,75	285,75	60,75	164,25
$M_{\text{с}}$, Нм	10,97	10,97	10,11	2,53	2,53	2,33
$\omega_{\text{с}}$, рад/с	0 - 125	125	125 - 0	0 - 125	125	125 - 0
J , кгм ²	0,38	0,38	0,38	0,14	0,14	0,14
$M_{\text{дин}}$, Нм	47,5	0	47,5	17,5	0	17,5
M , Нм	58,47	10,97	37,39	20,03	2,53	15,17
t, с	1	7	1	1	7	1
α , рад	62,5	1000	62,5	62,5	1000	62,5

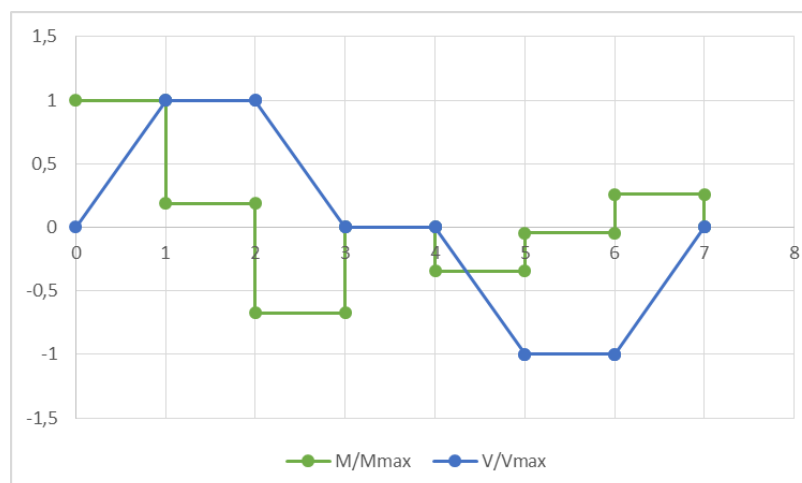


Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма двигуна.

2.3 Розрахунок та вибір комплектного силового перетворювача

2.3.1 Електропривод механізмів горизонтального переміщення

До механізмів горизонтального переміщення відносяться механізми пересування кранів та вантажних візків, а також механізми повороту. Всі ці механізми мають реактивний момент навантаження.

Ідеальний електропривод механізму горизонтального переміщення має забезпечувати жорсткі механічні характеристики (рис. 2.3) у руховому та гальмівному режимах. На відміну від механізму підйому гальмівний режим механізмів горизонтального переміщення займає лише невеликий час циклу і виникає, як правило, при переході з вищих швидкостей на нижчі.

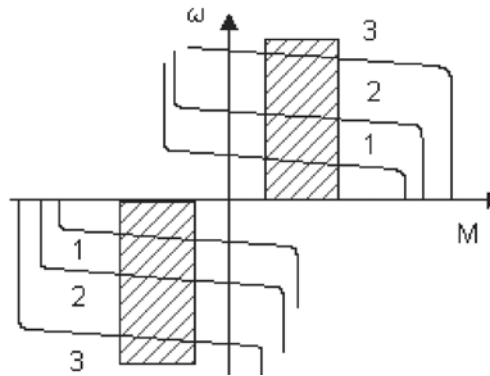


Рисунок 2.3 – Бажані механічні характеристики електроприводу механізму горизонтального переміщення

У режимі гальмування електропривод механізмів горизонтального переміщення може працювати також під час руху під ухил або при русі за вітром.

Більшість механізмів мають великий наведений момент інерції, тому, для уникнення підвищених динамічних навантажень на механізми та металоконструкції електропривод повинен при пуску та гальмуванні обмежувати прискорення.

У зв'язку з великим моментом інерції електродвигуни таких механізмів вибираються з врахуванням підвищених пускових втрати, через це статичний момент на валу електродвигунів в усталеному режимі, не перевищує, як правило, 50% номінального моменту.

Як правило маса вантажу що переміщується має невеликий вплив на статичний момент електроприводу механізму пересування, так як маса металоконструкції крана зазвичай більше маси вантажу.

Маса вантажного візка мостового крана та маса вантажу вже співмврни, а маса вантажного візка баштового крана набагато менша за масу вантажу. Тому маса вантажу, що переміщується, має значний вплив на завантаження механізмів.

У електроприводах механізмів горизонтального переміщення алгоритм керування гальмом простіший, ніж у електроприводах механізмів підйому. В більшості випадків зняття гальма через реактивний момент навантаження можна проводити, не чекаючи, поки момент електродвигуна зросте до значення статичного моменту. Для зниження динамічних навантажень та зменшенню зносу гальмівних накладок потрібно здійснити накладання гальма при швидкості, близької до нульової.

Особливістю електроприводів горизонтального переміщення є те, що більшість їх реалізуються як багаторухові приводи, наприклад, приводи механізмів пересування кранів та механізмів повороту. Завдяки цьому для живлення електродвигунів можна використати один перетворювач частоти (рис. 2.4), що є найбільш економічним варіантом, а для забезпечення гнучкішого керування крановими механізмами можна застосувати для кожного електродвигуна індивідуальний перетворювач. Припустимо що у багаторухових приводах мостових та козлових кранів загального призначення з невеликими прольотами можна застосувати один перетворювача для живлення групи двигунів, про те у такому випадку кожен двигун має мати індивідуальний захист від перевантаження у вигляді теплового реле (рис. 2.4).

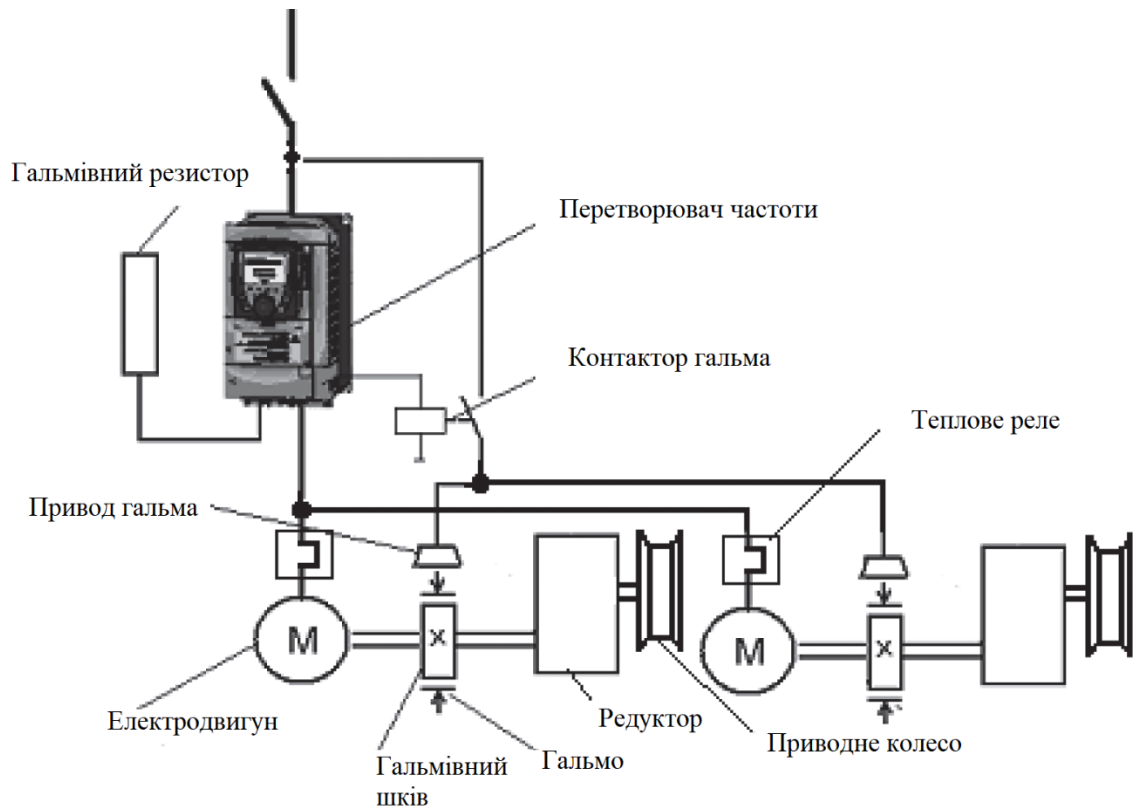


Рисунок 2.4 – Функціональна схема електроприводу механізму пересування

За для забезпечення вирівнювання навантаження між двигунами за схемою Master/slave, синхронізації руху приводів з метою усунення перекося моста крана, для приводів механізмів пересування мостових та козлових кранів з великими прольотами є доцільно застосовувати живлення двигунів від індивідуальних перетворювачів.

Вибір перетворювача частоти механізму пересування візка буде здійснюватися з каталогу SchneiderElectric, та зводиться за вибором по струму та перевірці по потужності.

Струм двигуна механізму пересування візка становить $I_{\text{дв.м.в}} = 11.2 \text{ А}$, потужність $P_{\text{дв.м.в}} = 3.7 \text{ кВт}$. На рисунку 2.14 зображено витяг з каталогу перетворювачів частоти SchneiderElectric серії ATV930 [16]. Вибір перетворювача частоти здійснюємо по рядку з позначенням HD (важкий режим). Як видно з рисунку 2.3 при виборі частотного перетворювача у колонці двигун є два режиму роботи, нормальний режим та важкий режим роботи двигуна. Кранове обладнання відноситься до важкого режиму роботи тому вибір перетворювача частоти здійснюємо по рядку з позначенням HD. Відповідно до

сумарного струму та потужності двигунів механізму пересування крана, було обрано перетворювач частоти ATV930U55N4, технічні характеристики якого приведені в таблиці 2.3.



ATV930D15N4



ATV930D30N4

Степень защиты IP 21, категория C2 или C3, встроенный фильтр ЭМС, преобразователи частоты для настенного монтажа (1)										
Двигатель		Сеть				Altivar Process				
Мощность в соответствии с заводской табличкой (2)		Линейный ток (3)		Полная мощность	Макс. линейный ток K3 Isc	Макс. ток в установившемся режиме (2)		Макс. переходный ток в течение 60 секунд	Каталожный номер	Масса
ND: Нормальный режим (4)	HD: Тяжелый режим (5)	380 В	480 В	380 В						
кВт	л.с.	А	А	кВА	кА	А	А			кг
Трехфазное напряжение питания: 380...480 В, 50/60 Гц (4)										
ND	0.75	1	1.5	1.3	1.1	50	2.2	2.6	ATV930U07N4	4.500
HD	0.37	0.5	0.9	0.8	0.7	50	1.5	2.3		
ND	1.5	2	3	2.6	2.2	50	4	4.8	ATV930U15N4	4.500
HD	0.75	1	1.7	1.5	1.2	50	2.2	3.3		
ND	2.2	3	4.3	3.8	3.2	50	5.6	6.7	ATV930U22N4	4.500
HD	1.5	2	3.1	2.9	2.4	50	4	6		
ND	3	–	5.8	5.1	4.2	50	7.2	8.6	ATV930U30N4	4.600
HD	2.2	3	4.5	4	3.3	50	5.6	8.4		
ND	4	5	7.6	6.7	5.6	50	9.3	11.2	ATV930U40N4	4.600
HD	3	–	6	5.4	4.5	50	7.2	10.8		
ND	5.5	7.5	10.4	9.1	7.6	50	12.7	15.2	ATV930U55N4	4.700
HD	4	5	8	7.2	6.0	50	9.3	14		
ND	7.5	10	13.8	11.9	9.9	50	16.5	19.8	ATV930U75N4	7.700
HD	5.5	7.5	10.5	9.2	7.6	50	12.7	19.1		
ND	11	15	19.8	17	14.1	50	23.5	28.2	ATV930D11N4	7.700
HD	7.5	10	14.1	12.5	10.4	50	16.5	24.8		

Рисунок 2.5 – витяг з каталогу перетворювачів частоти SchneiderElectric серії ATV930

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики перетворювача частоти ATV930U55N4 для важкого режиму

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	380 – 480 В
Повна вхідна потужність (при 380 В), кВт	7.6
Лінійний вхідний струм (при 380 В), А	10.4
Макс. струм в усталеному режимі, А	12.7
Макс. струм в перехідному режимі, А	15.2

2.3.2 Електропривод механізму підйому

Механічні характеристики ідеального електроприводу механізму підйому розташовуються у всіх чотирьох квадрантах, див. рис. 2.6.

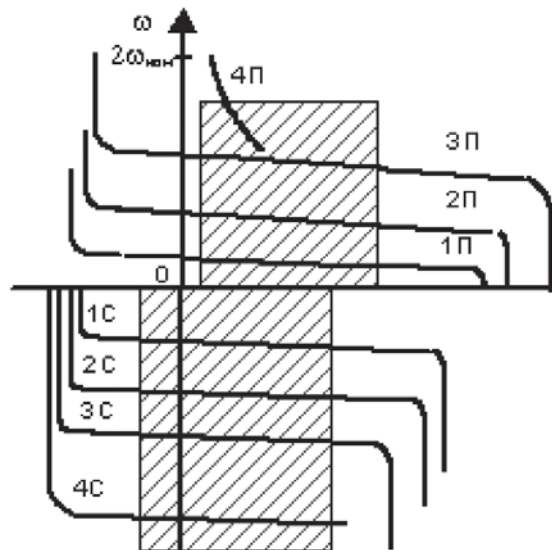


Рисунок 2.6 – Бажані механічні характеристики електроприводу механізму підйому

Вагомою відмінністю електроприводу механізму підйому в порівнянні з електроприводом механізму пересування це наявність активного (потенційного) характеру моменту навантаження. Такий момент навантаження завжди має знак, через те що прагне розкрутити механізм у бік спуску. Таким чином, при підйомі вантажу (перший квадрант механічних характеристик) електропривод повинен долати цей момент (працювати у руховому режимі), під час роботи у напрямку спуску (четвертий квадрант механічних характеристик) не давати вантажу опускатися у режимі вільного падіння (гальмівний режим). Потенційна енергія яка виникає при опусканні вантажу повинна розсіюватись у вигляді тепла на гальмівному резисторі, або повертатись в мережу живлення. Визначальним при виборі структури силового кола та головною вимогою до електроприводу механізму підйому є необхідність забезпечення встановленої швидкості в гальмівному режимі. [15].

Крім того, для більшості електроприводів механізму підйому існує так званий режим силового спуску – коли статичний момент, створюваний вагою легкого вантажу або порожнього гака, що не долає момент від втрат у механічній частині (редукторі, канатно-блоковій системі). В цьому випадку електропривод працює в руховому режимі з вельми невеликим гальмівним моментом – не

більше 10 -15% від номінального. Характеристики силового спуску розташовуються у третьому квадранті[15].

У другому квадранті електропривод не має встановленого режиму і працює тільки в режимі гальмування з найвищих на нижчі швидкості.

Оскільки більшість електроприводів механізму підйому вимагають регулювання швидкості, у кожному квадранті розташовується кілька механічних характеристик[15].

У першому квадранті характеристика 1 служить в основному для обтягування строп вантажозахоплювального пристосування. Характеристика 2 є проміжною. Підйом вантажу на номінальній швидкості проводиться на 3тій характеристиці. При роботі на характеристиках 4 що лежать у першому, третьому та четвертому квадрантах здійснюється підйом і опускання вантажів масою менше від номінальної з підвищеною швидкістю. В більшості випадків характеристика 4 використовуються в електроприводі кранів з великою висотою підйому, перш за все баштових [15].

Характеристика 1, що лежить у третьому та четвертому квадрантах має найбільший вплив на вибір системи електроприводу та її структуру. Швидкість опускання вантажу на цій характеристиці називається установочною, визначається технологічними вимогами до крана і є однією з головних характеристик електроприводу механізму підйому [15].

До електричної частини та до механічної конструкції пред'являються вимоги правилами “Пристрої та безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів”, створені задля забезпечення безпеки, так як при активному моменті навантаження завжди виникає небезпека падіння вантажу з загрозою для життя людей та руйнування механізмів [15].

Першою вимогою є наявність у конструкції механічної частини «нормально замкнутого типу» гальма, яке при відключенні приводу має завжди загальмовувати механізм.

Першим є обов'язкова наявність у конструкції механічної частини гальма про «нормально замкнутого типу», тобто. при відключеному приводі механізм.

Гальмо повинно мати достатній запас гальмівного моменту, званим "коефіцієнтом запасу гальмування".

Друга вимога це обов'язкове забезпечення опускання вантажу тільки працюючим електродвигуном. Зазначені вимоги визначають схемні рішення та побудову силового каналу електроприводу механізму підйому з перетворювачем частоти:

- електропривод повинен забезпечувати достатній запас пускового моменту при максимальному допустимому навантаженні та максимальному допустимому зниженні живильного напруги;

- розгальмовування механічного гальма повинне проводитися тільки після того, як електропривод розвине пусковий момент достатній для підйому вантажу;

- спрацювання будь-якого захисту електроприводу повинно призводити до вимкнення електроприводу із загальмовуванням механічним гальмом;

- перетворювач частоти повинен бути обладнаний пристроєм рекуперації або розсіювання енергії гальмування (гальмівний резистор) з потужністю, достатньою для забезпечення опускання вантажу максимальної допустимої маси на номінальній швидкості[15].

Найбільш поширена структурна схема частотного електроприводу механізму підйому крюкового крана загального призначення представлено на рис. 2.7.

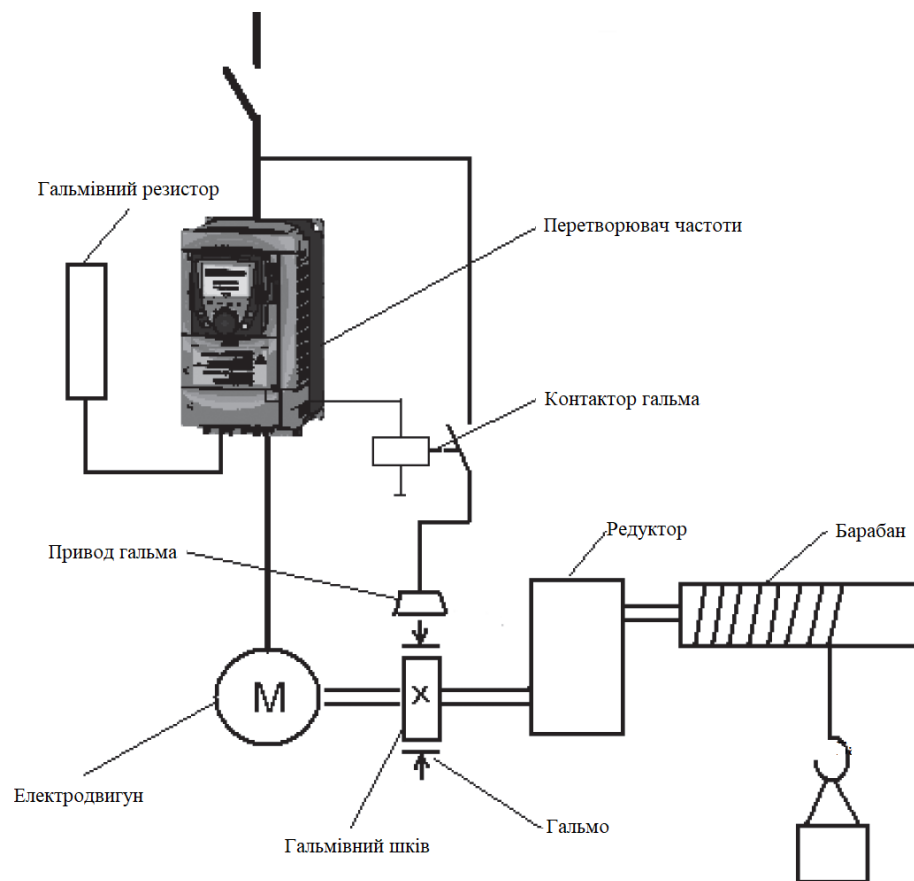



Рисунок 2.7 – Функціональна схема електроприводу механізму підйому

Електромеханічне гальмо живиться через відповідний контактор, який керується відповідним релейним виходом перетворювача частоти. Живлення на електромеханічне гальмо подається після того як електродвигун розвине достатній пусковий момент. Енергія яка виділяється під час гальмування розсіюється на гальмівному резисторі або повертається в мережу завдяки використанню пристрою рекуперації. [15].

