

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

**Навчально – науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____Сергій БОЙЧЕНКО

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою**

**«Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему: «Електромеханічне обладнання та автоматизація баштового крану»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ОА-21

Бондарчук Олександр

Ігорович

Керівник:

PhD старший викладач Мугенов Д. Д.

Консультант з електричної частини:

к.т.н. доцент Мейта О. В.

Консультант з охорони праці:

к.т.н. доцент Мітюк Л. О.

Рецензент:

Нормоконтролер:

к.т.н. доцент Кулаковський Л. Я.

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

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій БОЙЧЕНКО
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студента
Бондарчука Олександра Ігоровича

1. Тема проєкту «Електромеханічне обладнання та автоматизація баштового крану», керівник проєкту Мугенов Даніїл Джалільович, старший викладач, затверджені наказом по університету від «26» 0.5 2026 р. №1910-С

2. Термін подання студентом проєкту 10.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту: Електропривід механізму підйому баштового крана для монолітного будівництва 20-поверхових будівель.

4. Зміст пояснювальної записки:

- Загальна частина
- Електропостачання
- Математичне моделювання
- Автоматизація
- Охорона праці

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

1 аркуш – Загальний вигляд баштового крана та механізм підйому.

2 аркуш – Схема електропостачання будівельного майданчика.

3 аркуш – Структурна схема імітаційної моделі електроприводу.

4 аркуш – Функціональна схема мікропроцесорної системи автоматизації.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2 Електропостачання	к.т.н. доцент, Мейта О. В.		
4 Охорона праці	к.т.н. доцент, Мітюк Л. О.		

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Розділ 1	10.05-13.05	Виконано
	Розділ 2	13.05-15.05	Виконано
	Розділ 3	15.05-17.05	Виконано
	Розділ 4	17.05-19.05	Виконано

Студент

Олександр БОНДАРЧУК

Керівник

Даніїл МУГЕНОВ

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ОА21.05.000 ПЗ	Пояснювальна записка		
3	A1	ДП ОА21.05.000 СК	Загальна частина	1	
4	A1	ДП ОА21.05.000 СЕ	Електропостачання	1	
5	A1	ДП ОА21.05.000 СМ	Математичне моделювання	1	
6	A1	ДП ОА21.05.000 ПП	Автоматизація	1	

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проєкту	Літ.Літ.		АркушіАркуші
Розроб.	Бондарчук О.							
Перевір.	Мугенов Д. Д.							
Реценз.								
Н. Контр. Н.	Кулаковський Л.							
Затверд.	Бойченко С.					НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21		

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проєкту

на тему:

«Електромеханічне обладнання та автоматизація баштового крану»

Київ – 2026 року

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВ – автоматичний вимикач;
АД – асинхронний двигун;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ГРЩ – головний розподільчий щит;
ЕП – електропривод;
ЕМП – електромагнітні перешкоди;
ЕМС – електромагнітна сумісність;
КЗ – коротке замикання;
КТП – комплектна трансформаторна підстанція;
ЛЕП – лінія електропередачі;
ОВП – обмежувач вантажопідйомності;
ОПП – опорно-поворотний пристрій;
ПЗВ – пристрій захисного відключення;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ПУЕ – Правила улаштування електроустановок;
ПЧ – перетворювач частоти;
РП – розподільчий пункт;
ТВ – відносна тривалість включення;
ЧРЕП – частотно-регульований електропривід;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
FOC – векторне керування (Field Oriented Control) ;
IPM – інтелектуальний силовий модуль (Intelligent Power Module)

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проєкту складається з 5 розділів, пояснювальна записка містить 105 сторінок основного тексту. В основному тексті роботи наведено 18 ілюстрацій та 21 таблиць.

У дипломному проєкті досліджується частотно-регульований електропривід змінного струму механізму підйому вантажу баштового крана середнього класу та комплексна система електропостачання будівельного майданчика.

Метою роботи є розробка та дослідження комплексної електромеханічної системи механізму підйому баштового крана вантажопідйомністю 8 тонн з частотно-регульованим асинхронним електроприводом, мікропроцесорною системою автоматизації та інфраструктурою електропостачання для зниження динамічних навантажень, забезпечення плавності руху та підвищення безпеки експлуатації.

Методи дослідження базуються на положеннях загальної теорії електроприводу, методах координаторних перетворень Кларка та Парка, теорії автоматичного керування із представленням динамічних систем у просторі станів (State-Space), а також на імітаційному комп'ютерному моделюванні в середовищі MATLAB/Simulink.

Ключові слова: *електропривод, автоматизація, електромеханіка, баштовий кран, асинхронний двигун, векторне керування, мікроконтролер, інтелектуальний силовий модуль, математичне моделювання, matlab/simulink, електропостачання, охорона праці.*

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The explanatory note to the graduation project consists of 5 chapters and contains 105 pages of the main text. The main text of the work includes 18 illustrations and 21 tables.

The graduation project investigates a variable-frequency AC electric drive for the hoisting mechanism of a medium-class tower crane and an integrated power supply system for a construction site.

The objective of the thesis is to develop and investigate an integrated electromechanical system for the hoisting mechanism of an 8-ton tower crane, featuring a variable-frequency asynchronous electric drive, a microprocessor-based automation system, and a power supply infrastructure designed to reduce dynamic loads, ensure smooth motion, and enhance operational safety.

Research methods are based on the principles of general electric drive theory, Clarke and Park coordinate transformations, automatic control theory with the representation of dynamic systems in state-space form, as well as simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment.

Keywords: *electric drive, automation, electromechanics, tower crane, induction motor, vector control, microcontroller, intelligent power module, mathematical modeling, matlab/simulink, power supply, occupational safety.*

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	11
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	13
1.1. Загальні відомості про баштові крани, їх історичний розвиток, призначення та детальна класифікація.....	13
1.2. Будова, компонування та основні механізми баштового крана	17
1.3. Вимоги до електроприводів баштових кранів, режими їх роботи та специфіка експлуатації	21
1.4. Аналіз існуючих систем керування електроприводами баштових кранів.....	25
1.5. Обґрунтування та вибір вихідних даних для розрахунку механізму підйому	28
1.6. Розрахунок кінематики, зусиль у механізмі підйому та вибір електродвигуна.....	31
Висновки до першого розділу.....	36
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	38
2.1. Розрахунок освітлення.....	38
2.1.1 Розрахунок освітлення приміщення методом використання світлового потоку	39
2.1.2 Розрахунок прожекторного освітлення.....	41
2.2. Розрахунок електричних навантажень	43
2.3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	46
2.3.1 Основні відомості.....	46
2.3.2 Розрахунок струмів навантаження групи електроприймачів	47
2.3.3 Вибір перетину провідників і жил кабелів за нагрівом	48
2.3.4 Розрахунок електричної мережі за допустимими втратами напруги.....	49
2.3.5. Остаточний вибір перетинів проводів і жил кабелів	52
2.4. Розрахунок струмів КЗ	53
2.4.1 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В.....	54
2.5. ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ	59
2.5.1 Вибір апаратів захисту та комутації на стороні вищої напруги (10 кВ)	59
2.5.2 Вибір пускачів	60
2.5.3 Вибір автоматичних вимикачів.....	61
Висновок по розділу №2.....	63
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	65
3.1. Основні припущення та трифазна математична модель електроприводу.....	65
3.2. Координатні перетворення та двофазна математична модель електродвигуна.....	68
3.3. Математична модель електродвигуна у просторі станів.....	71
3.4. Імітаційне моделювання електроприводу в MATLAB/Simulink та аналіз результатів.....	73

Висновки до розділу 3	77
РОЗДІЛ 4. Автоматизація	79
4.1. Загальна функціональна схема системи автоматизації	79
4.2. Обґрунтування вибору та опис мікропроцесорної платформи STM32F407VG	81
4.3. Вибір силового перетворювача (інвертора) та системи захисту	84
4.4 Елементи зворотного зв'язку (датчики автоматизації)	87
Висновки до розділу 4	89
Розділ 5. Охорона праці	91
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації та обслуговуванні баштового крана	91
5.2. Заходи попередження виникнення небезпечних ситуацій при експлуатації систем автоматизації та електромеханічного обладнання	93
5.3. Умови праці на робочому місці	95
5.4. Заходи з електробезпеки при експлуатації електромеханічного обладнання та систем автоматизації	97
5.5. Пожежна безпека на об'єкті	99
Висновки до розділу 5	101
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	102
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	104

ВСТУП

Сучасне монолітне та багатоповерхове будівництво вимагає використання високоефективних, безпечних та надійних підйомно-транспортних машин. Баштові крани є основною ланкою будівельного процесу, де найбільш відповідальним та енергоємним вузлом виступає механізм підйому вантажу. Традиційні системи керування, що використовують прямий пуск або реостатне регулювання, є енергозатратними та створюють небезпечні динамічні удари, які призводять до зносу металоконструкцій і розгойдування вантажу. Тому перехід до сучасних систем автоматизації на базі частотно-регульованого електроприводу з векторним керуванням (FOC) та мікропроцесорної техніки є **актуальним** завданням. Це дозволяє суттєво підвищити енергоефективність, забезпечити плавне регулювання швидкості та точне позиціонування об'єкта. Крім того, стабільна робота такого обладнання неможлива без грамотно спроектованої та безпечної системи електропостачання будівельного майданчика.