На відміну від представленої на рис. 2.7 традиційного компонування механічної частини приводу також існують варіанти де у крановому електроприводі застосовують двигуни з конічним рухомим ротором, принцип розгальмовування таких двигунів побудований на осьовому переміщенні ротора під впливом електромагнітних сил, також набули широкого застосування двигуни при якому механічне гальмо з електромагнітним приводом складає одне ціле із двигуном.

Вибір перетворювача частоти механізму підйому

Вибір перетворювача частоти механізму підйому буде здійснюватися з каталогу SchneiderElectric, та зводиться за вибором по струму та перевірці по потужності. Струм двигуна механізму підйому становить $I_n = 42$ А, потужність $P = 20$ кВт. На рисунку 2.8 зображено витяг з каталогу перетворювачів частоти SchneiderElectric серії ATV930 [16]. Відповідно до струму та потужності двигуна механізму підйому, було обрано перетворювач частоти ATV930D30N4, технічні характеристики якого приведені в таблиці 2.2.



Степень защиты IP 21, категория С2 или С3, встроенный фильтр ЭМС, преобразователи частоты для настенного монтажа (1)										
Двигатель		Сеть				Altivar Process				
Мощность в соответствии с заводской табличкой (2)		Линейный ток (3)		Полная мощность	Макс. линейный ток K3 Isc	Макс. ток в установившемся режиме (2)	Макс. переходный ток в течение 60 секунд	Каталожный номер	Масса	
ND:	Нормальный режим (4)	380 В	480 В	380 В						
HD:	Тяжелый режим (5)									
	кВт	л.с.	А	А	кВА	кА	А	А	кг	
Трехфазное напряжение питания: 380...480 В, 50/60 Гц (4)										
ND	30	40	53.3	45.9	38.2	50	61.5	73.8	ATV930D30N4	28.000
HD	22	30	40.5	35.8	29.8	50	46.3	69.5		
ND	37	50	66.2	57.3	47.6	50	74.5	89.4	ATV930D37N4	28.200
HD	30	40	54.8	48.3	40.2	50	61.5	92.3		
ND	45	60	79.8	69.1	57.4	50	88	105.6	ATV930D45N4	28.700
HD	37	50	67.1	59.0	49.1	50	74.5	111.8		
ND	55	75	97.2	84.2	70	50	106	127.2	ATV930D55N4	57.500
HD	45	60	81.4	71.8	59.7	50	88	132		
ND	75	100	131.3	112.7	93.7	50	145	174	ATV930D75N4	59.000

Рисунок 2.8 – витяг з каталогу перетворювачів частоти SchneiderElectric серії ATV930

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики перетворювача частоти ATV930D30N4 для важкого режиму

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	380 – 480 В
Повна вхідна потужність (при 380 В), кВт	29.8
Лінійний вхідний струм (при 380 В), А	40.5
Макс. струм в усталеному режимі, А	46.3
Макс. струм в перехідному режимі, А	69.5

2.4 Висновок за розділом

В даному розділі проведено розрахунок, перевірка та вибір силової частини електромеханічної системи. В результаті розрахунку було обрано двигун переміщення візка 4MTF(H)112LB6, двигун пройшов перевірку по перевантажувальній здатності та по нагріву. В якості перетворювача частоти для механізму пересування візка та механізму підйому обрано перетворювач SchneiderElectric серії ATV930.

3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Вибір обладнання для створення автоматизованої системи

В якості силового перетворювача частоти для механізму пересування візка, було обрано, в розділі 2, перетворювач частоти ATV930U55N4 (рис.3.1) фірми SchneiderElectric [17].



Рисунок 3.1 – перетворювач частоти ATV930U55N4

Технічні характеристики перетворювача частоти наведені в таблиці 2.3.

В якості ПЛК, було обрано TM241CEC24T (рис.3.2) фірми Schneider Electric [18].



Рисунок 3.2 – ПЛК TM241CEC24T

Технічні характеристики:

- [Us] номінальна напруга живлення - 24 V DC;
- кількість дискретних входів/виходів – 24;
- напруга дискретного входу - 24 V;
- тип дискретного входу – транзистор.

В якості дискретного модуля розширення для ПЛК, було обрано ТМ3ДІ16К (рис.3.3) фірми Schneider Electric [19].



Рисунок 3.3 – Дискретний модуль розширення ТМ3ДІ16К

Технічні характеристики:

- кількість дискретних входів – 16;
- напруга дискретного входу – 24 V;
- час відгуку – 4 ms.

В якості блоку живлення вище обраного обладнання, було обрано ABLS1A24050 (рис.3.4) фірми Schneider Electric [20].



Рисунок 3.4 – Блок живлення ABLS1A24050

Технічні характеристики:

- номінальна вхідна напруга - 100...240 В AC;
- номінальна потужність в W - 120 Вт;
- вихідна напруга - 24 В DC;
- вихідний струм - 5.

В якості кінцевого вимикача обмеження пересування візка було обрано ХСRК111 (рис.3.5) фірми Telemecanique. [21].



Рисунок 3.5 – Кінцевий вимикач XCRK111

Технічні характеристики:

- серія продукту - OsiSense XC;
- тип виробу або компоненту - limit switch;
- матеріал – Металічний;
- кількість полюсів – 4;
- тип та склад контакту – 2 x (1 НЗ + 1 НВ);

В якості ручного пульта керування було обрано XAL-B3-6913 (рис.3.6) фірми АСКО. [22].



Рисунок 3.6 – Пульт ручного керування XAL-B3-6913

Технічні характеристики:

- номінальна напруга, В – 24/380;
- ступінь захисту – IP65;
- кількість кнопок – 7;
- конфігурація – натискні кнопки.

В якості силового перетворювача частоти для механізму підйому, було обрано перетворювач частоти ATV930D30N4 (рис.3.7) фірми SchneiderElectric [23].



Рисунок 3.7 – перетворювач частоти ATV930D30N4

Технічні характеристики перетворювача частоти наведені в таблиці 2.4.

В якості кінцевого вимикача обмеження підйому опускання обрано КИ – Г1 (рис.3.8). [24].

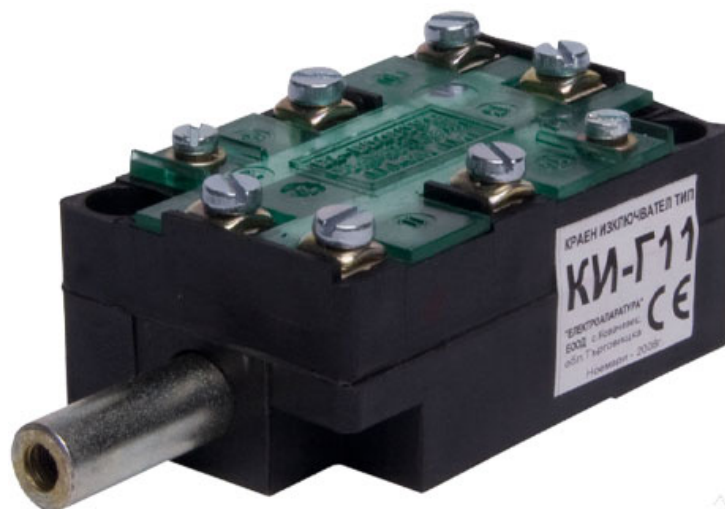


Рисунок 3.8 – Кінцевий вимикач КИ – Г1

Технічні характеристики:

- матеріал – металічний;
- кількість полюсів – 3;
- тип та склад контакту – 3 НЗ;

В якості обмежувача вантажопідйомності було обрано блок DSET01 (рис.3.9). [25].



Рисунок 3.9 – Обмежувач вантажопідйомності DSET01

Технічні характеристики:

- номінальна напруга живлення - 24 V DC;
- кількість релейних виходів – 2;

Вимірювання довжини троса буде здійснюватися на базі енкодера RI 76TD 1024 (рис.3.10) фірми Hengstler [26].



Рисунок 3.10 – Енкодер RI 76TD 1024

3.2 Розробка схемотехнічних рішень, алгоритмів автоматизації та людино-машинного інтерфейсу для системи компенсації коливань вантажу

Для захисту перетворювачів частоти, двигунів механізму пересування та підйому, будуть застосовані автоматичні вимикачі спеціальної серії TeSys GV2 та GV3 від SchneiderElectric. Ця серія призначена для використання її в силових колах електродвигунів. Автоматичні вимикачі захисту двигунів GV2 мають термомагнітний розчеплювач, та забезпечують захист двигунів від перевантажень та захист від коротких замикань.

Вибір автоматичного вимикача здійснюється наступним чином, необхідно підібрати автоматичний вимикач так щоб в його діапазон номінального струму розчеплювача попадав номінальний струм двигуна. Таким чином для механізму підйому буде обраний автоматичний вимикач GV3P50 [27] (рис .3.11).



Рисунок 3.11 – Автоматичний вимикач захисту двигуна GV3

Технічні характеристики GV3P50:

- категорія використання – АС3;
- кількість полюсів – 3;
- діапазон регулювання теплового захисту – 37...50 А;

Аналогічно обираємо автоматичний вимикач для двигуна пересування візка, таким чином для механізму пересування візка буде обраний автоматичний вимикач GV2ME16 [28] (рис .3.12).



Рисунок 3.12 – Автоматичний вимикач захисту двигуна GV2

Технічні характеристики GV2ME16:

- категорія використання – AC3;
- кількість полюсів – 3;
- діапазон регулювання теплового захисту – 9...14 А;

Також необхідно захистити від перевантаження електромагнітне гальмо двигуна підйому та пересування візка, для цього буде обрано автоматичний вимикач серії GV2ME01 (рис. 3.12) з діапазон регулювання теплового захисту 0.1...0.16 А , що повністю перекриває струм живлення електромагнітних гальм двигуна.

За для безпеки в крановому обладнанні обов'язково має бути головний контактор який у разі аварійної ситуації та натисканні оператором кнопки аварійний СТОП знеструмлює силове коло крана, таким чином зупиняє будь який непередбачуваний процес. Максимальний струм в ланці живлення 380 В вольт можна порахувати як суму струмів двигуна підйому та пересування візка $I_k = I_{дв.м.в} + I_{дв.м.п} = 11.2 + 42 = 53.2 \text{ А}$. Таким чином обираємо контактор LC1D65AM7 [29] серії TeSys D від SchneiderElectric (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – 3Р контактор серії TeSys D

Технічні характеристики LC1D65AM7:

- категорія використання – АС3;
- кількість полюсів – 3;
- напруга керування – 220 В;
- допоміжний контакт – 1 НВ + 1 НЗ.
- струм комутації силових контактів – 65 А.

Для захисту електропроводки первинного кола, на вході в шафу керування талю буде встановлено захисний автомат, вибір буде здійснюватися так як і для головного контактора по сумарному струмі механізмів. Автоматичний вимикач вибирається з характеристикою D так як вона призначена для механізмів з важким пуском. Таким чином обираємо автоматичний вимикач A9F75363 [30] серії Acti 9 iC60 від SchneiderElectric (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – 3Р автоматичний вимикач серії Acti 9 iC60

Технічні характеристики A9F75363:

- код кривої – D;
- кількість полюсів – 3;
- тип розчеплювача – тепломагнітний;
- номінальний струм – 63 А.

Для керування гальмом будуть застосовані контактори TeSys K LC1K0601M7 [31] з напругою керування 220 В та струмом комутації 6А (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – 3Р контактор серії TeSys K

Технічні характеристики LC1K0601M7:

- категорія використання – AC3;
- кількість полюсів – 3;
- напруга керування – 220 В;
- допоміжний контакт – 1 НЗ.
- струм комутації силових контактів – 6 А.

На рисунку 3.16 зображено схему підключення частотного перетворювача механізму підйому. Схема містить в собі наступні елементи, 1QF2 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV3P50, 1UZ1 – перетворювач частоти ATV930D30N4, 1KM1 – контактор керування електромагнітним гальмом двигуна підйому LC1D65AM7, 1M1 – двигун механізму підйому, 1R1 – гальмівний резистор. Всі зазначені елементи окрім гальмівного резистора були вибрані в попередніх розділах.

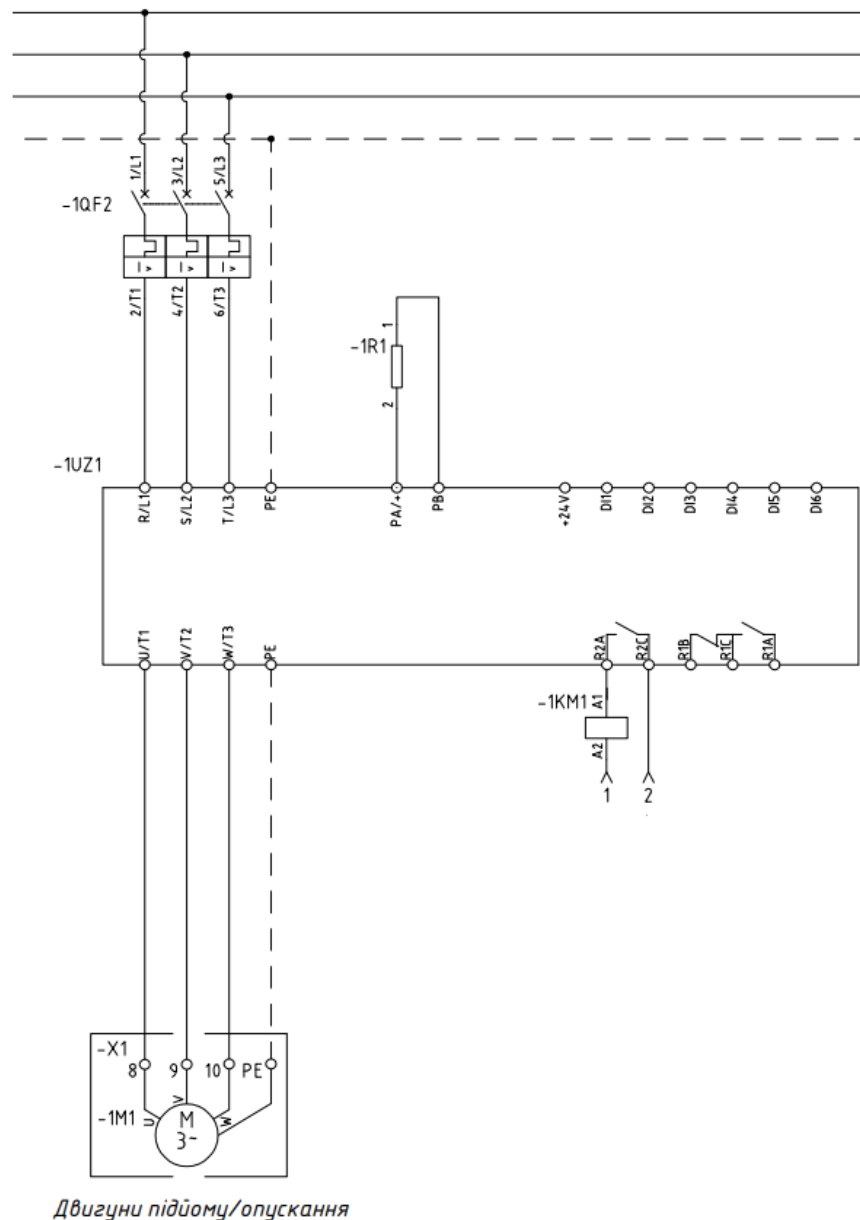


Рисунок 3.16 – Схема підключення частотного перетворювача механізму підйому

Гальмівні резистори – це важливі елементи, що беруть участь у реостатному гальмуванні. Їхня головна функція — розсіювання тепла що впливає на перетворення кінетичної енергії ротора в електричну. Через зміну опору змінюється і гальмівне зусилля. При меншому опорі виникає більше гальмівна зусилля і навпаки.

Для підбору гальмівного резистора можна скористатись каталогом SchneiderElectric [16], в ньому зазначено вже необхідний опір для кожної серії частотних перетворювачів (рис.3.17). Як видно з рисунка 3.17 для частотного

перетворювача ATV930D30N4 необхідний резистор опором 16 Ом, та потужністю 14 кВт.

Тормозные сопротивления, каталожные номера для «тяжелого» режима (подъемно - транспортное оборудование)						
Преобразователи частоты	Степень защиты тормозного сопротивления	Значение сопротивления при 20 °С	Располагаемая средняя мощность при 50 °С (1)	Количество для ПЧ	Каталожный номер	Масса
		Ω	кВт			кг
Напряжение питания 200 - 240 В или 380 - 480 В, 50/60 Гц						
ATV930U40M3 ATV930D11N4 - D15N4 ATV950D11N4 - D15N4 ATV950D11N4E - D15N4E	IP23	28	5.1	1	VW3A7752	25
ATV930U75M3 ATV930D18N4 - D30N4 ATV950D18N4 - D30N4 ATV950D18N4E - D30N4E	IP23	16	14	1	VW3A7753	47

Рисунок 3.17 – Дані з каталогу SchneiderElectric для підбору гальмівних резисторів

Відповідно до отриманих даних буде обрано гальмівний резистор FELR01.1N-12K5-N018R-A-560 опором 18 Ом, та потужністю 12.5 кВт (рис.3.18).



Рисунок 3.18 – Гальмівний резистор для механізму підйому

На рисунку 3.19 зображено схему підключення електромагнітного гальма механізму підйому. Схема містить в собі наступні елементи, 1QF1 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME01, 1KM1 – силові контакти

контактора керування електромагнітним гальмом двигуна підйому LC1D65AM7, 1UZ2 – гальмівний випрямляч, та 1YB1 – електромагнітне гальмо. Всі зазначені елементи були вибрані в попередніх розділах. Електромагнітне гальмо та гальмівний випрямляч це елементи які вже вбудовані в двигун механізму підйому.

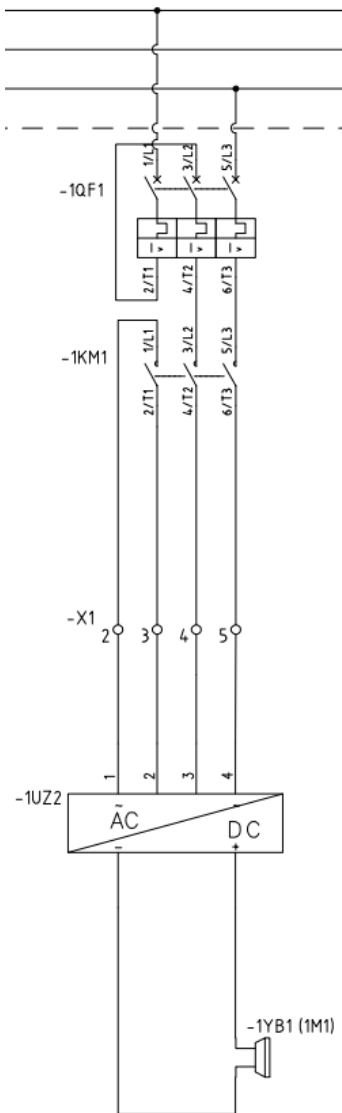


Рисунок 3.19 – Схема підключення електромагнітного гальма механізму підйому

На рисунку 3.20 зображено схему підключення частотного перетворювача механізму пересування візка. Схема містить в собі наступні елементи, 3QF2 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME16, 3UZ1 – перетворювач частоти ATV930U55N4, 3KM1 – контактор керування електромагнітним гальмом двигуна пересування візка LC1D65AM7, 3M1 – двигун механізму

пересування візка, 3R1 – гальмівний резистор. Всі зазначені елементи окрім гальмівного резистора були вибрані в попередніх розділах.

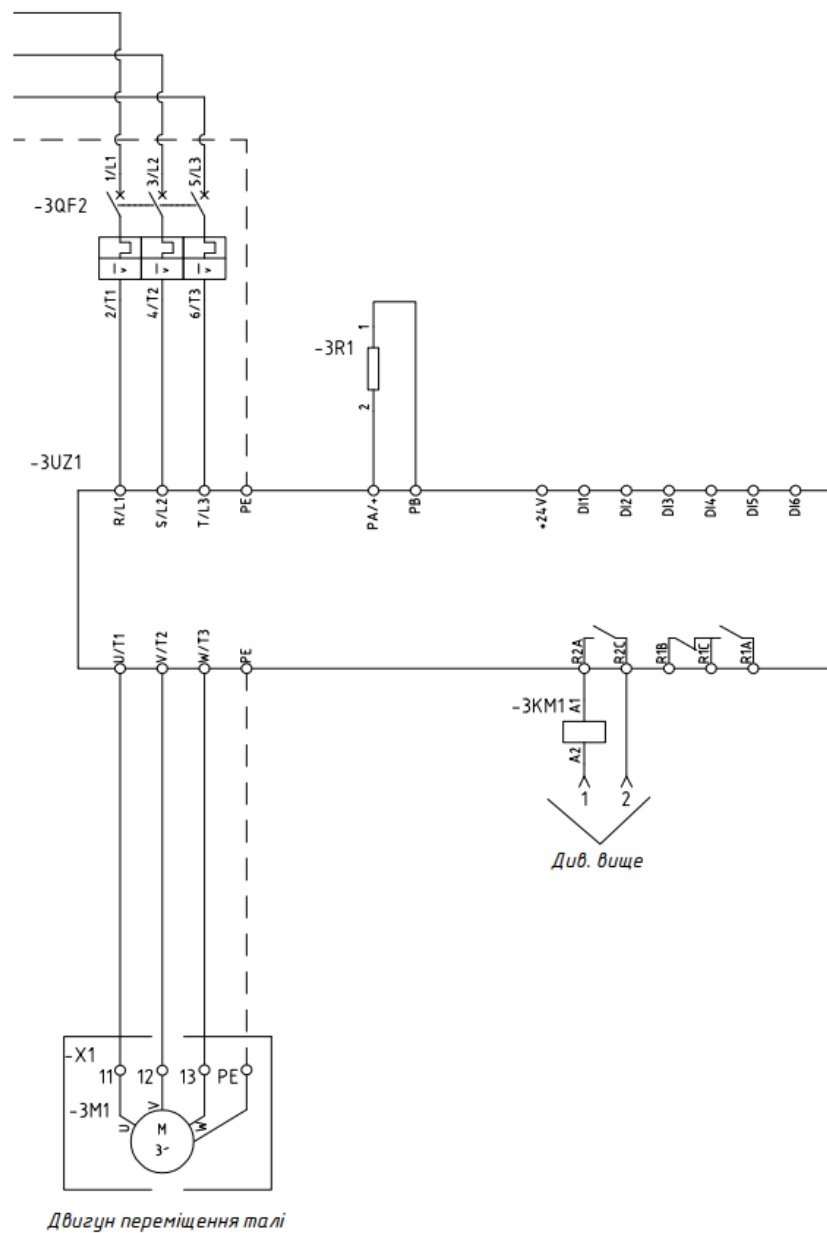


Рисунок 3.20 – Схема підключення частотного перетворювача механізму пересування візка

Для підбору гальмівного резистора скористаємось каталогом SchneiderElectric [16], (рис.3.31). Як видно з рисунка 3.21 для частотного перетворювача ATV930U55N4 необхідний резистор опором 60 Ом, та потужністю 3.4 кВт.

Тормозные сопротивления, каталожные номера для «тяжелого» режима (подъемно - транспортное оборудование)						
Преобразователи частоты	Степень защиты тормозного сопротивления	Значение сопротивления при 20 °С	Располагаемая средняя мощность при 50 °С (1)	Количество для ПЧ	Каталожный номер	Масса
		Ω	кВт			кг
Напряжение питания 200 - 240 В или 380 - 480 В, 50/60 Гц						
ATV930D18M3	IP23	5	6.9	1	VW3A7746	27
ATV930U07N4 - U40N4 ATV950U07N4 - U40N4 ATV950U07N4E - U40N4E	IP20	100	1.7	1	VW3A7750	5.5
ATV930U55N4 - U75N4 ATV950U55N4 - U75N4 ATV950U55N4E - U75N4E	IP20	60	3.4	1	VW3A7751	10

Рисунок 3.21 – Дані з каталогу SchneiderElectric для підбору гальмівних резисторів

Відповідно до отриманих даних буде обрано гальмівний резистор FELR01.1N-04K5-N055R-A-560 опором 55 Ом, та потужністю 4.5 кВт (рис.3.22).



Рисунок 3.22 – Гальмівний резистор для механізму пересування візка

На рисунку 3.23 зображено схему підключення електромагнітного гальма механізму пересування візка. Схема містить в собі наступні елементи, 3QF1 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME01, 3KM1 – силові контакти контактора керування електромагнітним гальмом двигуна підйому LC1D65AM7, 3UZ2 – гальмівний випрямляч, та 3YB1 – електромагнітне гальмо. Всі зазначені елементи були вибрані в попередніх розділах. Електромагнітне гальмо та гальмівний випрямляч це елементи які вже вбудовані в двигун механізму пересування візка.

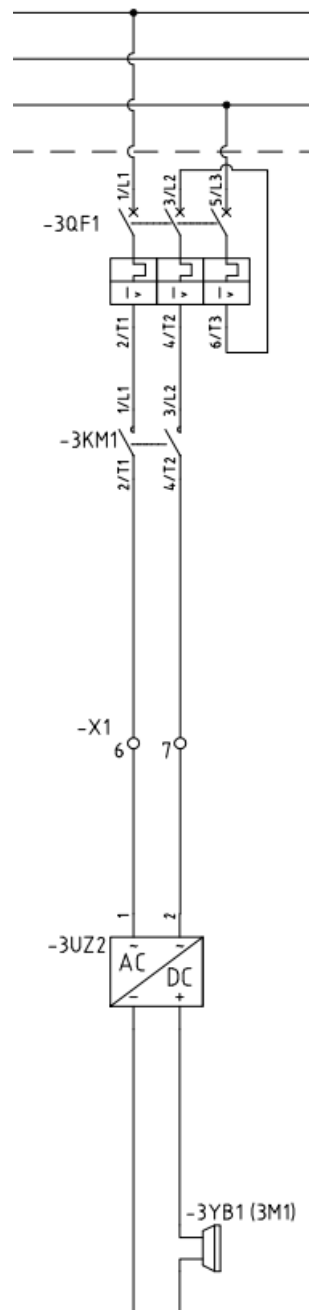


Рисунок 3.23 – Схема підключення електромагнітного гальма механізму пересування візка

На рисунку 3.24 зображено схему підключення блока дискретних входів та розлучення виводів пульта ручного керування. Як видно зі схеми пульт ручного керування підключено через промисловий 16 піновий роз'єм, це реалізовано за для зручності його підключення та у випадку виходу з ладу заміни. Згідно паспортних даних входи дискретного блока мають бути захищені на вході запобіжником з номінальним струмом 0.2 А. Пульт ручного керування містить в собі кнопку аварійної зупинки (SB1). Зображена схема на рис. 3.24 включає

наступні елементи, XS, XP1 – 16-ти піновий промисловий роз’єм, A2 – блок дискретних входів TM3DI16K , A6 – пульт ручного керування XAL-B3-6913, FU3 – запобіжник захисту дискретних входів. Всі зазначені елементи були вибрані в попередніх розділах.

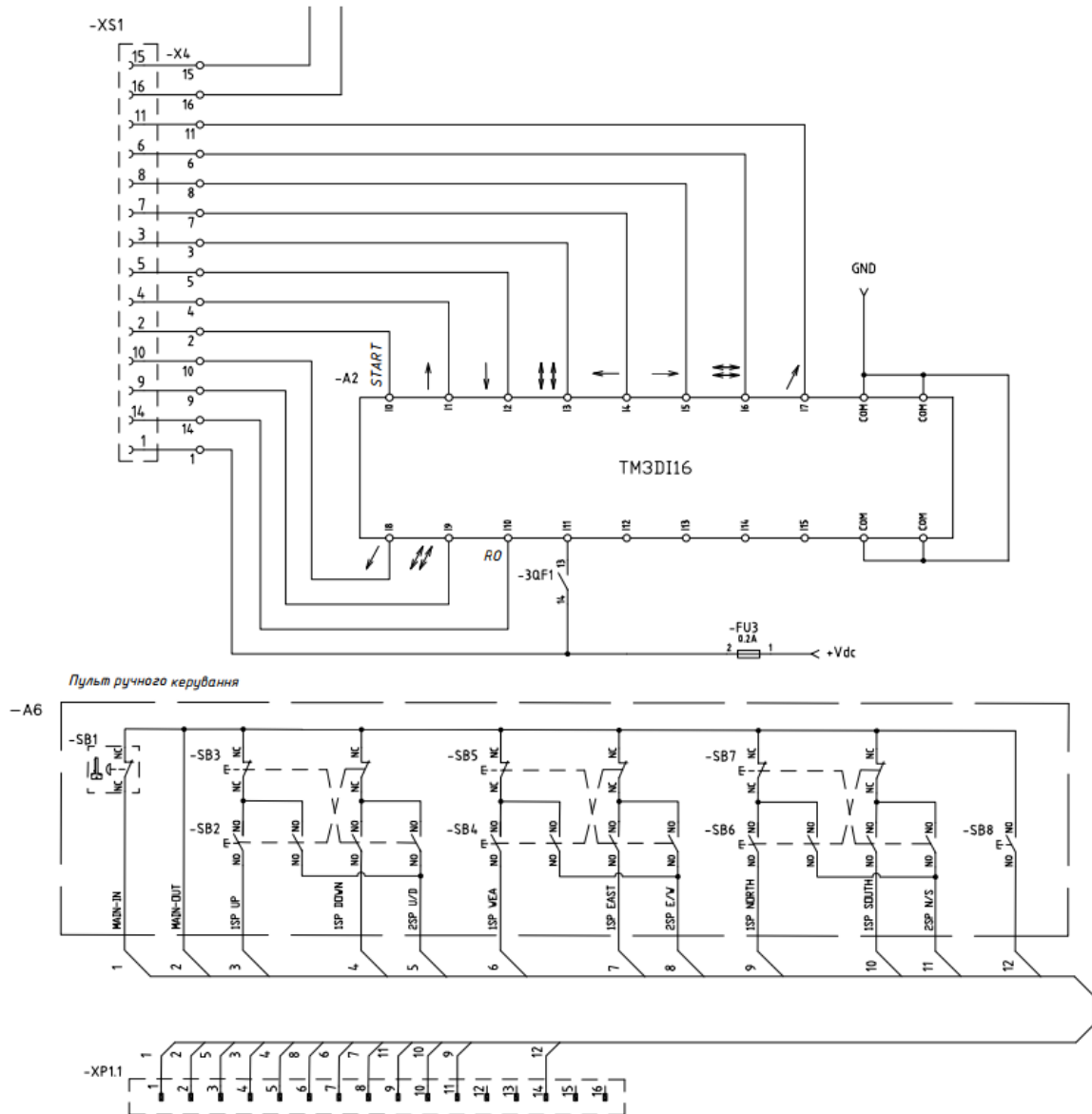


Рисунок 3.24 – Схема підключення блока дискретних входів та розключення виводів пульта ручного керування

На рисунку 3.25 зображено схему підключення ПЛК, енкодера, та кінцевих вимикачів обмеження пересування та підйому.

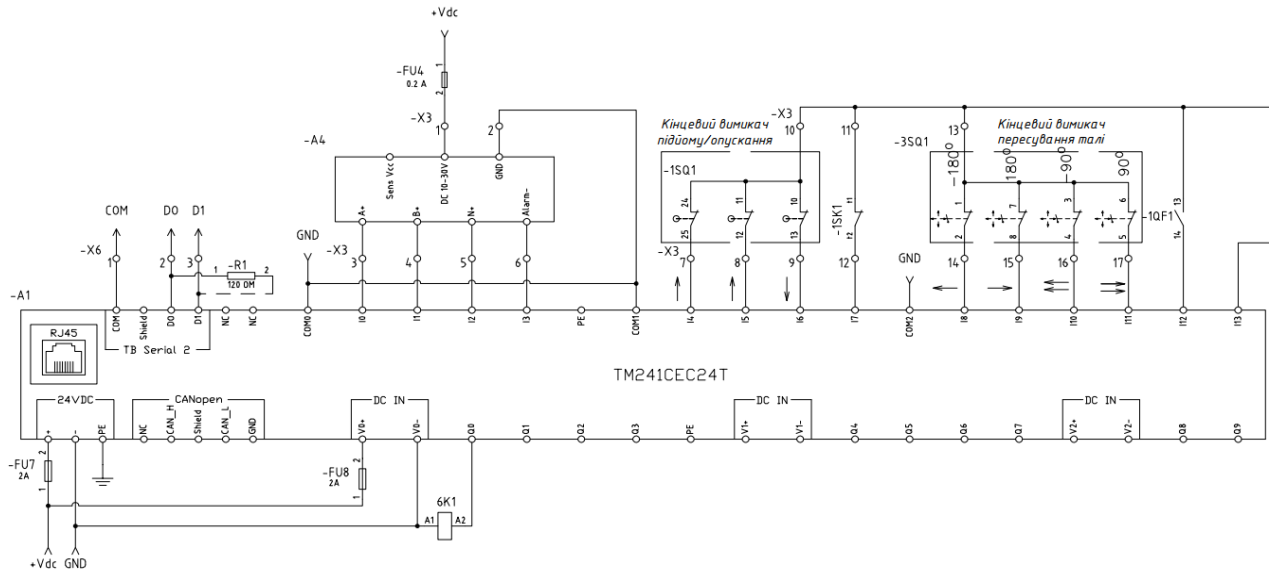


Рисунок 3.25 – Схема підключення блока дискретних входів та розключення виводів пульта ручного керування

Зображена схема на рис. 3.25 включає наступні елементи, А1 – програмований логічний контролер TM241CEC24T, А4 – енкодер RI 76TD 1024, 1SQ1 – кінцевий вимикач обмеження підйому опускання КИ – Г1, 3SQ1 – кінцевий вимикача обмеження пересування візка ХСРК111. Всі зазначені елементи були вибрані в попередніх розділах.

Зв'язок між програмованим логічним контролером та перетворювачами частоти реалізовано на протоколі Modbus RTU.

Для того щоб всі вище перераховані фрагменти схеми функціонували належним чином, та забезпечували керування механізмом підйому та пересування візка, а також забезпечували функцію компенсації коливань вантажу, необхідно написати та завантажити в програмований логічний контролер програму керування.

Для програмування логічного контролера створено таблицю 3.1 в якій наведено найменування входу контролера та його позначення на електричній схемі, також наведено яка має виконуватись функція при надходженні певного сигналу на зазначений вхід.

Таблиця 3.1 – Технічне завдання для програмування ПЛК

№ п/п	Контролер (позначення на ЕЗ)	Номер входу	Опис	Результат у випадку "1"	Результат у випадку "0"
1	2	3	4	5	6
1	A2	I0	Вмикання крана	Дозвіл на керування краном (вмикання головного контактора (див. № п/п 19))	Заборона на керування краном
2	A2	I1	Підймання 1-а швидкість	Завдання на 1UZ1	
3	A2	I2	Опускання 1-а швидкість	Завдання на 1UZ1	
4	A2	I3	Підйом/опускання 2-а швидкість	Завдання на 1UZ1	
5	A2	I4	Вліво (рух талі) 1-а швидкість	Завдання на 3UZ1	
6	A2	I5	Вправо (рух талі) 1-а швидкість	Завдання на 3UZ1	
7	A2	I6	Вправо/вліво (рух талі) 2-а швидкість	Завдання на 3UZ1	
8	A2	I11	Захист випрямляча гальма 3UZ2	Дозвіл на завдання 3UZ1	Заборона завдання 3UZ1
9	A1	I4	Кінцевий вимикач крайнього аварійного верхнього положення підйому (1SQ1)	Дозвіл на завдання, 1UZ1	Заборона на завдання, 1UZ1 (миттєва зупинка підйому (1UZ1))
10	A1	I5	Кінцевий вимикач крайнього верхнього положення на підйом (1SQ1)		Передача сигналу "крайне верхнє положення" до 1UZ1
11	A1	I6	Кінцевий вимикач крайнього нижнього положення на опускання (1SQ1)		Передача сигналу "крайне нижнє положення" до 1UZ1
12	A1	I7	Термозахист двигуна 1M1	Дозвіл на завдання на підйом до 1UZ1	Заборона завдання на підйом до 1UZ1
13	A1	I8	Кінцевий вимикач крайнього лівого положення талі (3SQ1)		Передача сигналу "крайне ліве положення" до 3UZ1
14	A1	I9	Кінцевий вимикач крайнього правого положення талі (3SQ1)		Передача сигналу "крайне праве положення" до 3UZ1
15	A1	I10	Кінцевий вимикач лівого положення обмеження 2-ї швидкості талі (3SQ1)		Передача сигналу "крайне ліве положення, обмеження 2-ї швидкості " до 3UZ1

1	2	3	4	5	6
16	A1	I11	Кінцевий вимикач правого положення обмеження 2-ї швидкості талі (3SQ1)		Передача сигналу "крайне праве положення, обмеження 2-ї швидкості " до 3UZ1
17	A1	I12	Захист випрямляча гальма 1UZ2	Дозвіл на завдання 1UZ1	Заборона завдання 1UZ1
18	A1	I13	Перевищення номінального вантажу	Дозвіл на завдання підйому (1UZ1) та на будь яке завдання до 3UZ1, 4UZ1, 4UZ2	Заборона на завдання підйому 1UZ1, та заборона на будь яке завдання до 3UZ1, 4UZ1, 4UZ2
Дискретні виходи					
19	A1	Q0	Дозвіл включення лінійного контактора	Одночасне спрацювання сигналів (позначених зеленим)	

Для написання програми буде використовуватись спеціалізоване програмне забезпечення від SchneiderElectric, Machine Expert V2.0 (рис. 3.26).