Об'єктом дослідження є комплексні електромеханічні, електротехнічні та динамічні процеси, що виникають під час різних режимів роботи асинхронного електроприводу механізму підйому баштового крана.

Предметом дослідження є математичні моделі асинхронного двигуна у просторі станів, імітаційне моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink, алгоритми і технічні засоби мікропроцесорної системи автоматизації.

Метою роботи є розробка та дослідження комплексної електромеханічної системи механізму підйому баштового крана вантажопідйомністю 8 тонн з частотно-регульованим асинхронним електроприводом, мікропроцесорною системою автоматизації та інфраструктурою електропостачання для зниження динамічних навантажень, забезпечення плавності руху та підвищення безпеки експлуатації.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети в дипломному проєкті необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Виконати кінематичні розрахунки механізму підйому баштового крана та здійснити обґрунтований вибір спеціалізованого кранового асинхронного двигуна.

2. Розрахувати сумарне електричне навантаження будівельного майданчика, вибрати цеховий силовий трансформатор, спроектувати мережі робочого й прожекторного освітлення, розрахувати струми короткого замикання та вибрати перерізи кабельних ліній разом із захисною комутаційною апаратурою.

3. Розробити математичну модель асинхронного електроприводу в просторі станів (State-Space), реалізувати її в середовищі MATLAB/Simulink та провести порівняльний аналіз динамічних процесів прямого пуску для теоретичного обґрунтування доцільності частотного регулювання.

4. Розробити структуру та апаратну базу мікропроцесорної системи векторного керування (FOC) крановим приводом із використанням сучасного 32-бітного мікроконтролера та силового інтелектуального модуля інвертора для забезпечення точності позиціонування вантажу.

5. Опрацювати комплекс заходів з охорони праці, пожежної безпеки та виробничої санітарії, розрахувати систему захисного заземлення та передбачити програмно-апаратні блокування в системі керування для мінімізації виробничих ризиків оператора крана.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1. Загальні відомості про баштові крани, їх історичний розвиток, призначення та детальна класифікація

Вступні відомості та роль баштових кранів у сучасному будівництві

У сучасному світі темпи урбанізації та промислового розвитку вимагають впровадження високоефективних засобів механізації. Будівельна галузь є однією з найбільш матеріаломістких та працемістких сфер економіки, де ключову роль відіграють підйомно-транспортні машини. Серед усього різноманіття вантажопідіймальної техніки домінуюче положення займають баштові крани. Вони є основою комплексної механізації будівельно-монтажних і вантажно-розвантажувальних робіт при зведенні житлових, цивільних, промислових та гідротехнічних споруд.

Головною відмінною рисою баштового крана, яка зумовила його назву та специфіку застосування, є наявність вертикальної конструкції - башти, у верхній частині якої змонтована стріла. Таке просторове компонування дозволяє машині обслуговувати значну площу будівельного майданчика, піднімати вантажі на велику висоту та безперешкодно переміщувати їх над зведеними конструкціями будівлі.

Еволюція баштових кранів тісно пов'язана з розвитком технологій багатоповерхового та монолітного будівництва. Перші прототипи сучасних кранів з'явилися ще на початку XX століття, проте їхній справжній розквіт припав на період повоєнної відбудови, коли виникла гостра потреба у масовому індустріальному будівництві. З переходом від цегляної кладки до зведення будівель із великогабаритних збірних залізобетонних елементів, вимоги до вантажопідйомності, вильоту стріли та швидкості робочих рухів кранів багаторазово зросли.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	Лім.Лім		АркушівАрку
Розроб.		Бондарчук О.						
Перевір.		Мугенов Д. Д.						
Реценз.								
Н. Контр.		Кулаковський Л.						
Затверд.		Бойченко С.				НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21		

Сучасний баштовий кран - це не просто механізм для підйому вантажу, а складна електромеханічна система, оснащена сучасними електроприводами, мікропроцесорними системами керування та засобами автоматичного захисту, що гарантують безпеку роботи в умовах щільної міської забудови.

Призначення та сфери застосування

Залежно від специфіки будівельного об'єкта, баштові крани поділяються на кілька категорій за своїм цільовим призначенням:

1. Крани для цивільного та житлового будівництва. Це наймасовіша група машин. Вони використовуються для зведення цегляних, панельних та монолітних будівель висотою від кількох поверхів до хмарочосів. Їхня вантажопідйомність зазвичай становить від 3 до 12 тонн. Головна вимога до таких кранів - висока швидкість робочих рухів (підйом вантажу, поворот стріли) для забезпечення безперервного циклу подачі бетону або арматури, а також зручність транспортування та швидкість монтажу на новому об'єкті.
2. Крани для промислового будівництва. Використовуються при спорудженні заводських цехів, ангарів, електростанцій та інших великих інфраструктурних об'єктів. Вони відрізняються підвищеною вантажопідйомністю (від 10 до 50 тонн і більше) та здатністю працювати з великогабаритними і важкими конструкціями, такими як ферми перекриттів, технологічне обладнання чи потужні трансформатори.
3. Крани для гідротехнічного будівництва. Застосовуються при зведенні гребель, шлюзів та дамб. Це унікальні машини гігантських розмірів, які часто працюють на спеціальних естакадах.
4. Крани спеціального призначення. До цієї групи входять крани-навантажувачі, що працюють на лісозаготівельних підприємствах, складських комплексах або полігонах залізобетонних виробів. Їхня конструкція оптимізована для тривалої роботи на одному місці з інтенсивним режимом навантаження.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Класифікація баштових кранів за конструктивними ознаками

Для правильного вибору електромеханічного обладнання та розробки системи автоматизації необхідно чітко розуміти конструктивні особливості різних типів кранів. Основна класифікація здійснюється за трьома параметрами: способом встановлення, типом башти та типом стріли.

А. За способом встановлення (спирання) на об'єкті:

Пересувні на рейковому ході. Найбільш класичний та розповсюджений тип. Кран спирається на спеціальні ходові візки, що рухаються по заздалегідь прокладених рейкових коліях. Це дозволяє крану обслуговувати будівлі значної довжини. Перевагою є велика робоча зона, проте недоліком є необхідність витрат часу та коштів на облаштування ідеально рівної рейкової колії.

Стаціонарні. Встановлюються на монолітний фундамент безпосередньо в зоні будівництва. Вони не можуть пересуватися по майданчику, але займають мінімум місця. Цей тип ідеально підходить для будівництва точкових об'єктів (наприклад, веж) або для умов щільної міської забудови, де прокласти рейки неможливо.

Приставні крани. Використовуються при зведенні будівель висотою понад 50-70 метрів. Оскільки вітрове навантаження на високу вільну башту створює небезпеку перекидання, башту крана періодично (кожні 3-5 поверхів) жорстко кріплять до несучого каркаса зведеної будівлі за допомогою спеціальних анкерних зв'язків.

Самопідіймальні. Специфічний вид кранів, які встановлюються всередині будівлі, що зводиться (наприклад, у шахті ліфта). У міру зростання будівлі кран за допомогою власних гідравлічних механізмів спирається на збудовані перекриття і піднімає сам себе на поверх вище.

Б. За типом конструкції башти:

З поворотною баштою. У таких кранах опорно-поворотний пристрій розташований внизу, безпосередньо на ходовій рамі. Башта обертається разом зі стрілою та кабіною машиніста. Перевагою такої конструкції є те, що всі масивні механізми (вантажна і стрілова лебідки, шафи управління з

					ДП ОА21.05.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

електрообладнанням, важка противага) розташовані внизу. Це зміщує центр ваги крана ближче до землі, підвищує його стійкість та значно полегшує технічне обслуговування електродвигунів. Однак такі крани обмежені по висоті.

З неповоротною баштою. Опорно-поворотний пристрій розміщений на самій вершині башти. Башта жорстко закріплена до фундаменту або ходової рами і не обертається. Повертається лише верхня частина: стріла, консоль з противагою, кабіна та механізми. Ця конструкція дозволяє нарощувати башту до висоти 100 метрів і більше, що є незамінним для сучасного будівництва хмарочосів. Але це висуває жорсткіші вимоги до надійності електроприводів, оскільки їх обслуговування відбувається на величезній висоті.

В. За типом стріли:

З підйомною (маневровою) стрілою. Зміна вильоту вантажу (відстані від осі крана до гака) відбувається шляхом зміни кута нахилу самої стріли у вертикальній площині за допомогою стрілової лебідки. Перевага - хороша маневреність у стиснених умовах; стрілу можна підняти майже вертикально, щоб не зачепити сусідні будівлі.

З балковою (горизонтальною) стрілою. Стріла зафіксована в горизонтальному положенні (або під невеликим незмінним кутом). Переміщення вантажу вздовж стріли здійснюється за допомогою спеціального вантажного візка, який тягне окрема лебідка візка. З точки зору автоматизації та управління електроприводом, цей тип є більш перспективним. Рух візка по горизонталі вимагає значно менших витрат енергії порівняно з підйомом всієї стріли, а траєкторія переміщення вантажу є строго горизонтальною, що спрощує позиціонування вантажу і розробку алгоритмів автоматичного управління системою переміщення.

Таким чином, для подальшого проектування електромеханічного обладнання та системи автоматизації, вибір конструктивної схеми крана визначатиме кількість робочих двигунів, режими їхньої роботи та вимоги до статичної і динамічної стійкості всієї системи.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.2. Будова, компонування та основні механізми баштового крана

Загальне компонування та несучі металоконструкції

Основою будь-якого баштового крана є його просторова металоконструкція, яка сприймає всі статичні (вага самого крана та вантажу) і динамічні (вітер, інерційні сили при пусках/гальмуваннях механізмів) навантаження. До головних несучих елементів належать: башта, стріла, консоль противаги, ходова рама та поворотна платформа.

Башта крана найчастіше виконується у вигляді ґратчастої ферми квадратного або прямокутного перерізу. Ґратчаста конструкція (з труб або кутників) забезпечує оптимальне співвідношення міцності та маси, а також значно знижує площу вітрового опору порівняно з суцільнолистовими конструкціями. Усередині башти розташовані сходи та перехідні площадки для персоналу, а також прокладені кабельні траси, що живлять електрообладнання верхньої частини крана.

На вершині башти (у кранів з неповоротною баштою) або в її основі (у кранів з поворотною баштою) монтується опорно-поворотний пристрій (ОПП). Це потужний роликівий або кульковий підшипник великого діаметра (від 1,5 до 3 метрів), який з'єднує поворотну і неповоротну частини крана. ОПП передає вертикальні, радіальні навантаження та перекидаючий момент від вітру і ваги вантажу на фундамент або ходову раму.

Стріла є ключовим робочим органом. У сучасних кранах для висотного будівництва найчастіше застосовують балкові (горизонтальні) стріли. З протилежного боку від стріли встановлюється консоль противаги (контрстріла), на якій розміщуються залізобетонні блоки або металеві виливці. Маса противаги розраховується таким чином, щоб максимально зрівноважити перекидаючий момент від ваги самої стріли та номінального вантажу, розвантажуючи тим самим башту від згинальних напружень.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

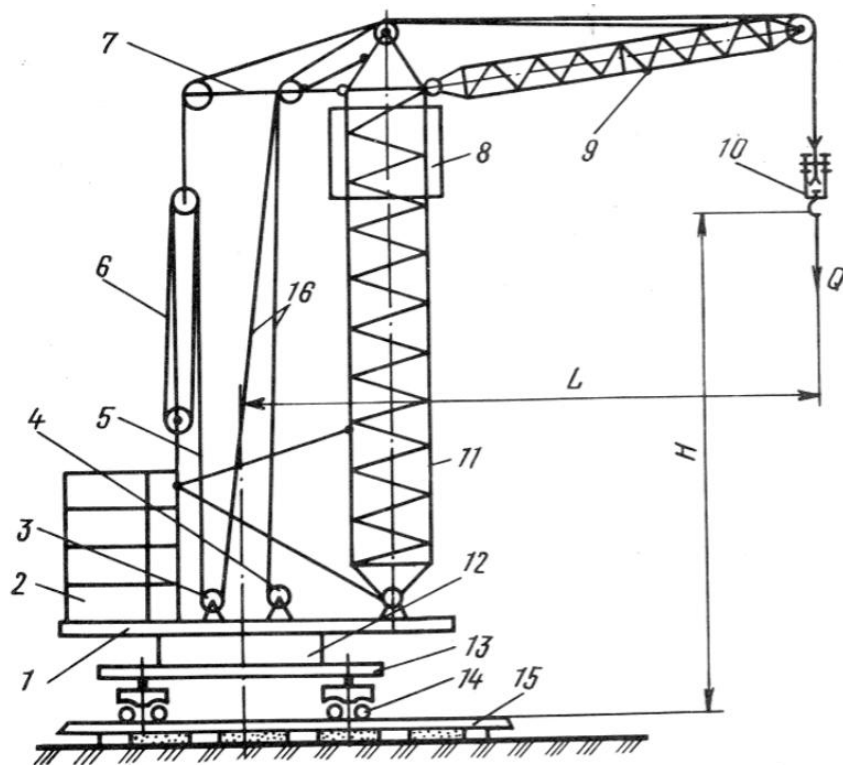


Рис. 1.1 – Загальна схема баштового крана.

Ходова рама (13) з візками (14): слугує основою крана і спирається на кранові колії (15) за допомогою ходових візків, які забезпечують пересування крана вздовж об'єкта.

Опорно-поворотний пристрій (12): з'єднує неповоротну ходову раму з поворотною платформою (1).

Поворотна платформа (1): на ній розміщуються основні механізми (вантажна лебідка (4), стрілова лебідка (3), механізм повороту), а також противага (2), яка забезпечує стійкість крана.

Башта (11): просторова ґратчаста металоконструкція, яка є основною несучою частиною крана.

Стріла (9): металоконструкція, що визначає виліт крана. На кінці стріли або на вантажному візку розташована крюкова підвіска (10) для захоплення вантажу.

Канатна система: включає вантажний канат (16), поліспасти (6), розчалки (5) та систему блоків (7), що забезпечують підйом вантажу та зміну вильоту стріли.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			18

Механізм підйому вантажу (головна вантажна лебідка)

Механізм підйому є основним і найбільш енергоємним вузлом баштового крана.

Вантажна лебідка призначена для забезпечення вертикального переміщення вантажу із заданими швидкостями (як робочими, так і посадковими) і складається з наступних елементів:

Електродвигун: джерело механічної енергії. Для вантажних лебідок традиційно використовувалися асинхронні двигуни з фазним ротором (для регулювання швидкості реостатним способом), проте в сучасних кранах повсюдно застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором у поєднанні з перетворювачами частоти.

Редуктор: знижує частоту обертання від двигуна до барабана та відповідно збільшує крутний момент. Найчастіше використовують циліндричні дво- або триступінчасті редуктори.

Вантажний барабан: циліндрична деталь з нарізаними по спіралі канавками (рівчаками) для правильного та рівномірного укладання сталевих канатів.