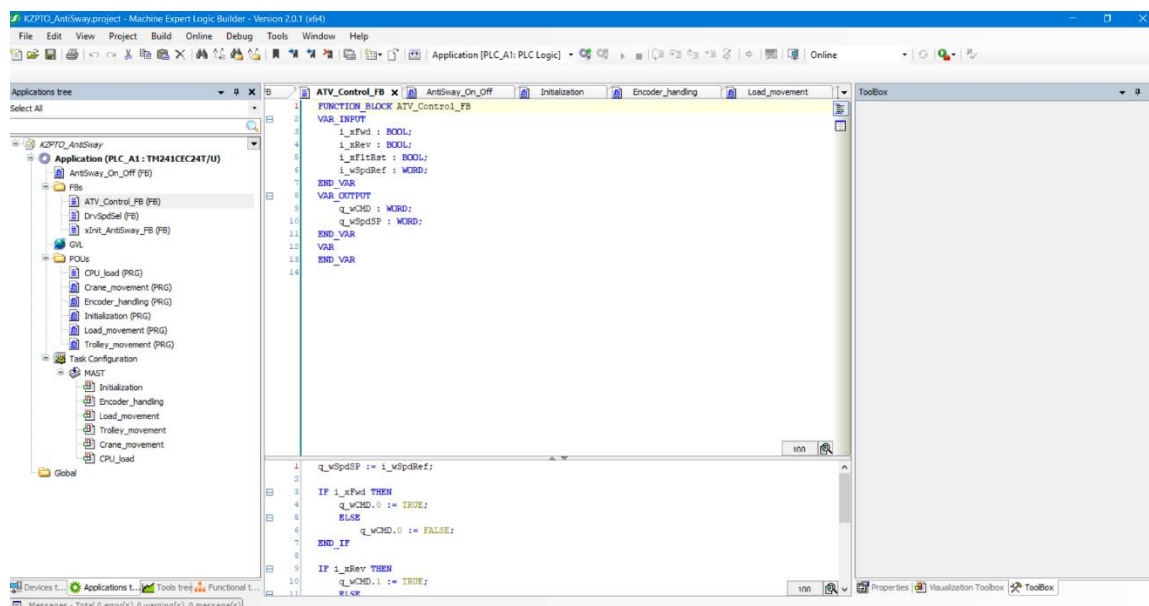


Рисунок 3.26 – Програмне забезпечення Machine Expert V2.0

Для реалізації функції компенсації коливань буде застосований вже готовий програмний блок з бібліотеки Hoisting SchneiderElectric. В даній бібліотеці є три методи вимірювання довжини троса, за допомогою кінцевих вимикачів, це двох або трьох позиційне вимірювання довжини, та за допомогою енкодера. В даному проекті буде використовуватись вимірювання довжини троса за допомогою енкодера, так як цей метод є найточніший, з попередньо розглянутих. На рисунку 3.27 зображений блок з бібліотеки Hoisting.



Рисунок 3.27 – Блок AntiSway від SchneiderElectric

Принцип роботи блоку компенсації коливань полягає в наступному рис.3.28, оцінюється величина відхилення на основі швидкості та довжини троса, коригується завдання швидкості та розгінно/гальмівні характеристики, модифіковане завдання передається приводу по мережі Modbus RTU, контролюються кінцеві вимикачі зупинки.

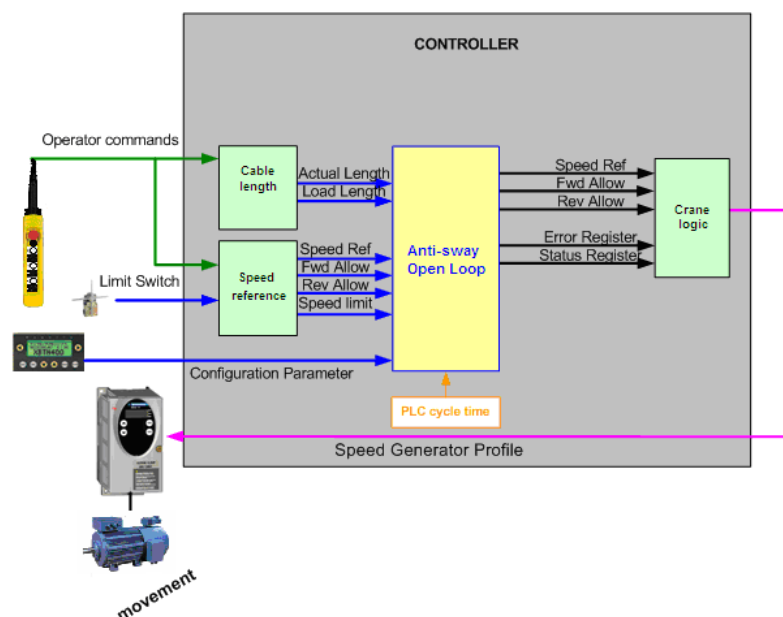


Рисунок 3.28 – Принцип роботи блоку компенсації коливань

На рисунку 3.29 зображена діаграма швидкості, яка показує що при активації функції компенсації коливання блок програми здійснює перерахунок завдання швидкості на кожному циклі рис. 3.29.

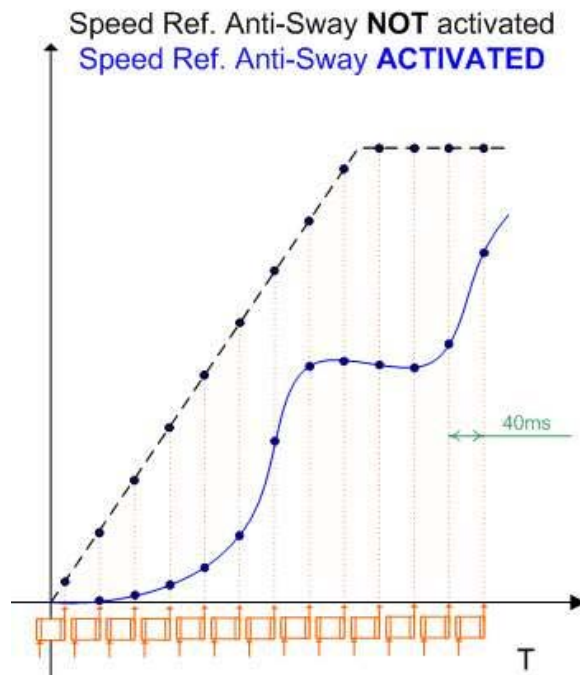


Рисунок 3.29 – Перерахунок завдання швидкості на кожному

Для того щоб електрична схема працювала належним чином необхідно запрограмувати контролер відповідно до задач таблиці 3.1. На рисунку 3.29 зображений один із блоків програми, який відповідає за механізм пересування візка.

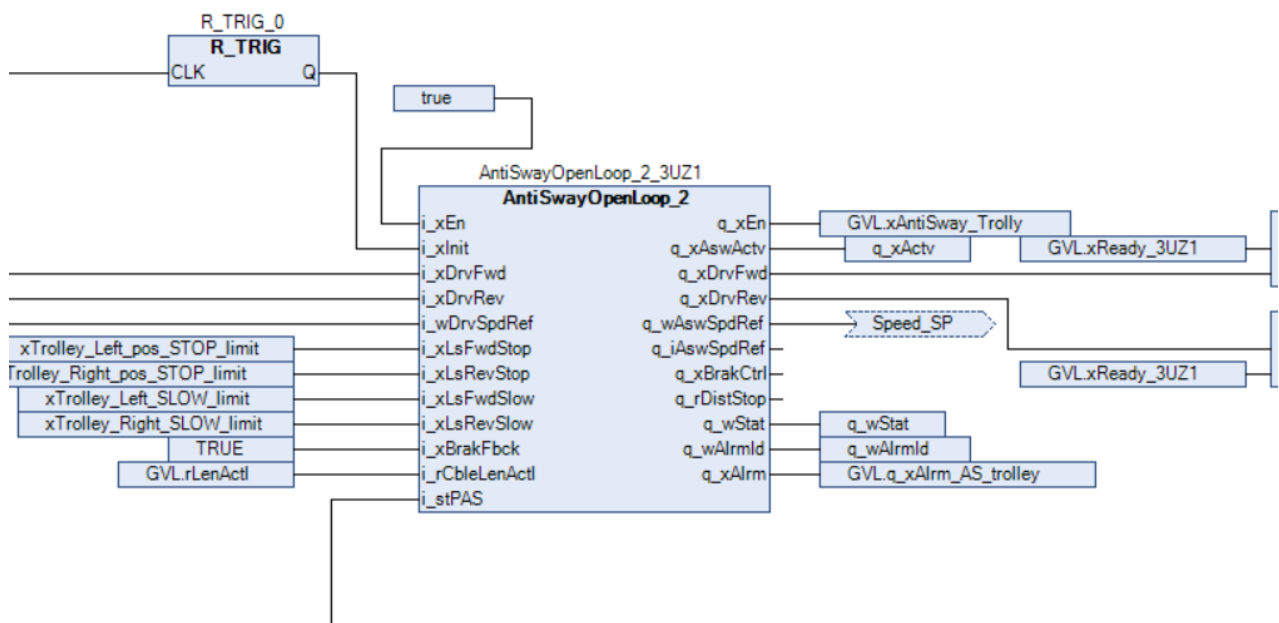


Рисунок 3.29 – Підпрограма керування механізмом візка

3.3 Висновок за розділом

В даному розділі проведено розрахунок та вибір необхідних елементів для створення автоматизованої системи, розроблено схемотехнічні рішення, та програмне забезпечення для програмованого логічного контролера.

4 ПЕРЕВІРКА ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ НА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ

4.1 Розробка математичної моделі візка мостового крану

4.1.1 Моделювання механічної частини

Математична модель електропривода візка мостового крану відрізняється складним коливальним навантаженням, розрахувати яке за спрощеними формулами з теорії електропривода не можливо. Тому при складанні математичної моделі будемо користуватися методами теоретичної механіки, які базуються на використанні рівнянь Ейлера-Лагранжа, доповнивши їх методами електродинаміки, будемо використовувати підхід, який базується на використанні узагальнених рівнянь Лагранжа.

При цьому вважаємо, що рух візка та вантажу є складним рухом, який залежить від роботи двох двигунів, один з яких переміщує вантаж у вертикальній площині - електропривод підйому, а другий у горизонтальній площині - електропривод переміщення. Розрахункова схема мостового крану наведена на рис.4.1.

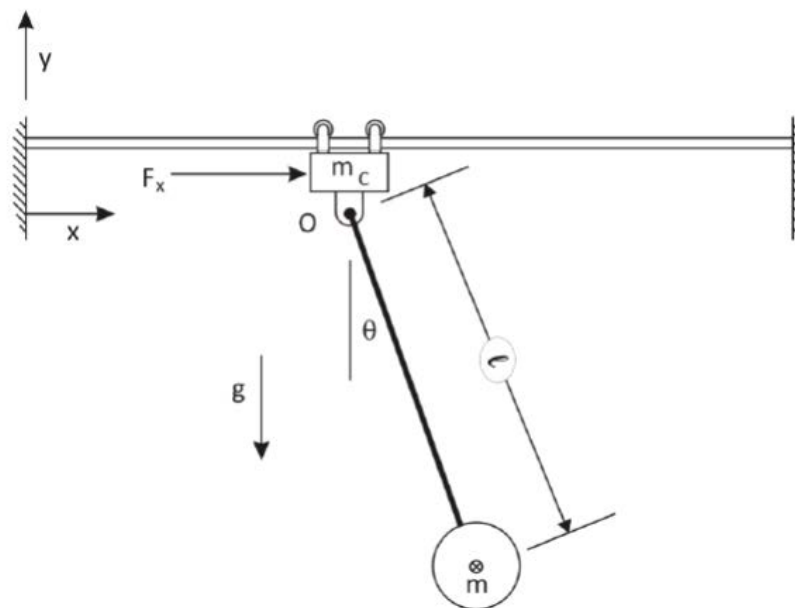


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема мостового крану

Ця структурна схема дозволяє розглядати наступні кінематичні рівняння, які описують положення вантажу,

$$x = x_0 + \ell \sin \theta; \quad y = \ell \cos \theta. \quad (4.1)$$

Запишемо вирази для швидкостей вантажу у вертикальній та горизонтальній площинках вважаючи, що під час руху вантажу може змінюватись не лише його кутове положення θ відносно вертикалі та лінійне положення візка x_0 , але й довжина тросу ℓ ,

$$\begin{aligned} v_y = \dot{y} &= \frac{d}{dt} (\ell \cos \theta) = \frac{d\ell}{dt} \cos \theta - \ell \frac{d\theta}{dt} \sin \theta; \\ v_x = \dot{x} &= \frac{dx_0}{dt} + \frac{d}{dt} (\ell \sin \theta) = \frac{dx_0}{dt} + \frac{d\ell}{dt} \sin \theta + \ell \frac{d\theta}{dt} \cos \theta. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Позначивши

$$v_\ell = \frac{d\ell}{dt} = \dot{\ell}, \quad v_{x0} = \frac{dx_0}{dt} = \dot{x}_0, \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}, \quad (4.3)$$

перепишемо вирази (4.2) наступним чином,

$$\begin{aligned} v_y &= \dot{\ell} \cos \theta - \ell \dot{\theta} \sin \theta = v_\ell \cos \theta - \ell \omega \sin \theta; \\ v_x &= \dot{x}_0 + \dot{\ell} \sin \theta + \ell \dot{\theta} \cos \theta = v_{x0} + v_\ell \sin \theta + \ell \omega \cos \theta. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Вирази (4.4) визначають проекції вектору швидкості з яким рухається вантаж та можуть бути використані для знаходження квадрату його модуля, який застосовується при визначенні кінетичної енергії,

$$V^2 = v_x^2 + v_y^2 = \ell^2 \omega^2 + v_\ell^2 + 2\ell \cos \theta \omega v_{x0} + 2 \sin \theta v_\ell v_{x0} + v_{x0}^2. \quad (4.5)$$

Проаналізувавши вираз (4.5), зроблено висновок, що квадрат лінійної швидкості вантажа залежить від рухів, які супроводжують його горизонтальне, вертикальне та кутове переміщення, а також містить складові, які визначають взаємний вплив одного руху на інший. Ці складові визначаються відповідно сумою у квадратних дужках (4.5), яка дозволяє стверджувати, що про взаємозв'язок рухів у горизонтальній площині та підйом вантажу, а також про рух у горизонтальній площині та коливання вантажу.

Значення кінетичної енергії вантажу визначимо використовуючи вираз (4.5),

$$W_{km} = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2}m(\ell^2\omega^2 + v_\ell^2 + 2\cos\theta\ell\omega v_{x0} + 2\sin\theta v_\ell v_{x0} + v_{x0}^2). \quad (4.6)$$

Потенційна енергія вантажу може бути розрахована наступним чином,

$$W_p = -mg\ell \cos\theta, \quad (4.7)$$

де g — прискорення вільного падіння.

Кінетична енергія візка:

$$W_{kM} = \frac{Mv_{x0}^2}{2}. \quad (4.8)$$

За нуль потенційної енергії прийmemo вертикальне положення візка, отже:

$$W_{pM} = 0. \quad (4.9)$$

Окрім наведених вище, кінетична енергія запасється у механічних частинах кожного двигуна та відповідних елементах механічних передач:

$$W_{J_1} = \frac{J_1\omega_1^2}{2}; \quad W_{J_2} = \frac{J_2\omega_2^2}{2}, \quad (4.10)$$

де J_1 — сумарний момент інерції двигуна, який переміщає візок по рейках, та коліс.

$$J_1 = J_{M1} + J'_k, \quad (4.11)$$

де J'_k — приведений момент інерції коліс, J_{M1} — момент інерції електродвигуна пересування; J_2 — сумарний момент інерції електроприводу підйому.

$$J_2 = J_{M2} + J'_b, \quad (4.12)$$

де J'_b — момент інерції барабану, J_{M2} — момент інерції електродвигуна підйому; ω_1 — кутова швидкість електроприводу пересування візка.

$$\omega_1 = v_x/R_1, \quad (4.13)$$

де R_1 — радіус колеса; ω_2 — кутова швидкість електроприводу підйому.

$$\omega_2 = v_\ell/R_2, \quad (4.14)$$

де R_2 — радіус барабану.

Враховуючи вирази (4.11)-(4.14) кінетичні енергії у двигунах M_1 та M_2 будуть:

$$\begin{aligned} W_{J1} &= \frac{J_{M1} + J'_k}{2R_k^2} v_{x0}^2; \\ W_{J2} &= \frac{J_{M2} + J'_b}{2R_b^2} v_\ell^2. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Сумарну кінетичну енергію можна визначити використовуючи вирази (4.15), (4.8) та (4.6):

$$\begin{aligned} W_k &= W_{J1} + W_{J2} + W_{km} + W_{kM} = \frac{1}{2} M v_{x0}^2 + \frac{1}{2} \frac{J_1 v_{x0}^2}{R_1^2} + \frac{1}{2} \frac{J_2 v_\ell^2}{R_2^2} + \\ &+ \frac{1}{2} m (\ell^2 \omega^2 + v_\ell^2 + 2 \cos \theta \ell \omega v_{x0} + 2 \sin \theta v_\ell v_{x0} + v_{x0}^2). \end{aligned} \quad (4.16)$$

Будемо вважати, що при русі візка з вантажем виникають зусилля тертя, які розсіюють накопичену у електромеханічній системі енергію. Це розсіяння відбувається при кожному з рухів і характеризуються наступними дисипативними функціями:

$$\Psi_{x0} = \frac{k_x v_{x0}^2}{2}; \quad \Psi_\ell = \frac{k_\ell v_\ell^2}{2}; \quad \Psi_\omega = \frac{k_\omega \omega^2}{2}. \quad (4.17)$$

Сумарна функція Реллея може бути представлена таким чином:

$$\Psi_m = \Psi_{x_0} + \Psi_\ell + \Psi_\omega = \frac{k_x v_{x_0}^2}{2} + \frac{k_\ell v_\ell^2}{2} + \frac{k_\omega \omega^2}{2}. \quad (4.18)$$

4.1.2 Складання рівнянь Лагранжа

Вирази (4.16) та (4.7) дозволяють записати лагранжіан розглядаємої механічної системи наступним чином:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = W_k - W_p = & \frac{1}{2} M v_{x_0}^2 + \frac{1}{2} \frac{J_1 v_{x_0}^2}{R_1^2} + \frac{1}{2} \frac{J_2 v_\ell^2}{R_2^2} + \\ & + \frac{1}{2} m (\ell^2 \omega^2 + v_\ell^2 + 2 \cos \theta \ell \omega v_{x_0} + 2 \sin \theta v_\ell v_{x_0} + v_{x_0}^2) m g l \cos \theta. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Сумарна функція розсіювання буде:

$$\Psi = \Psi_e + \Psi_m = \frac{k_x v_{x_0}^2}{2} + \frac{k_\ell v_\ell^2}{2} + \frac{k_\omega \omega^2}{2}. \quad (4.20)$$

Використання виразів (4.19) – (4.20) дозволяє скласти наступні рівняння Лагранжа у загальному вигляді:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{w}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w} - \frac{\partial \Psi}{\partial \dot{w}} = Q, \quad (4.21)$$

де w — узагальнена координата, Q — зовнішній вплив.