Гальмівна система: зазвичай це колодкове гальмо замкненого типу з електрогідравлічним штовхачем, встановлене на входному швидкохідному валу редуктора. Гальмо автоматично розмикається при подачі напруги на двигун і миттєво замикається при її знятті (чи зникненні), надійно утримуючи вантаж у підвішеному стані.

Поліспаст: система рухомих і нерухомих блоків, що огинаються сталевим канатом. Поліспаст дозволяє зменшити зусилля в канаті та крутний момент на барабані (виграш у силі), жертвуючи при цьому швидкістю підйому. Зміна кратності поліспасти (наприклад, з 2 на 4) дозволяє крану підіймати важчі вантажі на меншій швидкості.

Механізм зміни вильоту стріли

Спосіб зміни вильоту залежить від типу стріли. У кранах з маневровою (підйомною) стрілою виліт змінюється шляхом нахилу всієї конструкції за

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

допомогою стрілової лебідки. Це вимагає значних витрат енергії, оскільки доводиться підіймати не лише вантаж, а й масивну металоконструкцію стріли.

Для балкових стріл застосовується візковий механізм зміни вильоту. Вантаж підвішується до вантажного візка, який пересувається по нижніх поясах стріли.

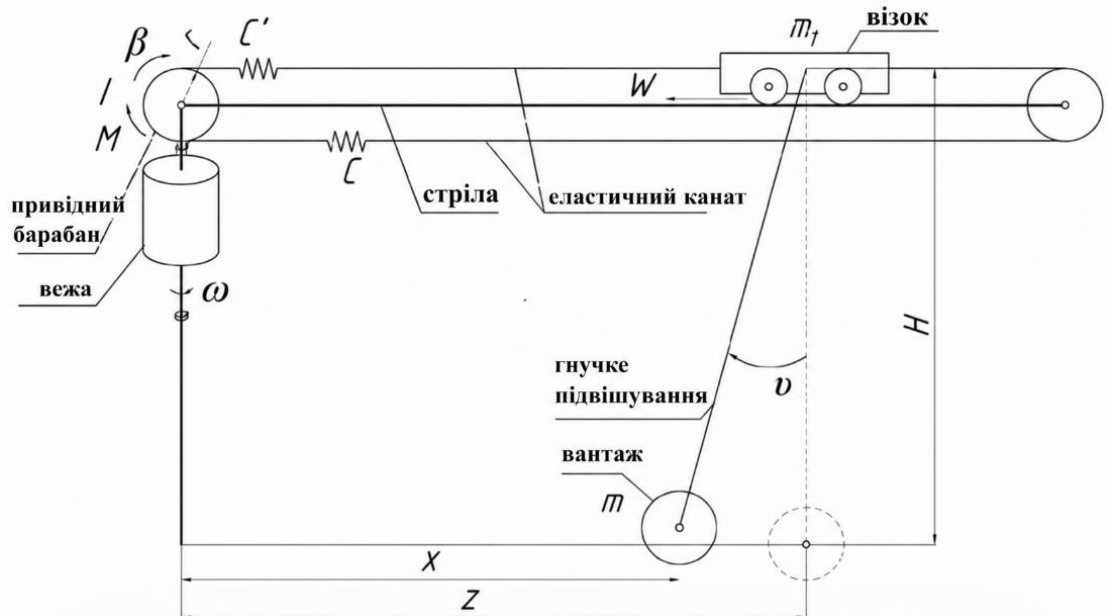


Рис. 1.2 – Спрощена динамічна модель системи «візок – гнучкий підвіс – вантаж».

Як видно з наведеної схеми (Рис. 1.2), візок тягнеться вздовж стріли за допомогою нескінченного тягового каната, що намотується на реверсивний барабан лебідки візка. Така система є енергоефективною: при русі візка вантаж переміщується строго горизонтально, тобто робота проти сил гравітації не виконується (долається лише тертя в підшипниках коліс візка та вітровий опір). Однак, ця система вимагає розробки складних алгоритмів автоматичного керування (гасіння коливань), оскільки при різкому старті або гальмуванні візка вантаж на гнучкому підвісі починає розгойдуватися, що є неприпустимим за умовами техніки безпеки.

Механізм повороту та ходова частина

Механізм повороту служить для обертання поворотної частини крана навколо вертикальної осі. Він складається з вертикального фланцевого електродвигуна, планетарного або циліндричного редуктора та відкритої зубчастої передачі. Вихідна шестерня редуктора входить у зачеплення з зубчастим вінцем опорно-поворотного пристрою. Залежно від розмірів крана, встановлюють від одного до чотирьох таких механізмів, які працюють синхронно. Особливістю їхньої роботи є величезний момент інерції поворотної частини з довгою стрілою, тому привід повинен забезпечувати надзвичайно плавний розгін та гальмування.

Механізм пересування (для кранів на рейковому ході) забезпечує переміщення всього крана вздовж об'єкта. Ходова частина складається з кількох (зазвичай чотирьох) ходових візків, з яких два або більше є ведучими. Кожен ведучий візок має власний електропривід, що складається з двигуна, редуктора та відкритої зубчастої передачі на ходові колеса. Обов'язковим елементом є протиугонні захвати - спеціальні кліщі, які автоматично фіксують кран на рейках при неробочому стані, щоб запобігти його самовільному руху під дією сильного штормового вітру.

1.3. Вимоги до електроприводів баштових кранів, режими їх роботи та специфіка експлуатації

Загальна характеристика умов експлуатації електрообладнання

Електрообладнання баштових кранів експлуатується в умовах, які суттєво відрізняються від умов роботи стаціонарних промислових установок у закритих цехах. Специфіка будівельного майданчика висуває до електродвигунів, апаратури керування та систем захисту підвищені вимоги щодо надійності, кліматичного виконання та механічної міцності.

До основних несприятливих факторів навколишнього середовища, які безпосередньо впливають на роботу електроприводу, належать:

- Широкий температурний діапазон: крани працюють просто неба цілий рік, тому електрообладнання повинно гарантовано

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

функціонувати при температурах від -40 °С до +40 °С. Це вимагає використання спеціальних морозостійких мастил у підшипниках та ізоляційних матеріалів, що не втрачають своїх властивостей при екстремальних температурах.

- Атмосферні опади та вологість: безпосередній вплив дощу, снігу, інею та туману вимагає високого ступеня захисту оболонок електродвигунів і шаф керування (як правило, не нижче IP54 або IP55).
- Запиленість та вібрації: на будівельному майданчику завжди присутній будівельний пил, який може осідати на струмоведучих частинах і погіршувати умови охолодження двигунів. Крім того, робота механізмів та пересування крана супроводжуються значними вібраціями, що вимагає надійної фіксації всіх електричних з'єднань для запобігання їх саморозкручуванню.

Режими роботи кранових електродвигунів

Ключовою особливістю роботи механізмів баштового крана є їхній циклічний характер. На відміну від насосів чи вентиляторів, які працюють годинами в усталеному режимі (режим S1), кранові двигуни працюють у повторно-короткочасному режимі (режим S3) згідно з міждержавними стандартами.

Цей режим характеризується чергуванням періодів роботи (пуск, рух зі сталою швидкістю, електричне гальмування) та періодів пауз, під час яких механізм зупинений (завантаження, розвантаження, стропування вантажу). Тривалість одного повного циклу зазвичай не перевищує 10 хвилин.

Основним параметром, що характеризує навантаження двигуна в режимі S3, є відносна тривалість включення (ТВ, %), яка визначається за формулою:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\%$$

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

де t_p – час роботи механізму під навантаженням; t_0 – час пауз.

Для електроприводів баштових кранів стандартизовані значення ТВ становлять 15, 25, 40 та 60%. Чим інтенсивніше працює кран, тим більше значення ТВ. При розрахунках і виборі двигуна механізму підйому ми обов'язково повинні враховувати цей фактор, оскільки двигун нагрівається лише під час роботи, а під час пауз охолоджується. Неправильне визначення еквівалентного ТВ може призвести до перегріву та передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток статора.

За сукупністю факторів (інтенсивність використання, завантаженість по масі, кількість циклів на годину) режим роботи крана поділяється на класи використання від легкого до вельми важкого. Для більшості будівельних баштових кранів характерним є середній або важкий режим роботи.