Для розглядаємої електромеханічної системи рівняння (4.21) набудуть наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_{x_0}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_0} + \frac{\partial \Psi}{\partial v_{x_0}} &= M_{eiz}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_\ell} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \ell} + \frac{\partial \Psi}{\partial v_\ell} &= M_{mid}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \omega} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} + \frac{\partial \Psi}{\partial \omega} &= 0; \end{aligned} \quad (4.22)$$

де

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_{x0}} &= Mv_{x0} + \frac{1}{2}m(2l\omega \cos \theta + 2v_\ell \sin \theta + 2v_{x0}) + \frac{J_1 v_{x0}}{R_1^2}; \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_{x0}} &= (M + m)v_{x0} + 2mv_\ell \omega \cos \theta + ml\dot{\omega} \cos \theta - ml\omega^2 \sin \theta + \\
&+ m\dot{\ell} \sin \theta + \frac{J_1 \dot{v}_{x0}}{R_1}; \\
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_0} &= \frac{\partial M'_1}{\partial x_0} i_{f1} i_{a1}; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial v_{x0}} = k_x v_{x0};
\end{aligned} \tag{4.23}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \ell} &= ml\omega^2 + m \cos \theta \omega v_{x0} + mg \cos \theta + \frac{\partial M'_2}{\partial \ell} i_{f2} i_{a2}; \\
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_\ell} &= mv_\ell + m \sin \theta v_{x0} + \frac{J_2 v_\ell}{R_2^2}; \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_\ell} &= m\dot{v}_\ell + m\omega v_{x0} \cos \theta + m \sin \theta v_{x0} + \frac{J_2 \dot{v}_\ell}{R_2^2}; \\
\frac{\partial \Psi}{\partial v_\ell} &= k_\ell v_\ell;
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \omega} &= ml\omega + m \cos \theta \ell v_{x0}; \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \omega} &= 2ml\omega v_\ell + ml^2 \dot{\omega} - ml\omega \sin \theta v_{x0} + mv_\ell \cos \theta v_{x0}; \\
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} &= -ml\omega \sin \theta v_{x0} + 2v_\ell \cos \theta v_{x0} - mg\ell \sin \theta; \\
\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} &= -k_\omega \omega;
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Використовуючи похідні (4.23) –(4.25), запишемо рівняння Лагранжа наступним чином:

$$\begin{aligned}
(M + m)\dot{v}_{x0} + 2mv_\ell \omega \cos \theta + ml\dot{\omega} \cos \theta - ml\omega^2 \sin \theta + m\dot{v}_\ell \sin \theta - \\
- k_x v_{x0} - \frac{k\phi_1 i_{a1}}{R_1} z_1 &= M_{\epsilon i3}; \\
- ml\omega^2 + m\dot{v}_{x0} \sin \theta - mg \cos \theta + m\dot{v}_\ell - k_\ell v_\ell - \frac{k\phi_2 i_{a2}}{R_2} z_2 &= M_{mi0}; \\
ml^2 \dot{\omega} + 2mlv_\ell \omega + mg\ell \sin \theta - k_\omega \omega &= 0;
\end{aligned} \tag{4.26}$$

де z_1, z_2 — передавальні числа редукторів переміщення та підйому.

Перші три рівняння системи (4.26) містять декілька прискорень у кожному рівнянні. З точки зору теорії керування наявність цих прискорень відповідає перехресним зв'язкам між каналами регулювання, які суттєво ускладнюють аналіз та синтез замкнених систем керування.

4.1.3 Трансформація рівнянь Лагранжа до нормальної форми

Усунемо ці перехресні зв'язки шляхом розв'язання рівнянь (4.26) відносно a_{x0} , a_ℓ , ϵ . Таке розв'язання відповідає трансформації системи (4.26) до нормальної форми:

$$\begin{aligned}
\dot{\ell} &= v_\ell; \\
\dot{v}_\ell &= -((-g\ell m J_2 \sin \theta + k_\omega \omega (R_2^2 m + J_2)) \cos \theta + \\
&+ \ell((-J_2 \omega^2 \ell + R_2^2 (k_\ell v_\ell + F_2)) m \sin \theta - (R_2^2 m + J_2)(k_x v_{x0} + F_1))) R_1^2 / \\
&/(\ell(-J_2 \cos \theta)^2 R_1^2 m + (J_2 R_1^2 + R_2^2 (M R_1^2 + J_1)) m + J_2 (M R_1^2 + J_1)); \\
\dot{x}_0 &= v_{x0}; \\
\dot{v}_{x0} &= ((-g\ell m J_2 \sin \theta + k_\omega \omega (R_2^2 m + J_2)) \cos \theta + \ell((-J_2 \omega^2 \ell + \\
&+ R_2^2 (k_\ell v_\ell + F_2)) m \sin \theta - (R_2^2 m + J_2)(k_x v_{x0} + F_1))) R_1^2 / \\
&/(\ell(-J_2 \cos \theta)^2 R_1^2 m + (J_2 R_1^2 + R_2^2 (M R_1^2 + J_1)) m + J_2 (M R_1^2 + J_1)); \\
\dot{\theta} &= \omega; \\
\dot{\omega} &= (\omega m^2 R_1^2 (2J_2 \ell v_\ell + R_2^2 k_\omega) \cos \theta^2 + \ell((-J_2 \omega^2 \ell + \\
&+ R_2^2 (k_\ell v_\ell + F_2)) m \sin \theta - (R_2^2 m + J_2)(k_x v_{x0} + F_1)) R_1^2 m \cos \theta + \\
&+ (-m g \ell \sin \theta + \omega(-2\ell m v_\ell + k_\omega))(((M R_2^2 + J_2) R_1^2 + R_2^2 J_1) m + \\
&+ J_2 (M R_1^2 + J_1)))/(\ell^2(-J_2 \cos \theta)^2 R_1^2 m + ((M R_2^2 + J_2) R_1^2 + R_2^2 J_1) m + \\
&+ J_2 (M R_1^2 + J_1)) m); \tag{4.27}
\end{aligned}$$

де

$$F_1 = M_{\text{виз}} z_1 / R_1; \quad F_2 = M_{\text{нід}} z_2 / R_2. \tag{4.28}$$

Аналіз рівнянь (4.27) показує, що зусилля приводних двигунів (4.28) входять до кожного з рівнянь, які описують механічну частину електропривода. Це створює передумови для пошуку таких алгоритмів керування, які забезпечують рух візка без або з незначними коливаннями вантажу.

Рівняння (4.27) дозволяють врахувати не лише рух підвішеного вантажу та візка, який його перевозить, але й динаміку приводних двигунів і зусилля тертя, які цей рух супроводжують. Відповідно перехідні процеси при різних режимах роботи показані на рис.4.2 – 4.4.

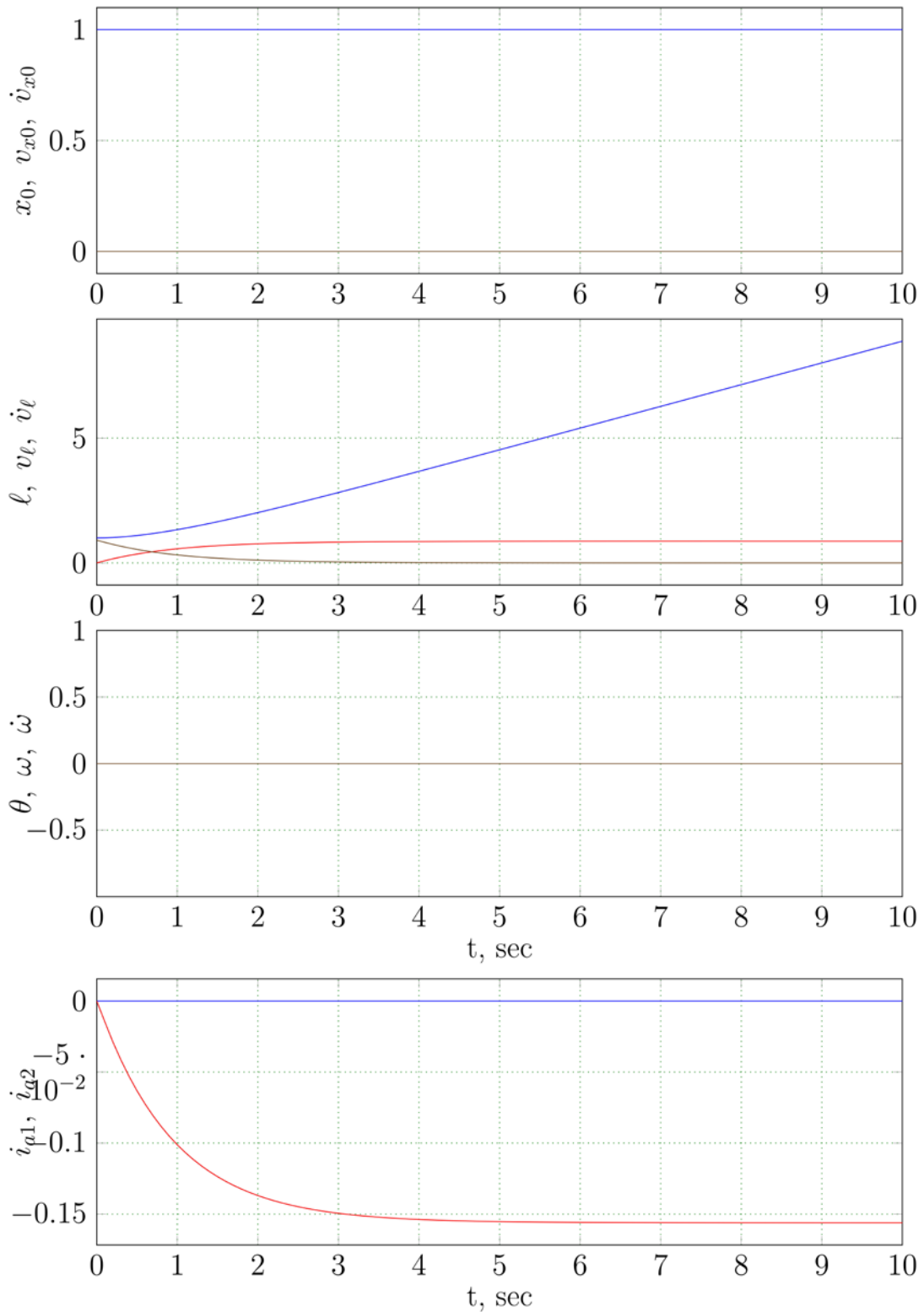


Рисунок 4.2 – Перехідні процеси опускання вантажу без початкового відхилення

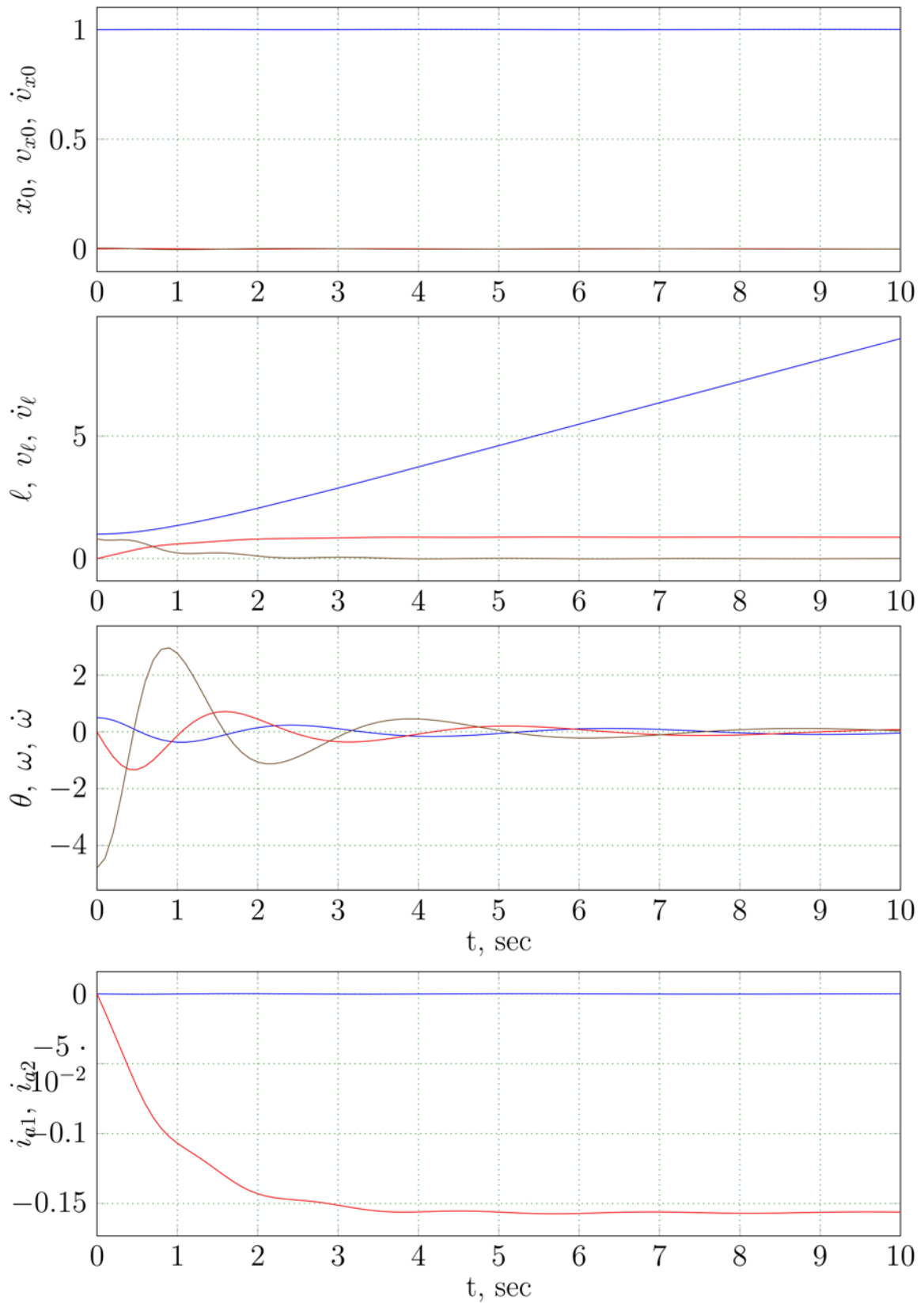


Рисунок 4.3 — Перехідні процеси опускання вантажу з малим початковим відхиленням

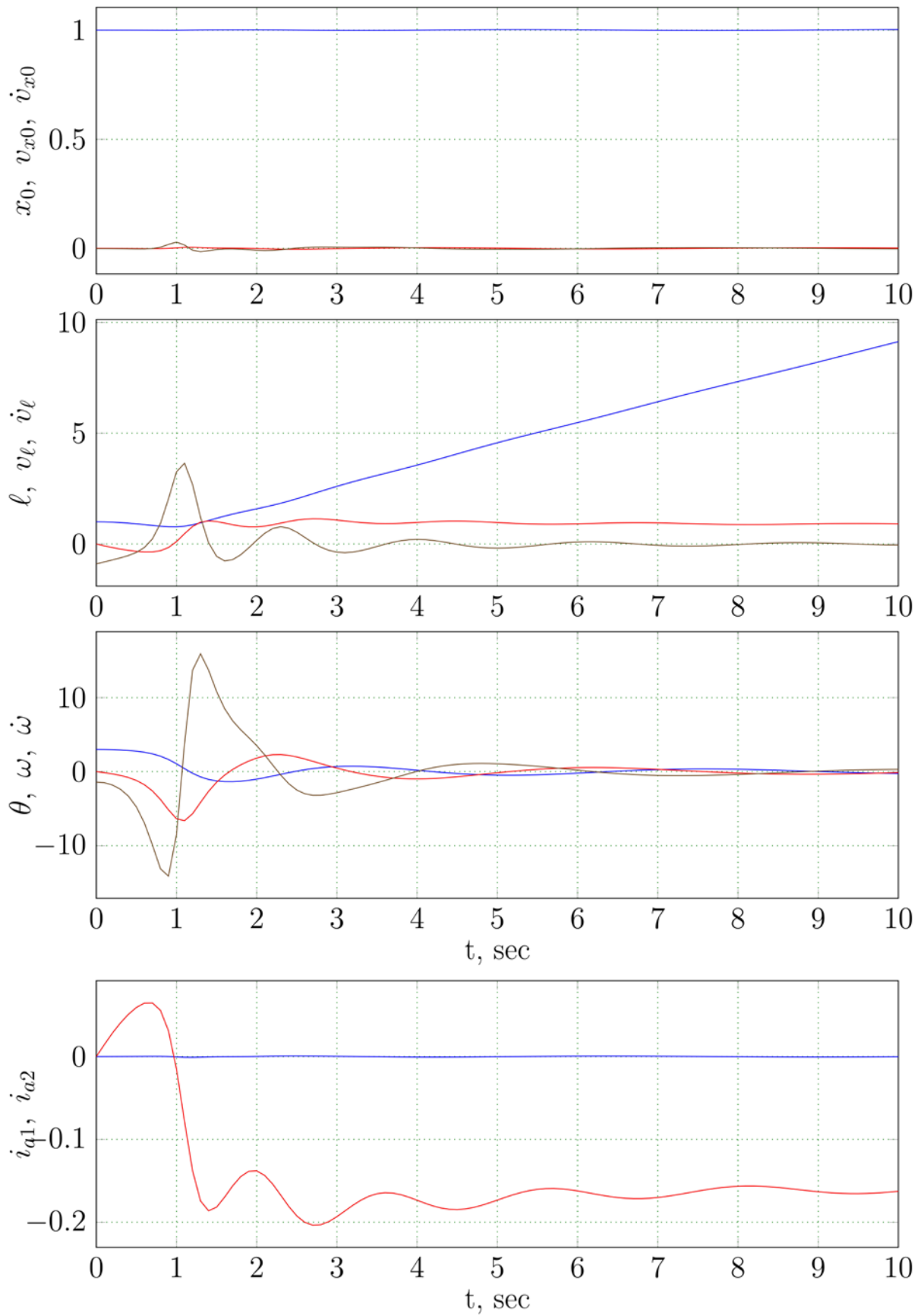


Рисунок 4.4 — Перехідні процеси опускання вантажу з великим початковим відхиленням

Як видно отримані рівняння є найбільш загальними, але досить складними. Спростити ці рівняння можна, якщо ввести поняття приведених мас

$$m' = m + \frac{J_2}{R_2}; \quad M' = M + \frac{J_1}{R_1}, \quad (4.29)$$

які наводять моменти інерції двигунів до вантажу. В цьому випадку рівняння (4.27) приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\ell} &= v_\ell; \\ \dot{v}_\ell &= (-\ell m' (k_\ell v_\ell + F_2) \cos^2 \theta + m' (M' g \ell + \omega k_\omega \sin \theta) \cos \theta + \\ &+ (F_1 - m' (k_x v_{x0}) \sin \theta + M' m' \omega^2 \ell + (k_\ell v_\ell + F_2) (M' + m')) \ell) / (\ell m' M'); \\ \dot{x}_0 &= v_{x0}; \\ \dot{v}_{x0} &= \frac{-\ell (k_\ell v_\ell + F_2) \sin \theta - \cos \theta k_\omega \omega + \ell (k_x v_{x0} + F_1)}{\ell M'}; \\ \dot{\theta} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= (\cos^2 \theta k_\omega m' \omega + ((k_\ell v_\ell + F_2) \sin \theta - k_x v_{x0} - F_1) \ell m' \cos \theta - \\ &- 2M' m' g \ell \sin \theta + 2M' \omega v_\ell \ell m' - M' k_\omega \omega) / (\ell^2 m' M'); \end{aligned} \quad (4.30)$$

Як видно запропоноване приведення мас приблизно у два рази спрощує математичний опис динаміки крану.