Технологічні вимоги до електроприводу механізму підйому

Оскільки механізм підйому виконує найвідповідальнішу роботу - просторове переміщення вантажу, подолання сил земного тяжіння та точне позиціонування під час монтажу, - до його електроприводу висуваються найжорсткіші вимоги:

- 1) Реверсивність: двигун повинен однаково ефективно працювати як у напрямку підйому (руховий режим), так і в напрямку спуску вантажу.
- 2) Робота з перетягуючими навантаженнями: під час спуску важкого вантажу сили гравітації намагаються розігнати механізм. Електропривод повинен не просто відпустити гальма, а активно протидіяти розгону. У цьому випадку двигун переходить у режим генераторного гальмування, віддаючи енергію назад у мережу або розсіюючи її на гальмівних резисторах, забезпечуючи стабільну швидкість спуску.
- 3) Широкий діапазон регулювання швидкості: для підвищення продуктивності порожній гак або легкі вантажі повинні підніматися на максимальній (подвійній) швидкості. Натомість для точного та безпечного встановлення залізобетонних панелей чи обладнання на

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

місце монтажу необхідна так звана "посадкова швидкість", яка становить 5-10% від номінальної.

- 4) Плавність пуску і гальмування: обмеження динамічних навантажень у пружних елементах (канатах, металоконструкції башти та стріли). Різкі ривки при пуску призводять до розгойдування вантажу на гнучкому підвісі та створюють небезпечні згинальні моменти в башті. Оптимальний електропривід повинен забезпечувати рух із заданим прискоренням/сповільненням, що формується системою керування (наприклад, задатчиком інтенсивності в перетворювачі частоти).

Вимоги до надійності та безпечної експлуатації

Баштовий кран є об'єктом підвищеної небезпеки, тому система керування електроприводами тісно інтегрується з приладами та пристроями безпеки. Відповідно до вимог нормативних документів (НПАОП «Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів»), електрична схема повинна забезпечувати:

- 1) Нульовий захист: унеможливило самовільний запуск двигунів після відновлення напруги в мережі, якщо рукоятки управління не були повернуті в нульове (нейтральне) положення.
- 2) Максимальний струмовий та тепловий захист: миттєве відключення живлення при коротких замиканнях або перевантаженнях неприпустимої тривалості.
- 3) Кінцеві вимикачі механізмів: автоматичне відключення електроприводів при наближенні механізму до гранично допустимих положень (наприклад, при підйомі гакової підвіски до стріли, при виїзді вантажного візка на край стріли або при повороті крана за допустимі межі).
- 4) Взаємодію з обмежувачем вантажопідйомності (ОВП): при спробі підняти вантаж, маса якого перевищує номінальну для даного вильоту стріли, ОВП автоматично блокує електричне коло підйому та збільшення

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

вильоту, дозволяючи лише опускання вантажу або зменшення вильоту стріли.

- 5) Надійне утримання вантажу: наявність нормально замкненого механічного гальма, яке автоматично накладається при будь-якому зникненні напруги в колі керування або силовому колі двигуна.

Виходячи з перелічених вимог, сучасним стандартом де-факто для кранового механізму підйому є використання частотно-регульованого електроприводу змінного струму, який дозволяє реалізувати всі необхідні технологічні та захисні функції з максимальною енергоефективністю.

1.4. Аналіз існуючих систем керування електроприводами баштових кранів

Вибір системи керування електроприводами визначає не лише надійність і продуктивність баштового крана, але й якість виконання будівельно-монтажних робіт, енергоефективність та ресурс механічного обладнання. Історично склалося кілька поколінь систем керування, кожна з яких має свої переваги, недоліки та сферу доцільного використання.

Релейно-контакторні системи керування (РКСК)

Протягом багатьох десятиліть релейно-контакторні схеми керування асинхронними двигунами з фазним ротором (АДФР) були безальтернативним стандартом у кранобудуванні. Принцип дії таких систем базується на зміні опору в колі ротора за допомогою блоків пуско-гальмівних резисторів. Комутація ступенів опору здійснюється потужними силовими контакторами змінного або постійного струму за сигналами від командоапаратів, якими керує машиніст.

Переваги РКСК:

- Висока надійність і ремонтпридатність у польових умовах: несправний контактор або реле часу можна швидко замінити без застосування спеціального діагностичного обладнання.
- Відносна дешевина елементної бази.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Здатність витримувати значні перевантаження та нестабільність напруги в мережі будівельного майданчика.

Недоліки РКСК:

- Ступінчасте (стрибкоподібне) регулювання швидкості, що викликає значні динамічні удари в механічних передачах (редукторах, муфтах) та розгойдування вантажу.
- Низька енергоефективність: при роботі на знижених швидкостях величезна кількість електроенергії марно розсіюється у вигляді тепла на пускових резисторах.
- Немоżliвість отримання стабільної посадкової швидкості (особливо при малих навантаженнях), що критично важливо при точному монтажі конструкцій.
- Високий знос контактної апаратури через часті комутації великих струмів (дугоутворення при розриві кола).

Сьогодні РКСК вважаються морально застарілими, проте вони досі масово зустрічаються на кранах старих моделей (наприклад, серії КБ), що експлуатуються в Україні.

Системи тиристорного керування

Наступним кроком в еволюції кранового електроприводу стало впровадження тиристорних регуляторів напруги (ТРН) у коло статора та тиристорних комутаторів у коло ротора АДФР. Такі системи дозволили замінити механічні контакти на напівпровідникові ключі.

Переваги:

- Безконтактна комутація значно підвищила надійність електричної частини та зменшила потребу в регулярному обслуговуванні (чищенні контактів).
- Забезпечення плавного пуску та гальмування шляхом фазового регулювання напруги.

		Недоліки:			ДП ОА21.05.000 ПЗ	26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Енергетичні показники залишилися на низькому рівні (енергія ковзання все одно втрачається).
- Тиристорні перетворювачі генерують значні вищі гармоніки в живильну мережу, що погіршує якість електроенергії.
- Обмежений діапазон регулювання швидкості (зазвичай не більше 1:4).

Частотно-регульований електропривід (ЧРЕП)

На сучасному етапі розвитку кранобудування (крани Liebherr, Potain, сучасні вітчизняні розробки) загальноприйнятим стандартом є використання системи "перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором" (ПЧ-АДКЗ).

Ця система базується на зміні частоти та амплітуди напруги живлення статора, що дозволяє плавно і без втрат регулювати швидкість обертання магнітного поля, а отже, і швидкість механізму. Для механізму підйому баштового крана застосовують перетворювачі частоти з векторним керуванням (із замкненим контуром за швидкістю через енкодер).

Ключові переваги ЧРЕП для баштових кранів:

- Ідеальна плавність роботи: повна відсутність ривків при пуску та зупинці, що збільшує термін служби канатів, редукторів та металоконструкцій у 2-3 рази.
- Широкий діапазон регулювання: досягається співвідношення 1:100 і більше, що дозволяє реалізувати як наднизькі "мікрошвидкості" для точного позиціонування вантажу, так і підвищені швидкості при русі порожнього гака (режим ослаблення поля).
- Енергозбереження: відсутність реостатних втрат економить до 30-40% електроенергії. Крім того, сучасні ПЧ з активним випрямлячем (AFE - Active Front End) дозволяють реалізувати рекуперативне гальмування, повертаючи енергію падаючого вантажу назад у мережу замість її спалювання на гальмівних резисторах.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- Мінімізація обслуговування: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором не має щітково-колекторного вузла, тому практично не потребує обслуговування.

Застосування мікропроцесорної техніки та інтеграція в АСУ

Сучасні баштові крани оснащуються програмованими логічними контролерами (ПЛК), які стають "мозком" всієї машини. ПЛК збирає інформацію від датчиків (кута повороту, вильоту стріли, маси вантажу, швидкості вітру), обробляє її та видає завдання на перетворювачі частоти кожного з механізмів.

Застосування ПЛК дозволяє реалізувати складні алгоритми автоматизації, наприклад:

- Автоматичне гасіння розгойдування вантажу (Anti-Sway System).
- Синхронізація роботи кількох механізмів для переміщення вантажу за найкоротшою і найбезпечнішою траєкторією.
- Зональний захист (віртуальні стіни): заборона руху крана або повороту стріли в зоні ліній електропередач або над сусідніми будівлями.
- Віддалений моніторинг та телеметрія стану обладнання для предиктивного технічного обслуговування.

З огляду на наведений аналіз, для проектного баштового крана доцільно обрати систему керування на базі частотно-регульованого електроприводу з векторним керуванням, що повністю відповідає сучасним вимогам до енергоефективності та автоматизації.

1.5. Обґрунтування та вибір вихідних даних для розрахунку механізму підйому

Правильний вибір вихідних кінематичних та масо-габаритних параметрів баштового крана є фундаментальним етапом проектування. Від цих даних безпересередньо залежать масо-габаритні показники

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрообладнання, встановлена потужність перетворювачів частоти, переріз живильних кабелів та, зрештою, капітальні витрати на створення машини.

У даному дипломному проекті розглядається баштовий кран, призначений для зведення сучасних монолітно-каркасних будівель заввишки до 20 поверхів. Виходячи з цього технологічного завдання, сформуємо та обґрунтуємо базові параметри механізму підйому.

Обґрунтування вантажопідйомності та маси вантажозахоплювального пристрою

Основними вантажами при монолітному будівництві є:

- Бадді з товарним бетоном (ємністю 1,5–2,0 м³), маса яких разом із бетоном становить близько 4–5 тонн.
- Пакети арматури та металопрокату (масою 3–6 тонн).
- Елементи інвентарної опалубки, підйомні риштування та будівельна техніка (міні-екскаватори, компресори), маса яких може досягати 7–8 тонн.

Враховуючи номенклатуру вантажів, приймаємо номінальну вантажопідйомність крана $Q = 8000$ кг (8 тонн). Таке значення є стандартом для більшості кранів середнього класу (наприклад, аналогів серії Liebherr EC-B або KB-405), що забезпечує універсальність машини на будівельному майданчику.

Крім маси самого корисного вантажу, механізм підйому повинен долати силу тяжіння вантажозахоплювального пристрою (крюкової підвіски). Маса підвіски включає вагу блоків поліспаста, траверси, гака та захисних кожухів. На основі статистичних даних кранобудування для машин вантажопідйомністю 8 тонн, маса крюкової підвіски m_0 зазвичай становить 4–5% від номінальної вантажопідйомності. Приймаємо $m_0 = 400$ кг.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Вибір кінематичних параметрів (швидкості та висоти)

Висота підйому визначається максимальною висотою будівлі, що зводиться, з урахуванням запасу на висоту стропування та мінімально допустиму відстань безпеки при пронесенні вантажу над перекриттям. Для 20-поверхової будівлі (середня висота поверху 3 м) висота підйому H приймається рівною 60 м.

Швидкість підйому вантажу $V_{\text{під}}$ є критичним параметром. З одного боку, її збільшення підвищує продуктивність крана (кількість циклів за зміну). З іншого боку - необхідна потужність електродвигуна зростає прямо пропорційно швидкості, що тягне за собою значне подорожчання всього електрообладнання (ПЧ, кабелів, трансформаторів).

Сучасні норми проектування рекомендують для кранів середньої вантажопідйомності встановлювати номінальну швидкість підйому в межах 30–40 м/хв (0,5–0,66 м/с). Для забезпечення раціонального балансу між продуктивністю та енергоспоживанням, приймаємо розрахункову швидкість підйому номінального вантажу $V_{\text{під}} = 0,55$ м/с.

Параметри поліспастної системи та режиму роботи

Для зменшення крутного моменту на барабані вантажної лебідки (а отже, і передавального числа редуктора) застосовують канатний поліспаст. Для кранів вантажопідйомністю 8 т найдоцільніше використовувати двократний поліспаст.

- Кратність поліспаста $a = 2$. Це означає, що зусилля в тяговому канаті буде вдвічі меншим за загальну вагу вантажу.
- ККД поліспаста (з урахуванням втрат на тертя в підшипниках блоків та жорсткості сталевих канатів) приймаємо $\eta_{\text{п}} = 0,96$.
- Загальний механічний ККД механізму підйому (враховує втрати в редукторі, барабані та поліспасті) на етапі попереднього розрахунку приймається рівним $\eta_{\text{мех}} = 0,85$.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як зазначалося у підрозділі 1.3, механізм працює у повторно-короткочасному режимі (S3). Для інтенсивного монолітного будівництва характерним є середній режим роботи механізму. Відповідно до ГОСТ 25835-83 (або ISO 4301/1), приймаємо відносну тривалість включення $TB = 40\%$.

Таблиця 1.1 - Зведена таблиця вихідних даних

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Номінальна вантажопідйомність	Q	8000	кг
Маса вантажозахоплювального пристрою	m_0	400	кг
Висота підйому вантажу	H	60	м
Номінальна швидкість підйому вантажу	$V_{\text{під}}$	0,55	м/с
Кратність вантажного поліспада	a	2	-
Загальний ККД механізму підйому	$\eta_{\text{мех}}$	0,85	-
Відносна тривалість включення (режим S3)	TB	40	%
Прискорення вільного падіння	g	9,81	м/с ²

1.6. Розрахунок кінематики, зусиль у механізмі підйому та вибір електродвигуна

Проектування електроприводу будь-якого кранового механізму починається з визначення статичних навантажень, які діють у кінематичному ланцюзі від вантажозахоплювального пристрою до вала електродвигуна. Для механізму підйому ключовими факторами є сили тяжіння вантажу та елементів підвісу, а також втрати на тертя в поліспапній системі та редукторі.

Розрахунок зусиль у канатній системі та вибір сталевго каната

Перш ніж розраховувати потужність двигуна, необхідно визначити максимальне зусилля, яке виникає у сталевому канаті при підйомі номінального вантажу. Це зусилля визначає діаметр каната, який, у свою чергу, диктує габарити вантажного барабана.

Максимальний статичний натяг у вітці каната, що намотується на барабан лебідки, визначається за формулою:

$$S_{max} = \frac{(Q + m_0) \cdot g}{a \cdot \eta_{\pi}}$$

де: Q - номінальна вантажопідйомність, кг (8000 кг);

m_0 - маса крюкової підвіски, кг (400 кг);

g - прискорення вільного падіння (9,81 м/с²);

a - кратність поліспасти ($a = 2$);

η_{π} - ККД поліспасти ($\eta_{\pi} = 0,96$).

$$S_{max} = \frac{(8000 + 400) \cdot 9,81}{2 \cdot 0,96} = 42918,75 \text{ Н}$$

Згідно з правилами безпеки НПАОП, вибір каната здійснюється за розривним зусиллям із врахуванням коефіцієнта запасу міцності. Для середнього режиму роботи (М4-М5) коефіцієнт запасу міцності k_3 приймається рівним 5,5.

Мінімальне розривне зусилля каната в цілому:

$$F_{розр} \geq S_{max} \cdot k_3$$

$$F_{розр} \geq 42918,75 \cdot 5,5 = 236053 \approx 236 \text{ кН}$$

За ГОСТ 2688-80 (або сучасними стандартами EN) обираємо сталевий канат подвійної звивки з органічним осердям. Найближче більше значення розривного зусилля має канат діаметром $d_k = 21,0$ мм.

Визначення діаметра вантажного барабана

Діаметр барабана вантажної лебідки по дну рівчака D_6 вибирається з умови забезпечення довговічності каната та запобігання його надмірному згину. Він розраховується через мінімально допустимий коефіцієнт e (для нашого режиму роботи $e = 20$):

$$D_6 \geq d_k \cdot (e - 1)$$

$$D_6 \geq 21 \cdot (20 - 1) = 399 \text{ мм}$$

Відповідно до нормативного ряду діаметрів кранових барабанів, приймаємо стандартне значення $D_6 = 400$ мм (або 0,4 м).

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок статичної потужності та вибір електродвигуна

Визначивши основні параметри механічної передачі, переходимо до розрахунку необхідної потужності електродвигуна. Статична потужність на валу двигуна під час підйому номінального вантажу ($P_{ст}$) залежить від сумарної ваги, швидкості підйому та загального ККД механізму.