Ще більшого спрощення можна досягти, якщо знехтувати тертям в механічній передачі:

$$\begin{aligned} \dot{\ell} &= v_\ell; \\ \dot{v}_\ell &= (\cos^3 \theta g \ell m'^2 + \cos^2 \theta \ell^2 m'^2 \omega^2 + m' M' g \ell \cos \theta + \\ &+ (-F_1 \sin \theta m' + M' \ell m' \omega^2 + F_2 (M' + m')) \ell) / (\ell m' (\cos^2 \theta m' + M')); \\ \dot{x}_0 &= v_{x0}; \\ \dot{v}_{x0} &= \frac{F_1 - F_2 \sin \theta}{\cos^2 \theta m' + M'}; \\ \dot{\theta} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= \frac{-m' g \ell \sin \theta - 2\ell m' \omega v_\ell}{\ell^2 m'}; \end{aligned} \quad (4.31)$$

На рис.4.5 – 4.8 наведені перехідні процеси в системі без тертя.

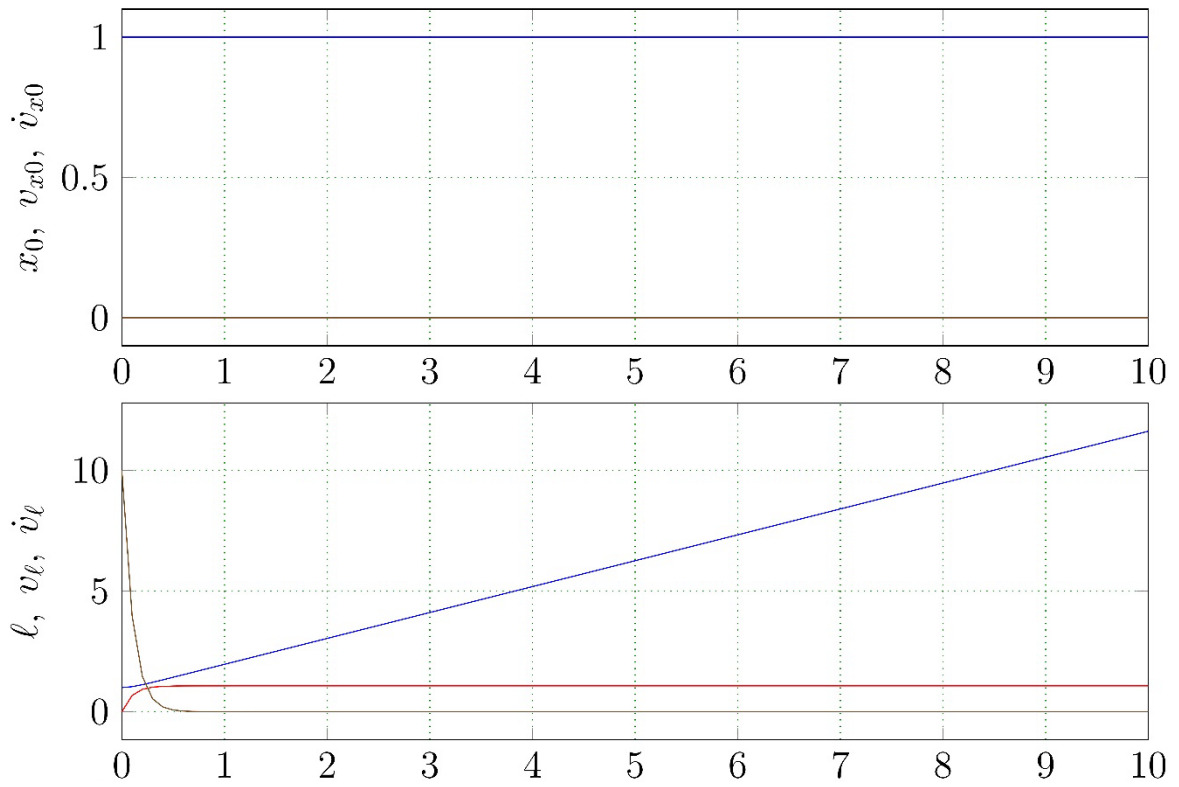


Рисунок 4.5 — Перехідні процеси опускання вантажу без початкового відхилення

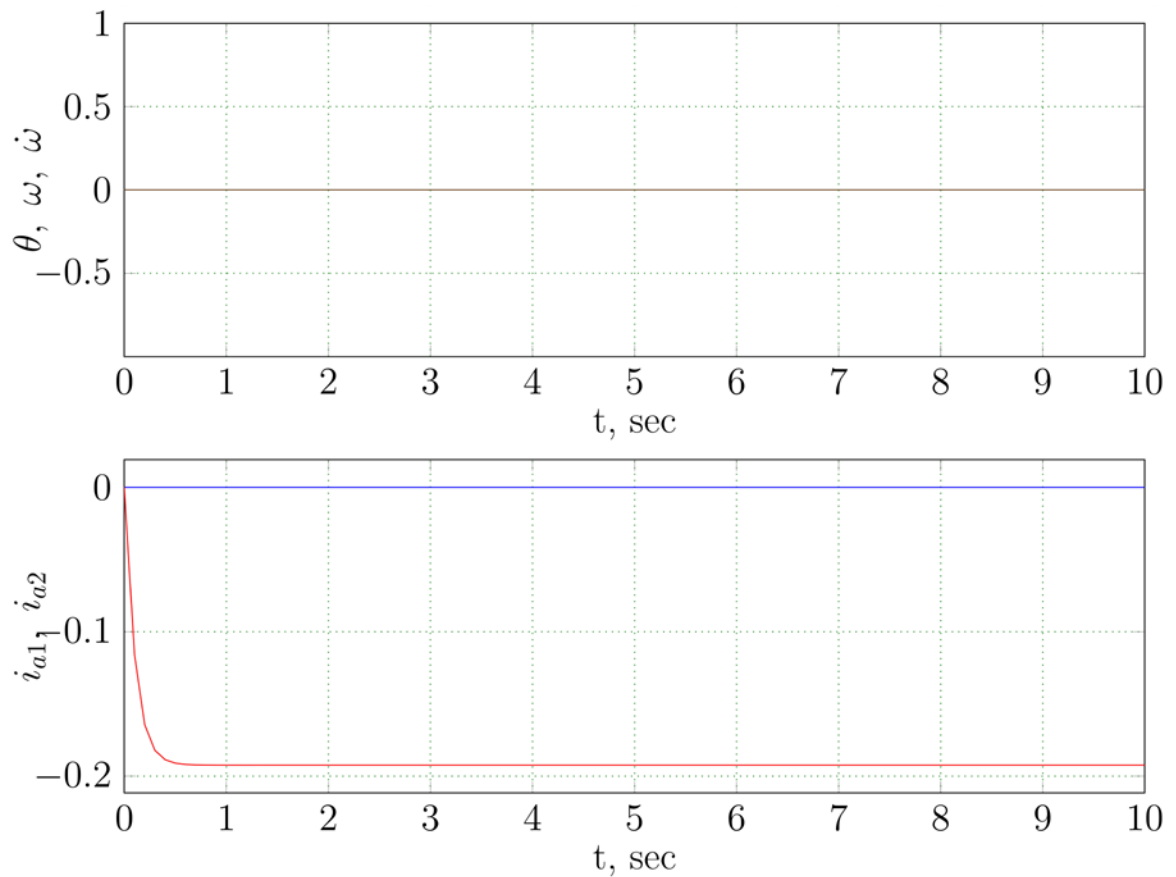


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси опускання вантажу без початкового відхилення

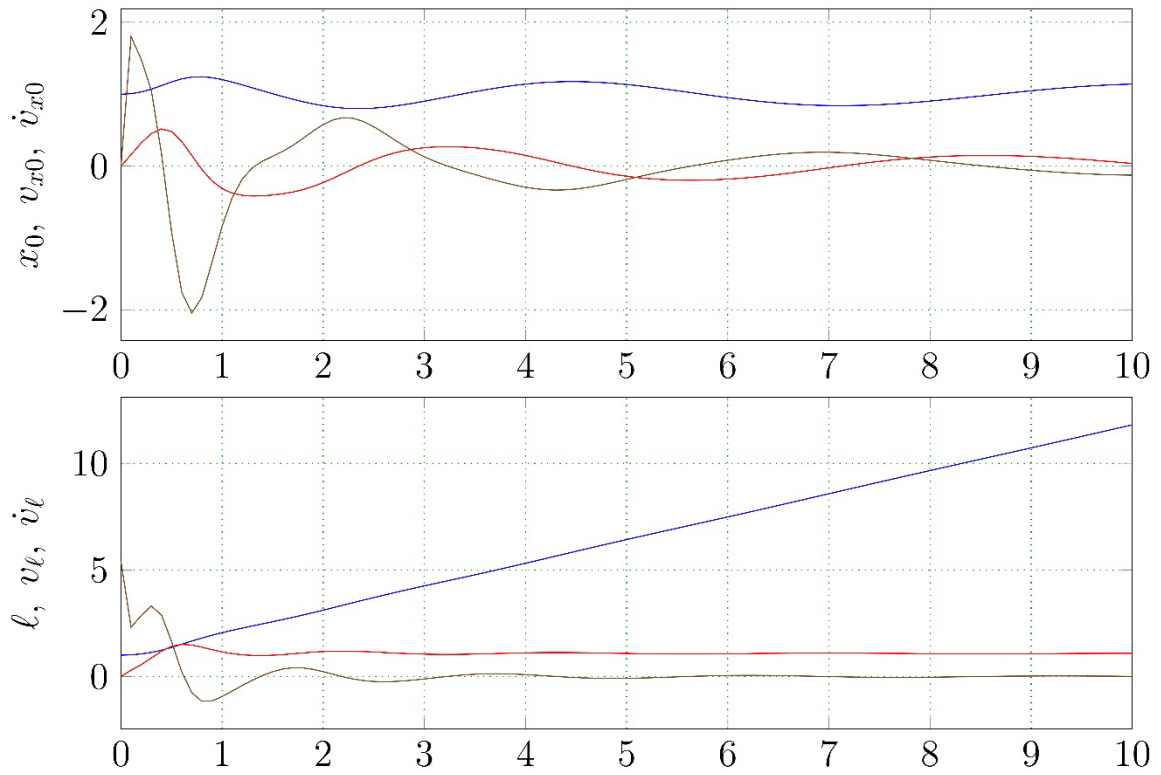


Рисунок 4.7 — Перехідні процеси опускання вантажу з малим початковим відхиленням

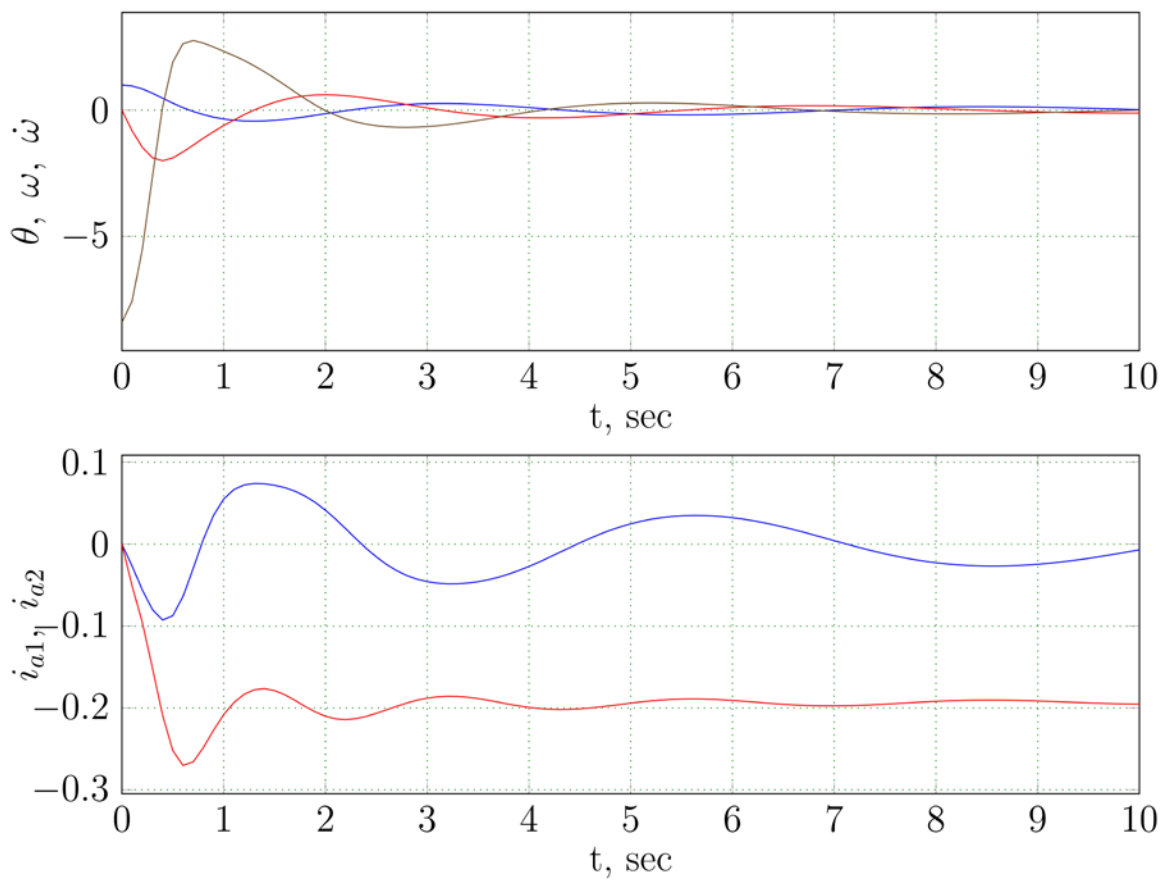


Рисунок 4.8 — Перехідні процеси опускання вантажу з малим початковим відхиленням

Як видно за відсутності тертя будь-який рух вантажу впливає на рухи усіх елементів системи. Очевидно, що у цьому випадку керувати системою набагато складніше, оскільки необхідно передбачити розсіювання надлишкової енергії. Проте загальний вигляд перехідних процесів залишається незмінним.

Наведені рівняння дозволяють враховувати одночасний рух візка та підйому чи опускання вантажу, якщо знехтувати підйомом вантажу то рівняння (4.31) можна спростити до (4.32).

$$\begin{aligned}
 \square & x_0 = v_{x0}; \\
 \square & \dot{v}_{x0} = \frac{F_1}{\cos^2 \theta m' + M'}; \\
 \square & \dot{\theta} = \omega; \\
 \square & \dot{\omega} = -\frac{F_1 \cos \theta}{(\cos^2 \theta m' + M') \cdot \ell} - \frac{g \sin \theta}{\ell}.
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

4.1.3 Математична модель АД у ортогональних координатах

Схема елементарної узагальненої двофазної машини зображена на рисунку 4.9.

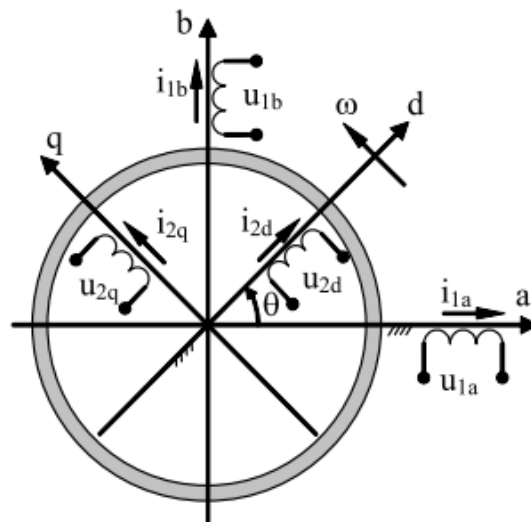


Рисунок 4.9 – Схема елементарної узагальненої двофазної машини
Рівняння електричної рівноваги відносно векторів статора і ротора:

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt}; \\ \vec{U}_2 &= R_2 \vec{i}_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\psi}_2.\end{aligned}\quad (4.33)$$

Рівняння потокозчеплень АД записуються:

$$\begin{aligned}\vec{\psi}_1 &= L_1 \vec{i}_1 + L_m \vec{i}_2; \\ \vec{\psi}_2 &= L_2 \vec{i}_2 + L_m \vec{i}_1.\end{aligned}\quad (4.34)$$

Виразимо струм \vec{i}_2 :

$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2}.\quad (4.35)$$

Значення \vec{i}_2 підставимо в вираз для \vec{U}_2 :

$$\vec{U}_2 = R_2 \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\psi}_2.\quad (4.36)$$

Звідки виразимо $\frac{d\vec{\psi}_2}{dt}$:

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \vec{\psi}_2 + J\omega p_n \vec{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2} \vec{i}_1 + \vec{U}_2.\quad (4.37)$$

Підставимо \vec{i}_2 в рівняння для $\vec{\psi}_1$:

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \left(\frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} \right) = \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2 = \left[\begin{array}{c} \text{Заміна} \\ \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \end{array} \right] = \sigma \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2.\quad (4.38)$$

Підставимо $\overrightarrow{\psi}_1$ в вираз для \overrightarrow{U}_1 :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{U}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + \frac{d}{dt} \left(\sigma \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \overrightarrow{\psi}_2 \right); \\ \overrightarrow{U}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + \sigma \frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{L_m}{L_2} \frac{d\overrightarrow{\psi}_2}{dt}.\end{aligned}\quad (4.39)$$

Виразимо $\frac{d\vec{i}_1}{dt}$ та підставимо:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{i}_1}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \vec{i}_1 - \frac{L_m}{\sigma L_2} \frac{d\overrightarrow{\psi}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma} \overrightarrow{U}_1; \\ \frac{d\vec{i}_1}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \vec{i}_1 - \frac{L_m}{\sigma L_2} - \frac{1}{\sigma} \left(-\frac{R_2}{L_2} \overrightarrow{\psi}_2 + J\omega p_n \overrightarrow{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2} \vec{i}_1 + \overrightarrow{U}_2 \right) + \frac{1}{\sigma} \overrightarrow{U}_1.\end{aligned}\quad (4.40)$$

Введемо заміну $\alpha = \frac{R_2}{L_2}, \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta$:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{i}_1}{dt} &= -\gamma \vec{i}_1 + \alpha \beta \overrightarrow{\psi}_2 - \beta J\omega p_n \overrightarrow{\psi}_2 - \beta \overrightarrow{U}_2 + \frac{\overrightarrow{U}_1}{\sigma}; \\ \frac{d\overrightarrow{\psi}_2}{dt} &= -\alpha \overrightarrow{\psi}_2 + J\omega p_n \overrightarrow{\psi}_2 + \alpha L_m \vec{i}_1 + \overrightarrow{U}_2.\end{aligned}\quad (4.41)$$

Приведемо до скалярного вигляду:

$$\begin{aligned}\frac{di_{1a}}{dt} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} - \beta U_{2a} + \frac{U_{1a}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega p_n \psi_{2a} - \beta U_{2b} + \frac{U_{1b}}{\sigma}; \\ \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} + U_{2a}; \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} + U_{2b}.\end{aligned}\quad (4.42)$$

Знайдемо вираз для моменту на валу двигуна:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3}{2} p_n L_m \vec{i}_1^T J \vec{i}_2 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \vec{i}_1^T J (\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1) = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (i_{1a} \ i_{1b}) \begin{bmatrix} L_m i_{1b} - \psi_{2b} \\ \psi_{2a} - L_m i_{1a} \end{bmatrix} = \\
 &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) = \begin{bmatrix} \text{Заміна:} \\ \mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2} \end{bmatrix} = \mu_1 p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}).
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

Динамічна модель АД с КЗ ротором має вигляд :

$$\begin{aligned}
 \omega &= \left[\mu_1 p_n (\Psi_{2a} i_{1b} - \Psi_{2b} i_{1a}) - M_c \right] / J; \\
 \frac{di_{1a}}{dt} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma}; \\
 \frac{di_{1b}}{dt} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega p_n \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}; \\
 \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}; \\
 \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}.
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta; \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}; \quad \mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2};$$

ω – кутова швидкість;

i_{1a}, i_{1b} – компоненти вектора струму статора;

ψ_{2a}, ψ_{2b} – компоненти вектора потокозчеплення ротора;

U_{1a}, U_{1b} – компоненти вектора напруги статора;

M_c – статичний момент навантаження;

R_1, R_2 – активний опір статора і ротора;

L_1, L_2 – індуктивності обмоток статора і ротора;

L_m – індуктивності магнітного контуру;

p_n – число пар полюсів;

$M = \mu_1 p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a})$ – момент на валу двигуна.