Загальна сила тяжіння, що долається механізмом:

$$F_{ст} = (Q + m_0) \cdot g = (8000 + 400) \cdot 9,81 = 82404 \text{ Н}$$

Розрахункова статична потужність:

$$P_{ст} = \frac{F_{ст} \cdot V_{під}}{1000 \cdot \eta_{мех}}$$

де: $V_{під}$ - номінальна швидкість підйому (0,55 м/с);

$\eta_{мех}$ - загальний ККД механізму підйому (0,85);

1000 - коефіцієнт переводу ватів у кіловати.

$$P_{ст} = \frac{82404 \cdot 0,55}{1000 \cdot 0,85} = 53,32 \text{ кВт}$$

Згідно з методикою проектування кранових електроприводів, номінальна потужність обраного двигуна $P_{ном}$ при заданій тривалості включення (в нашому випадку $TВ = 40\%$) повинна бути не меншою за розрахункову статичну потужність:

$$P_{ном} \geq P_{ст}$$

$$P_{ном} \geq 53,32 \text{ кВт}$$

Як було обґрунтовано у підрозділі 1.4, для забезпечення сучасних вимог щодо енергоефективності та керування, ми застосовуємо систему "перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором". Тому для механізму підйому обираємо спеціалізований краново-металургійний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії 4МТКМ.

Найближчим більшим за потужністю є двигун 4МТКМ 250 М4. Його технічні характеристики наведені в таблиці 1.2.

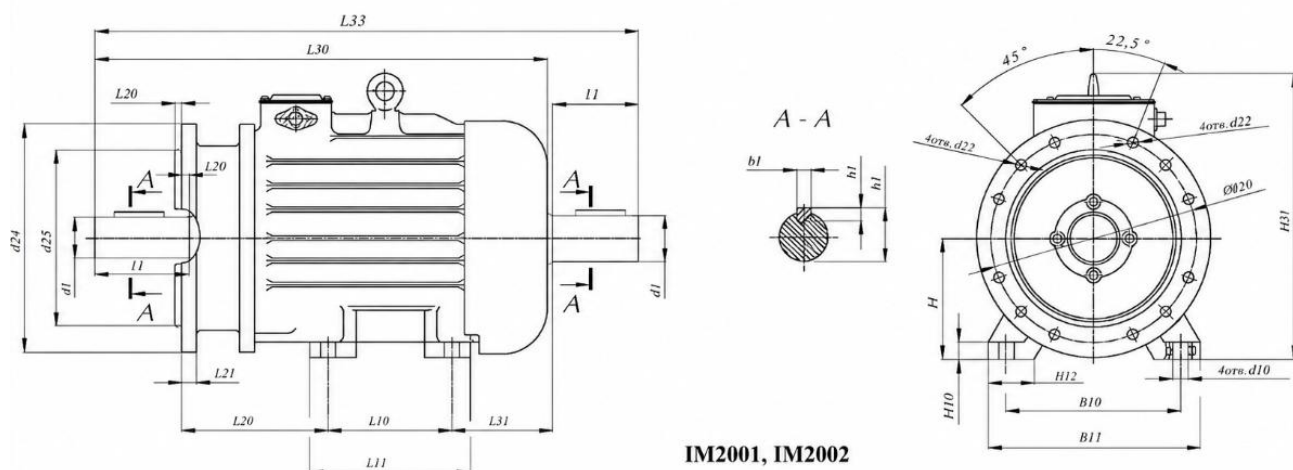
					ДП ОА21.05.000 ПЗ	33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.3 – Загальний вигляд кранового електродвигуна серії МТКМ.

Таблиця 1.2 - Технічні дані обраного електродвигуна 4МТКМ 250 М4

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна потужність (при ТВ=40%)	$P_{\text{ном}}$	55,0	кВт
Синхронна частота обертання	n_0	1500	об/хв
Номінальна частота обертання	$n_{\text{ном}}$	1465	об/хв
Номінальний струм статора (при 380 В)	$I_{\text{ном}}$	108,0	А
Коефіцієнт корисної дії	η	91,5	%
Коефіцієнт потужності	$\cos f$	0,86	-
Відношення макс. моменту до номінального	$\lambda_m = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	3,0	-
Момент інерції ротора	$J_{\text{рот}}$	1,12	кг·м ²
Маса двигуна	$m_{\text{дв}}$	540	кг



Тип двигуна	Габаритні розміри, мм				Встановлювальні і приєднувальні розміри, мм																Довідкові розміри, мм				
	d24	L20	L33	B11	N	b10	b12	d1	d10	d20	d22	d25	L1	L10	L20	L21	L28	L31	L39	h	h1	H	B10	L11	H10
MTX012	350	715	827	480	14	280	75	50	24	300	18	250	110	230	5	18	122	170	5	180	9	53,5	350	380	215

Рис. 1.4 – Габаритні та приєднувальні розміри електродвигуна серії
МТКМ

Перевірка обраного двигуна на перевантажувальну здатність

Будь-який обраний двигун необхідно перевірити на здатність розвивати достатній пусковий момент для розгону мас з урахуванням можливих короткочасних перевантажень.

Номінальний крутний момент на валу двигуна:

$$M_{nom} = \frac{P_{nom} \cdot 9550}{n_{nom}} = \frac{55 \cdot 9550}{1465} = 358,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальний момент, який здатен розвинути двигун:

$$M_{max} = M_{nom} \cdot \lambda_m = 358,5 \cdot 3 = 1075,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Статичний момент опору на валу при підйомі номінального вантажу розраховується з балансу потужностей:

$$M_{ст} = \frac{P_{ст} \cdot 9550}{n_{nom}} = \frac{53,32 \cdot 9550}{1465} = 347,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Умова перевірки перевантажувальної здатності для кранових механізмів вимагає, щоб максимальний момент двигуна перевищував статичний момент не менше ніж у 1,5–2 рази (забезпечення запасу на динамічний розгін).

$$k_n = \frac{M_{max}}{M_{ст}} = \frac{1075,5}{347,6} = 3,09 \geq 1,5$$

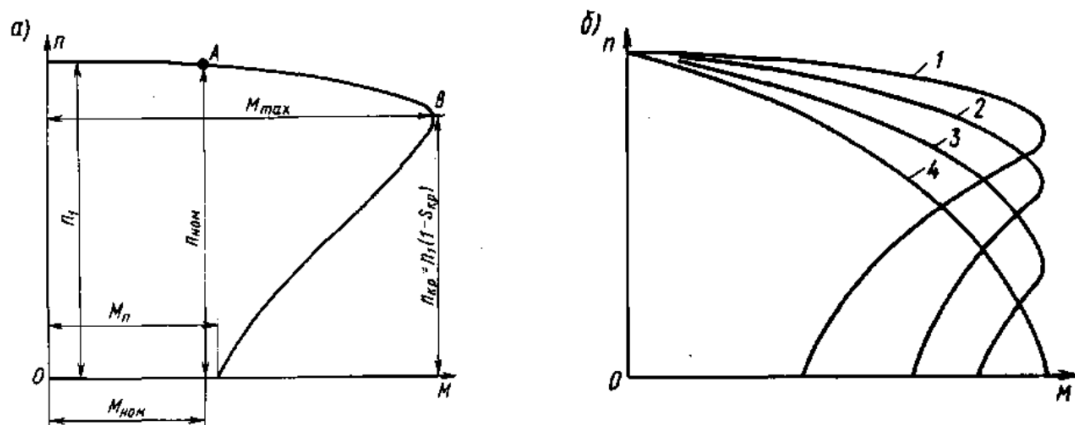


Рис. 1.5 – Природна (а) та штучні (б) механічні характеристики асинхронного кранового електродвигуна.

Умова виконується із значним запасом. Крім того, при використанні перетворювача частоти з векторним керуванням пуск відбувається без критичних стрибків струму з підтриманням номінального моменту на всьому діапазоні швидкостей.

Таким чином, електродвигун 4МТКМ 250 М4 потужністю 55 кВт обрано вірно, і він повністю відповідає вимогам проектованої системи механізму підйому баштового крана.