4.1.4 Математична модель підйомно-кранової електромеханічної системи

Доповнимо рівняння механічної частини крану (4.31) рівняннями які описують канали формування електромагнітного моменту АД механізмів візка та підйому.

$$\square \quad \ell = \nu_\ell;$$

$$\square \quad \nu_\ell = (\cos \theta^3 g \ell m'^2 + \cos \theta^2 \ell^2 m'^2 \omega^2 + m' M' g \ell \cos \theta + (-\mu_1 p_n (\psi_{2a(\epsilon i3)} i_{1b(\epsilon i3)} - \psi_{2b(\epsilon i3)} i_{1a(\epsilon i3)}) \cdot z_1 / R_1) \sin \theta m' + M' \ell m' \omega^2 + (\mu_1 p_n (\psi_{2a(ni\delta)} i_{1b(ni\delta)} - \psi_{2b(ni\delta)} i_{1a(ni\delta)}) \cdot z_2 / R_2) \cdot (M' + m') \ell) / (\ell m' (\cos \theta^2 m' + M'));$$

$$\square \quad x_0 = \nu_{x0};$$

$$\square \quad \nu_{x0} = \frac{(\mu_1 p_n (\psi_{2a(\epsilon i3)} i_{1b(\epsilon i3)} - \psi_{2b(\epsilon i3)} i_{1a(\epsilon i3)}) \cdot z_1 / R_1) \sin \theta}{\cos \theta^2 m' + M'} - \frac{(\mu_1 p_n (\psi_{2a(ni\delta)} i_{1b(ni\delta)} - \psi_{2b(ni\delta)} i_{1a(ni\delta)}) \cdot z_2 / R_2) \sin \theta}{\cos \theta^2 m' + M'};$$

$$\square \quad \theta = \omega;$$

$$\square \quad \omega = \frac{m' g \ell \sin \theta - 2 \ell m' \omega \nu_\ell}{\ell^2 m'}.$$

$$\frac{di_{1a(\epsilon i3)}}{dt} = -\gamma i_{1a(\epsilon i3)} + \alpha \beta \psi_{2a(\epsilon i3)} + \beta \cdot (\nu_{x0} / R_1 \cdot z_1) \cdot p_n \psi_{2b(\epsilon i3)} + \frac{U_{1a(\epsilon i3)}}{\sigma};$$

$$\frac{di_{1b(\epsilon i3)}}{dt} = -\gamma i_{1b(\epsilon i3)} + \alpha \beta \psi_{2b(\epsilon i3)} - \beta \cdot (\nu_{x0} / R_1 \cdot z_1) \cdot p_n \psi_{2a(\epsilon i3)} + \frac{U_{1b(\epsilon i3)}}{\sigma};$$

$$\frac{d\psi_{2a(\epsilon i3)}}{dt} = -\alpha \psi_{2a(\epsilon i3)} - (\nu_{x0} / R_1 \cdot z_1) \cdot p_n \psi_{2b(\epsilon i3)} + \alpha L_m i_{1a(\epsilon i3)};$$

$$\frac{d\psi_{2b(\epsilon i3)}}{dt} = -\alpha \psi_{2b(\epsilon i3)} + (\nu_{x0} / R_1 \cdot z_1) \cdot p_n \psi_{2a(\epsilon i3)} + \alpha L_m i_{1b(\epsilon i3)};$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{1a(ni\delta)}}{dt} &= -\gamma i_{1a(ni\delta)} + \alpha\beta\psi_{2a(ni\delta)} + \beta \cdot (v_\ell / R_2 \cdot z_2) \cdot p_n \psi_{2b(ni\delta)} + \frac{U_{1a(ni\delta)}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1b(ni\delta)}}{dt} &= -\gamma i_{1b(ni\delta)} + \alpha\beta\psi_{2b(ni\delta)} - \beta \cdot (v_\ell / R_2 \cdot z_2) \cdot p_n \psi_{2a(ni\delta)} + \frac{U_{1b(ni\delta)}}{\sigma}; \\ \frac{d\psi_{2a(ni\delta)}}{dt} &= -\alpha\psi_{2a(ni\delta)} - (v_\ell / R_2 \cdot z_2) \cdot p_n \psi_{2b(ni\delta)} + \alpha L_m i_{1a(ni\delta)}; \\ \frac{d\psi_{2b(ni\delta)}}{dt} &= -\alpha\psi_{2b(ni\delta)} + (v_\ell / R_2 \cdot z_2) \cdot p_n \psi_{2a(ni\delta)} + \alpha L_m i_{1b(ni\delta)}. \end{aligned} \quad (4.45)$$

1.2 Розробка структурної схеми математичної моделі

Структурна схема математичної моделі підйомно-кранової електромеханічної системи яка складена за рівняннями (4.45) зображена на рисунку 4.10.

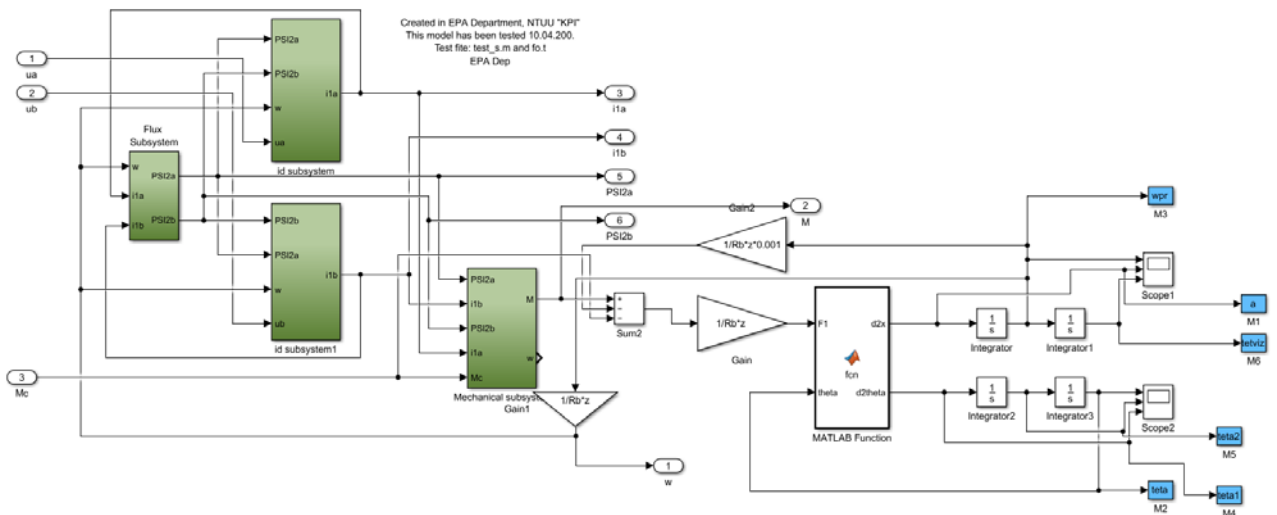


Рисунок 4.10 – Структурна схема математичної моделі підйомно-кранової електромеханічної системи

1.3 Дослідження підйомно-кранової електромеханічної системи

За результатами моделювання було отримано наступні графіки перехідних процесів. На рисунку 4.11 – 4.12 зображені графіки перехідних процесів без використання системи компенсації коливань вантажу. На рисунку 4.13 – 4.15 зображені графіки перехідних процесів з використання системи компенсації коливань вантажу.

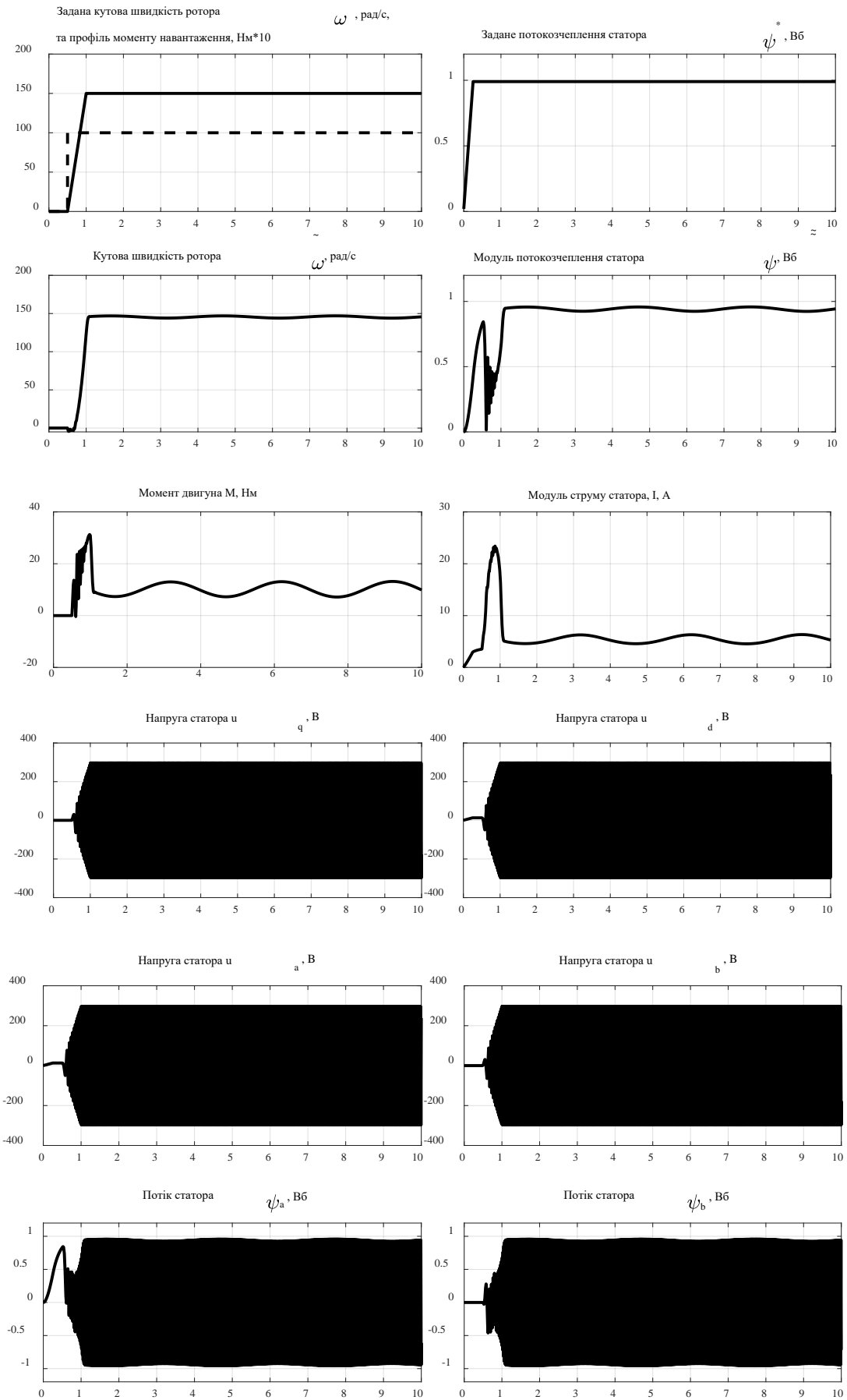


Рисунок 4.11 – Графіки перехідних процесів АД без використання системи компенсації коливань вантажу

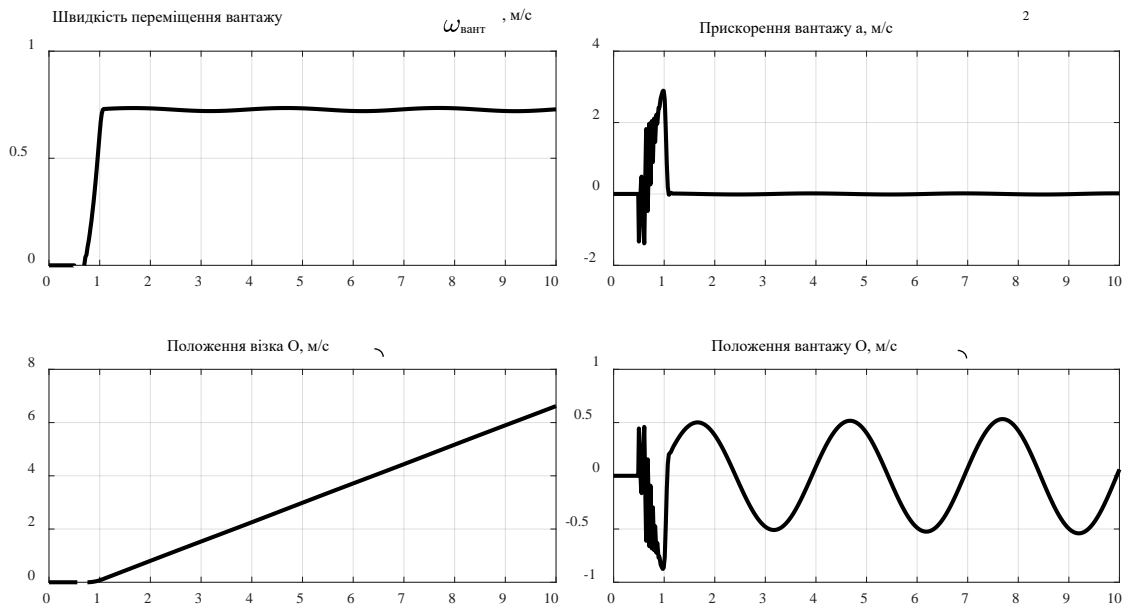


Рисунок 4.12 – Графіки перехідних процесів механічної частини візка без використання системи компенсації коливань вантажу

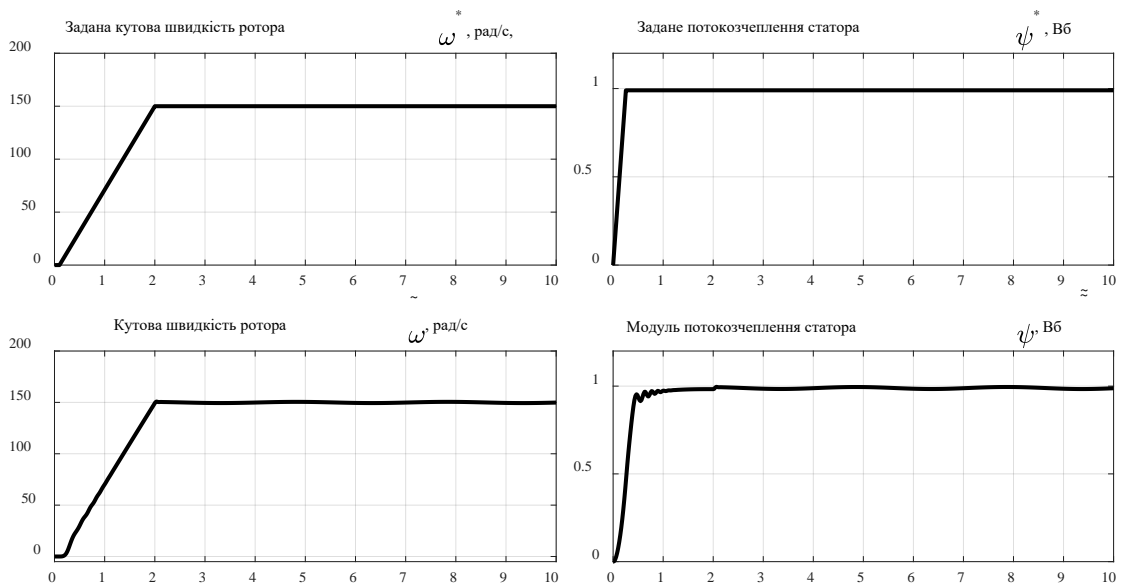


Рисунок 4.13 – Графіки перехідних процесів АД з використання системи компенсації коливань вантажу

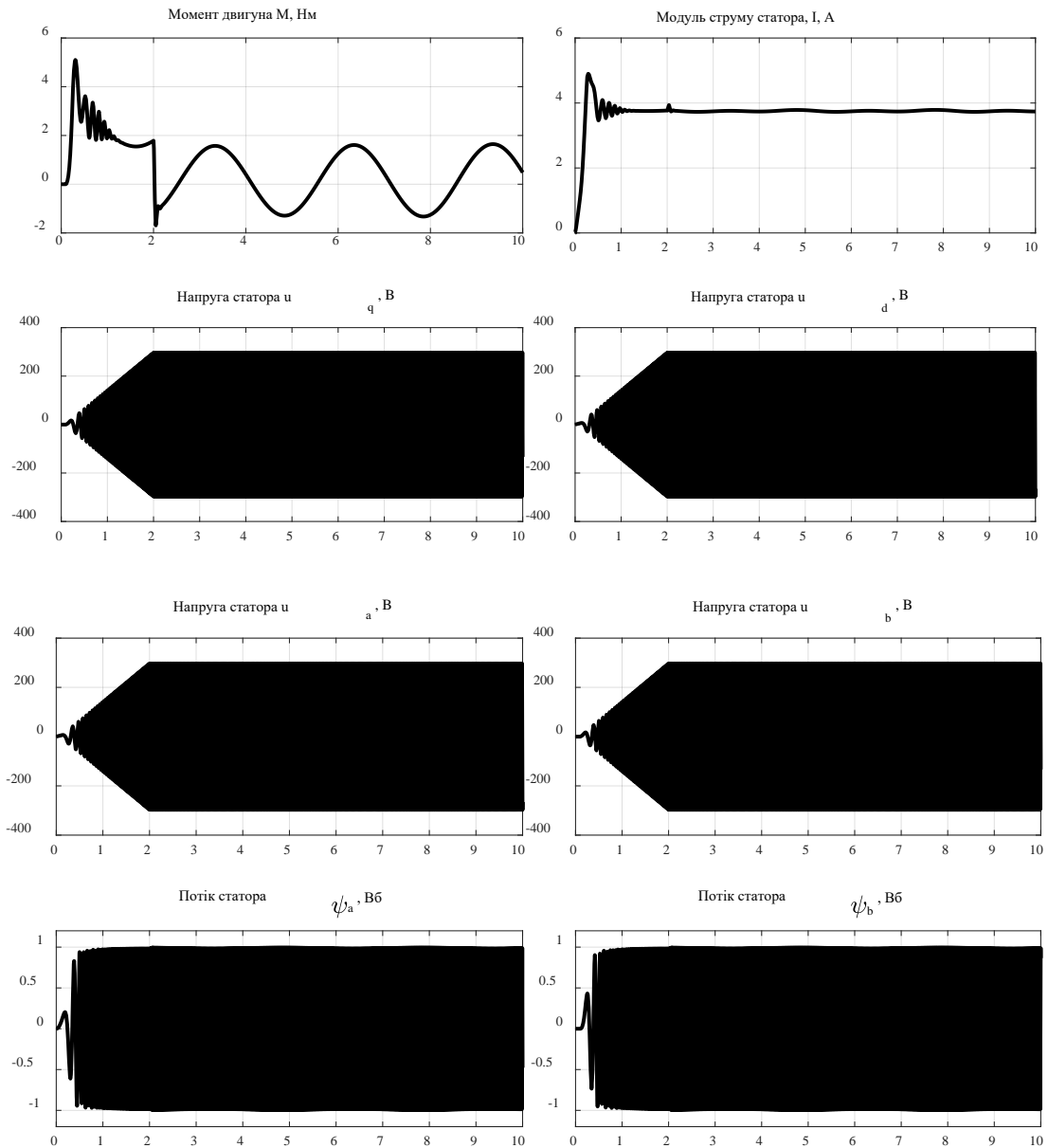


Рисунок 4.14 – Графіки перехідних процесів АД з використання системи компенсації коливань вантажу

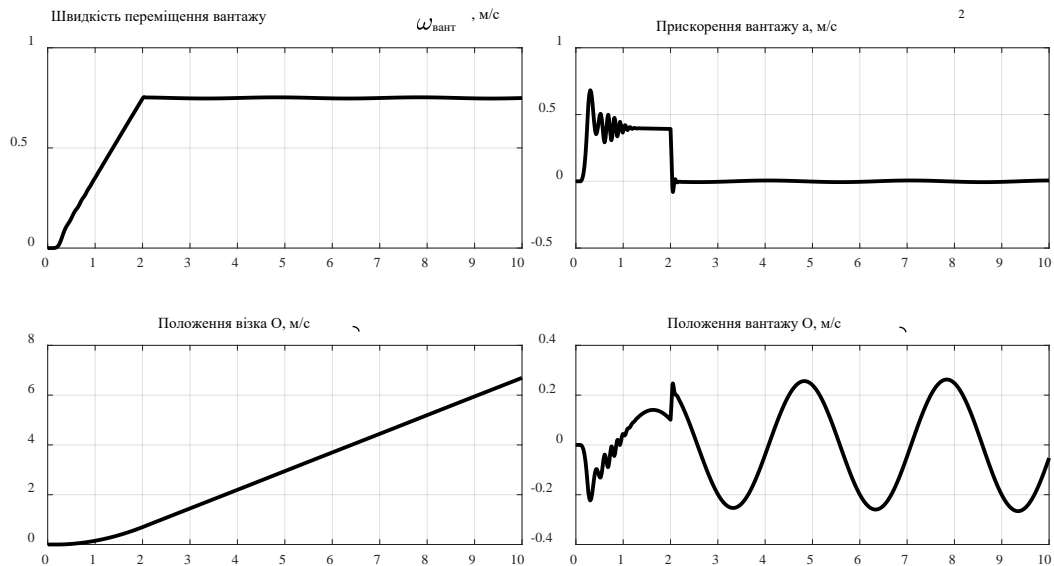


Рисунок 4.15 – Графіки перехідних процесів механічної частини візка з використання системи компенсації коливань вантажу

4.4 Висновок за розділом

В даному розділі було розроблено математичну модель підйомно-кранової електромеханічної системи, та її структурну схему. За допомогою Matlab, Simulink зроблено моделювання підйомно-кранової електромеханічної системи та отримано графіки перехідних процесів. З отриманих графіків видно, що при використанні системи компенсації коливань вантажу в порівнянні зі звичайним керуванням, величина коливань в два рази зменшується, це забезпечується шляхом збільшення часу розгону. Таким чином система компенсації коливань відслідковує довжину троса і відповідно до цього формує завдання швидкості з різними значеннями часу розгону та гальмування, забезпечуючи мінімальний кут коливань.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Етапи розроблення стартап-проекту

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

2. Організація стартап-проекту

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;

- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

4. Заходи з комерціалізації проекту

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту.

5.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1 – Ідея стартап-проекту

Ідея	Напрямки	Вигоди
Зміст: розробка автоматизованої системи компенсації коливань вантажу для застосування її у підйомних кранах. Використання розробленої системи вирішить проблему коливання вантажу під час руху крана.	- Кранове господарство	Впровадження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань знизиться ризик аварій і підвищиться швидкість а також надійність роботи крана

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів				W Слабка сторона	N Нейтральна сторона	S Сильна сторона
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Продуктивність роботи крана	0,94	0,93	0,91	0,90			+
2	Можливість використання в інших галузях	Ні	Ні	Ні	Ні		+	
3	Можливість легко масштабувати для різного типу вантажопідіймального обладнання	Так	Ні	Так	Ні		+	

5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність проєкту

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Використання автоматизованої системи компенсації коливань в крановому господарстві для зниження ризику аварій, підвищення надійності, швидкості та продуктивності роботи крана. Питання безпеки та продуктивності є завжди актуальним.	Аналіз Розробка Впровадження	Перетворювачі частоти, програмовані логічні контролери.	Легкодоступна

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту

Аналіз потенційного ринку наведено в таблиці 5.4, а характеристика потенційних клієнтів в таблиці 5.5.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап проєкту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідність стартового капіталу
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	27%

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартапу

№	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Морально та фізично застаріле кранове обладнання потребує сучасних новітніх розробок та модернізації.	Народне господарство для внутрішньоцехових і внутрішньоскладських вантажно-розвантажувальних робіт.	Актуальний у будь яких умовах	<ul style="list-style-type: none"> - Продуктивність - Економічність - Надійність - Гарантійне та післягарантійне обслуговування

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкуренція	У майбутньому з розвитком технологій можлива поява більш сучасного та технологічнішого продукту.	Патентування та ліцензування

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Зниження ризику аварій	Усунення коливань вантажу при роботі крана збільшує безпеку персоналу, та надійність механічних частин крана.	Рекламна компанія та залучення інвестицій
Збільшення продуктивності роботи крана	Збільшення продуктивності роботи крана призведе до покращення економічних показників окремих цехів.	Рекламна компанія та залучення інвестицій

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможними)
Тип конкуренції: Чиста	Обирають товар за співвідношенням ціна-якість	Модернізація товару
За рівнем конкурентної боротьби: світова	Вузька сфера попиту	Розширення функціональних можливостей
За галузевою ознакою: міжгалузєва	Можливе застосування у галузях кранового господарства.	Можливість застосування вискоєфективних автоматизованих систем у галузях кранового господарства
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Виділяється високою економічністю та ефективністю та низькими затратами на виробництво	Структурна оптимізація та ефективне покращення.
За характером конкурентних переваг:	Визначається співвідношенням ціни – якості та собівартості продукції	Зниження енергозатратності, оптимізація собівартості, приваблива цінова політика.
За інтенсивністю: не марочна	Помірна конкуренція	Політика маркетингових ходів та різних видів піару.

Таблиця 5.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Ціна	Ідентичні характеристики призводять до купівлі продукції з меншою ціною
Якість	Приблизно однаковий ціновий діапазон продукції призводить до купівлі продукту з кращими якісними оцінками
Впізнаваність торгової марки	Серед продукції однакової ціни та якості обиратиметься більш розрекламований товар

Таблиця 5.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «MD»

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з MD						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна						+		
Якість								+
Впізнаваність		+						

Таблиця 5.11 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Забезпечення компенсації коливань у всьому робочому циклі крана. Застосування сучасних перетворювачі частоти та програмованих логічних контролерів.	Слабкі сторони: Мала впізнаваність бренду Низький рівень інвестицій
Можливості: Удосконалення системи компенсації коливань з використанням сучасних технологій	Загрози: Збільшення конкуренції у даній сфері

5.4 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.12 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є першопрохідцем на ринку ?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів ?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які ?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Забирати у конкурентів а також шукати нових	Так, після придбання відповідних ліцензій та повної сертифікації	Чесна конкуренція

Таблиця 5.13 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Модернізація крану одного із цехів підприємства	Висока продуктивність та низька вартість обслуговування.	Висока стабільність роботи, низькі витрати на обслуговування та ремонт, онлайн підтримка.

Таблиця 5.14 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Ціни власного продукту становить 95% від середньої ринкової вартості	120%	Від 1млн грн	131000 - 152000 грн

Таблиця 5.15 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Державні закупівні за оптовими цінами	Продаж та обслуговування	Усі можливі канали	Власна

5.5 Висновок за розділом

В даному розділі було зроблено опис та технологічний аудит ідеї проекту, проаналізовано ринкові можливості запуску стартап проекту, розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Проведені дослідження ринку та умов збуту щодо перспектив можливостей та реалізації маркетингу показали досить високі перспективи можливого впровадження розробленої системи компенсації коливань на комерційній основі в один із цехів підприємства.

ВИСНОВКИ

З аналітичного огляду встановлено існуючі системи компенсації коливань вантажу вантажопідійомних кранів, їх переваги та недоліки, за результатами аналізу виявилось, що тема розробки автоматизованої системи компенсації коливань вантажу у підійомних кранах є актуальною.

Для впровадження системи автоматизації було здійснено розрахунок потужності двигуна пересування візка та здійснено його перевірку за нагрівом та перевантажувальною здатністю. Розроблено схемо-технічні рішення та вибрано необхідне обладнання для реалізації системи компенсації коливань вантажу.

Для порівняльного аналізу та перевірки запропонованих технічних рішень створено математичні моделі в програмному середовищі Matlab, Simulink. З отриманих досліджень переконались, що при використанні системи компенсації коливань вантажу в порівнянні зі звичайним частотним керуванням, величина коливань вантажу зменшується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вантажопідіймальні крани. URL: <http://um.co.ua/11/11-6/11-69054.html> (дата звернення: 14.09.2022).
2. Крани підвісного типу. URL: <https://kzpto.com.ua/uk/pidvisni-krani/> (дата звернення: 01.10.2022).
3. Крани опорного типу. URL: <https://kzpto.com.ua/uk/oporni-krani/> (дата звернення: 01.10.2022).
4. David Morin (2008). Introduction to Classical Mechanics. Cambridge University Press.
5. M.A. Ahmad (2009). Sway Reduction on Gantry Crane System using Delayed Feedback Signal and PD-type Fuzzy Logic Controller: A Comparative Assessment. Proceedings of World Academy of Science, Engineering And Technology Volume 38 February 2009.
6. Y. S. Kim, K. S. Hong and S. K. Sul (2004). Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclinometer, Observer, and State Feedback. International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.2.
7. G. Bartonlini, A. Pisano and E. Usai (2002). Second-order sliding-mode control of container cranes. Automatica, Vol. 38.
8. Kim, Y.S., Yoshihara, H., Fujioka, N., Kasahara, H., Shim, H. and Sul, S.K (2003). A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes. Industry Applications Conference, Vol. 1.
9. Neil Singer, William Singhose and Eric Kriekku(1997) . An Input Shaping Controller Enabling Cranes to Move without Sway. American Nuclear Society 7th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems.
10. Ki-Ru Park and Dong-Soo Kwon (2010). Swing-Free Control of Mobile Harbor Crane with Accelerometer Feedback. International Conference on Control, Automation and Systems 2010.
11. Rajeeb Dey, Nishant Sinha, Priyanka Chaubey, S. Ghosh and G. Ray (2010). Active Sway Control of a Single Pendulum Gantry Crane System using

- Output-Delayed Feedback Control Technique. 2010 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision.
12. Kitichoke Prommaneevat, Prapas Roengruen and Viriya Kongratana (2007). Anti-sway Control for Overhead Crane. International Conference on Control, Automation and Systems.
 13. Hideki Kawai, Young Bok Kim and Yong Woon Choi (2009). Anti-sway system with image sensor for container cranes. Journal of Mechanical Science and Technology 23.
 14. Радимов, С. Н. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод : учеб. пособие / С. Н. Радимов ; Одесский национальный политехнический университет. – Одесса : Авторизованный учебный центр компании «Шнайдер электрик», 2007.
 15. Выпуск № 12, Проектирование электроприводов крановых механизмов : «Schneider Electric», 2009.
 16. Altivar Process ATV900. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=ATV900_Catalog.pdf&p_Doc_Ref=DIA2ED2150601RU&_ga=2.50393057.930890579.1664640226-1183184778.1664640226 (дата звернення: 01.10.2022).
 17. Перетворювач частоти ATV930U55N4. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/ATV930U55N4/%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8-atv930-5-5-%D0%BA%D0%B2%D1%82/> (дата звернення: 22.10.2022).
 18. Програмований логічний контролер TM241CEC24T. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/TM241CEC24T/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9->

[%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%80-m241-24-%D0%B2%D1%85-](#)

[%D0%B2%D0%B8%D1%85-](#)

[%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B7-2rs485-1eth-can/](#) (дата звернення: 22.10.2022).

19. Модуль дискретних входів TM3DI16K. URL:

[https://www.se.com/ua/uk/product/TM3DI16K/%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C-tm3-16-%D0%B2%D1%85-24%D0%B2-he10/](#) (дата звернення: 22.10.2022).

20. Блок живлення ABLS1A24050. URL:

[https://www.se.com/ua/uk/product/ABLS1A24050/%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA-](#)

[%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-](#)

[%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BC%D1%96%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9-1%D1%84-](#)

[24%D0%B2-5a/](#) (дата звернення: 22.10.2022).

21. Кінцевий вимикач XCRK111. URL:

[https://www.se.com/vn/en/product/XCRK111/limit-switch-limit-switches-xc-standard-rotary-head-rods-lever-square-rod-6-mm/](#) (дата звернення:

22.10.2022).

22. Пульт ручного керування XAL-B3-6913. [https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/telferni_posti_serii_xal_b3/19105/](#) (дата звернення:

22.10.2022).

23. Перетворювач частоти ATV930D30N4. URL:

[https://www.se.com/ua/uk/product/ATV930D30N4/%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87-](#)

[%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B8-](#)

[atv930-30-%D0%BA%D0%B2%D1%82/](#) (дата звернення: 22.10.2022).

24. Кінцевий вимикач КИ-Г1. URL: <https://flagma.ua/uk/vyklyuchatel-koncevoy-tip-ki-g1-bds-8708-76-o11212852.html> (дата звернення: 22.10.2022).
25. Обмежувач вантажопідіймання DSET01. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/nbc-elettronica-group-srl/product-86077-1539923.html> (дата звернення: 22.10.2022).
26. Енкодер RI 76TD 1024. URL: https://peko.com.ua/index.php?route=product/product&path=185_6620&product_id=222360 (дата звернення: 22.10.2022).
27. Автоматичний вимикач захисту двигуна GV3P50. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/GV3P50/%D0%B0%D0%B2%D1%82-%D0%B2%D0%B8%D0%BC-%D0%B7-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B1-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%87%D0%B5%D0%BF-50%D0%B0-%D0%B3%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D1%82-%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA-/> (дата звернення: 22.10.2022).
28. Автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME16. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/GV2ME16/%D0%B0%D0%B2%D1%82-%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%87-914/> (дата звернення: 22.10.2022).
29. 3P контактор LC1D65AM7. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/LC1D65AM7/3p-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80-440%D0%B2-65a-220%D0%B2-50-60%D0%B3%D1%86/> (дата звернення: 22.10.2022).
30. Автоматичний вимикач A9F75363. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/A9F75363/%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9->

[%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%87-ic60n-3p-63a-d/](#) (дата звернення: 22.10.2022).

31. 3P контактор LC1K0601M7. URL:

<https://www.se.com/ua/uk/product/LC1K0601M7/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80-tesys-k-3p-6a-%D0%BD%D0%B7-220%D0%B2-%D0%B3%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D1%82/>

(дата звернення: 22.10.2022).

32. Гальмівний резистор FELR01.1N-12K5-N018R-A-560. URL:

<https://eleksun.com.ua/r912001649-tormoznoy-rezistor-felr011n-12k5-n018r-560-nnnn-na-18-om125-kvt-bosch-rexroth.html> (дата звернення: 22.10.2022).

33. Гальмівний резистор FELR01.1N-04K5-N055R-A-560. URL:

<https://eleksun.com.ua/r912001628-tormoznoy-rezistor-felr011n-04k5-n055r-560-nnnn-na-55-om45-kvt-bosch-rexroth.html> (дата звернення: 22.10.2022).

ДОДАТОК А – Перелік елементів схеми електричної принципової

Позначення елементів	Найменування	Тип	Кількість	Примітки
1	2	3	4	5
6QF1	Автоматичний вимикач 3P 63A D, Schneider Electric	A9F75363	1	
QF1	Автоматичний вимикач 2P 2A D, Schneider Electric	A9F75202	1	
QF2	Автоматичний вимикач 1P 4A D, Schneider Electric	A9F75104	1	
6KM1	Контактор 3P, 65 А, НО+НЗ, 220В, Schneider Electric	LC1D65AM7	1	
6K1	Реле 24 В постійного струму, АСКО		1	
TV1	Трансформатор 380/220 В, ELTIZ	OCM1-0,16-У3	1	
1QF1, 3QF1	Автоматичний вимикач двигуна з комбінованим розчеплювачем 0.63 – 1 А, Schneider Electric	GV2ME05	2	
1QF2	Автоматичний вимикач двигуна з комбінованим розчеплювачем 37 – 50 А, Schneider Electric	GV3P50	1	
3QF2	Автоматичний вимикач двигуна з комбінованим розчеплювачем 1.6 – 2.5 А, Schneider Electric	GV2ME16	1	
1UZ1	Перетворювач частоти ATV930 55 кВт 380В 3Ф, Schneider Electric	ATV930U55N4	1	
1R1	Гальмівний резистор 12 кВт 18 Ом, Eagtop	FELR01.1N-12K5-N018R-A-560	1	
3UZ1	Перетворювач частоти ATV930 5.5 кВт 380В 3Ф, Schneider Electric	ATV930U55N4	1	
3R1	Гальмівний резистор 4,5 кВт 55 Ом, Bosch Rexroth	FELR01.1N-04K5-N055R-A-560	1	
1KM1, 3KM1	Контактор 3P, 6 А, 1 НЗ, 220В, Schneider Electric	LC1K0601M7	2	
1QF1, 3QF1	Додатковий контакт НР, НЗ, Schneider Electric	GVAE11	2	
FU1, FU2	Запобіжник	5x20мм 0.5А 250В	2	
FU3, FU4, FU5	Запобіжник	5x20мм 0.2А 250В	3	
FU6	Запобіжник	5x20мм 1А 250В	1	
FU7, FU8	Запобіжник	5x20мм 2А 250В	2	
A1	Програмований логічний контролер, Schneider Electric	TM241CEC24T	1	
A2	Модуль дискретних входів, Schneider Electric	TM3DI16	1	
A3	Імпульсний блок живлення 220В/24В, Mean Well	EDR-120-24	1	
3M1	Двигун переміщення талі 3.7 кВт, 11.2 А, 400 В	4MTF(H)112LB6	1	

1	2	3	4	5
3YB1	Електромагнітне гальмо		1	В комплекті з двигуном 3M1
3UZ2	Гальмівний випрямляч		1	В комплекті з двигуном 3M1
1M1	Двигун підйому/опускання 20 кВт, 42 А, 380 – 400 В		1	
1YB1	Електромагнітне гальмо		1	В комплекті з двигуном 1M1
1UZ2	Гальмівний випрямляч		1	В комплекті з двигуном 1M1
1SK1	Термозахитс двигуна		1	В комплекті з двигуном 1M1
3SQ1	Кінцевий вимикач, EMAS	CSM04	1	
1SQ1	Кінцевий вимикач	КИ – Г1 (КИ – Г11)	1	
A4	Енкодер	RI 76TD 1024	1	
A5	Обмежувач вантажу	DSET01 24V	1	
A6	Пульт ручного керування, АСКО	XAL-B3-6913	1	