Висновки до першого розділу

У першому розділі дипломної роботи було проведено комплексний аналіз електромеханічного обладнання баштових кранів. Розглянуто їх класифікацію, особливості конструкції та режими роботи в умовах сучасного будівельного майданчика. Встановлено, що найбільш відповідальним та енергоємним вузлом є механізм підйому вантажу, який працює у повторно-короткочасному режимі та вимагає надійного електроприводу з широким діапазоном регулювання.

Аналіз існуючих систем керування показав технічну та економічну доцільність застосування частотно-регульованого електроприводу з векторним керуванням на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Таке

рішення забезпечує необхідну плавність пуску, формування стабільної посадкової швидкості та високу енергоефективність системи.

На основі обґрунтованих вихідних даних для проєктованого крана (вантажопідйомність 8 т, швидкість підйому 0,55 м/с, висота підйому 60 м) виконано попередній кінематичний розрахунок механізму підйому. Визначено максимальне зусилля в канаті (42,9 кН) та розраховано необхідну статичну потужність (53,32 кВт). За результатами розрахунків обрано оптимальний крановий електродвигун 4МТКМ 250 М4 номінальною потужністю 55 кВт. Перевірка за максимально допустимим моментом підтвердила правильність вибору: коефіцієнт перевантажувальної здатності становить 3,09, що забезпечує надійний запас для подолання динамічних навантажень.

Отримані кінематичні та енергетичні параметри є фундаментальною базою для подальшої розробки системи електропостачання та побудови математичної моделі електроприводу.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електропостачання будівельного майданчика є важливою складовою забезпечення безперервного та безпечного виконання будівельно-монтажних робіт. Надійна система живлення дозволяє забезпечити стабільну роботу технологічного обладнання, механізмів, освітлення та допоміжних установок, що використовуються на об'єкті.

Об'єктом проєктування у даній роботі є система електропостачання будівельного майданчика, до складу якого входять баштовий кран, вантажопідіймальні механізми, насоси, верстати, зварювальні установки, станція термообробки бетону, а також освітлювальні та побутові споживачі.

Усі електроприймачі будівельного майданчика належать до III категорії за надійністю електропостачання. Живлення здійснюється від комплектної трансформаторної підстанції (КТП). Особливістю роботи системи є наявність значної кількості електроприймачів із змінним режимом навантаження, а також пересувних механізмів, що характерно для умов будівельного майданчика. Це вимагає правильного вибору перерізів кабельних ліній, апаратів захисту та перевірки мережі за допустимими втратами напруги і струмами короткого замикання.

2.1. Розрахунок освітлення

Якісна організація освітлення на підприємстві є ключовим фактором створення безпечного робочого середовища, що сприяє зростанню продуктивності та мінімізації виробничого травматизму. Система освітлення повинна відповідати встановленим нормам, забезпечуючи стабільність світлового потоку без засліплювального ефекту, різких тіней чи викривлення кольорів. При цьому важливими критеріями є надійність та компактність світлотехнічного обладнання.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бондарчук О.				ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ		Лім.Лім	АркушіАрку
Перевір.	Мугенов Д. Д.							
Реценз.								
Н. Контр.	Кулаковський Л.						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21	
Затверд.	Бойченко С.							

У даній роботі розрахунок освітлення приміщень виконано за допомогою методу коефіцієнта використання світлового потоку, тоді як для відкритого майданчика обрано прожекторне освітлення.

2.1.1 Розрахунок освітлення приміщення методом використання світлового потоку

Для проведення розрахунку освітлення приміщення будівельного майданчика методом коефіцієнта використання світлового потоку прийнято наступні вихідні дані: геометричні розміри становлять 10 x 5 м при висоті підвісу 1,8 м. Відповідно до завдання, оздоблення стелі є світлим, а стін - сірим, що безпосередньо впливає на відбивні властивості поверхонь. Нормоване значення освітленості встановлено на рівні 15 лк.

Даний метод дозволяє комплексно врахувати як пряме випромінювання світильників, так і потік, відбитий від внутрішніх поверхонь приміщення. Ефективність системи визначається коефіцієнтом використання установки, який залежить від індексу приміщення та показників відбиття. На основі умов експлуатації (вологість, запиленість) обирається тип світлотехнічного обладнання.

Згідно з табл. 2.1 визначаємо тип світильника та відповідний світловий потік лампи $F_{\text{л}}$.

Таблиця 2.1 – параметри обраного світильника (одноламповий)

Тип світильника	Тип лампи	Напруга, U, В	Потужність, Р, Вт	Світловий потік, $F_{\text{л}}$, лм	Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	ККД %
LED Floodlight IP66	Світлодіодна (LED)	220-240	15	1800	0,9	90

Розраховуємо показник приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{10 \cdot 5}{1,8 \cdot (10 + 5)} = 1,85; \quad (2.1)$$

де A і B - довжина та ширина освітлюваного приміщення, м; h - висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Визначаємо площу приміщення, беручи до уваги його прямокутну форму:

$$S = A \cdot B = 10 \cdot 5 = 50 \text{ м}^2; \quad (2.2)$$

Мінімальна освітленість за нормативами визначається залежно від умов проектування. Для приміщення цього типу:

$$E_{\min} = E_n = 15 \text{ лк};$$

Коефіцієнт використання при індексі приміщення $i = 1,85$ (округлюємо до 2) для світлої стелі та сірих стін сучасних промислових LED-світильників зазвичай становить 0,62 - 0,68):

$$K_b \approx 0,65;$$

Розраховуємо загальний світловий потік, потрібний для забезпечення необхідної освітленості:

$$F = \frac{K_3 \cdot E_{\min} \cdot S \cdot z}{K_b} = \frac{1,2 \cdot 15 \cdot 50 \cdot 1,15}{0,65} = 1592,3 \text{ лм}; \quad (2.3)$$

де $K_3 = 1,2$ - коефіцієнт запасу, прийнятий для світлодіодних світильників при роботі в умовах середовища з малим вмістом пилу;

$z = 1,15$ - коефіцієнт нерівномірності, що враховує відношення середньої освітленості до мінімальної для даного типу світильників.

Обчислюємо необхідну кількість ламп:

$$N = \frac{F}{F_{\text{л}}} = \frac{1592,3}{1800} = 0,88 \approx 1; \quad (2.4)$$

Отримане значення 0,88 дуже близьке до одиниці, було вирішено розділити освітлення на дві точки для кращого охоплення площі 10 на 5 м, приймаємо:

- Необхідна кількість ламп для заданого приміщення $N = 2$ шт.
- Сумарна потужність: $15 + 15 = 30 \text{ Вт}$.

Прожектори монтуються вздовж центральної осі об'єкта на відстані 5 метрів один від одного (з відступом по 2,5 м від торцевих стін). Така схема забезпечує оптимальний розподіл світла по всій довжині робочої зони.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.2 Розрахунок прожекторного освітлення

Вхідні умови: майданчик розміром 30×50 м, нормована освітленість майданчика $E_n = 15$ лк.

Процес проєктування прожекторного освітлення для відкритого майданчика включає наступні кроки:

- Встановлення нормованої мінімальної освітленості;
- Обґрунтування типу обладнання та коефіцієнта запасу;
- Обчислення потрібної кількості прожекторів;
- Визначення координат та висоти встановлення приладів;
- Розрахунок оптимального кута нахилу оптичної осі.

Для розрахунку прожекторного освітлення територію будівельного майданчика доцільно моделювати як прямокутник із заданими геометричними параметрами $S = A \cdot B$, м², де A та B – довжина та ширина майданчику:

$$S = A \cdot B = 30 \cdot 50 = 1500 \text{ м}^2;$$

Розраховуємо світловий потік, необхідний для забезпечення заданої освітленості E_n на визначеній площі.

$$\sum \Phi = E_n \cdot S \cdot Z \cdot k_z \cdot k_{\text{вт}} = 15 \cdot 1500 \cdot 2 \cdot 1,35 \cdot 1,15 = 69862,5 \text{ лм}; \quad (2.5)$$

де $k_z = 1,2 \dots 1,5$ - коефіцієнт запасу, $k_{\text{вт}} = 1,15 \dots 1,5$ - коефіцієнт, що враховує втрати світла в залежності від конфігурації освітлюваної площі, $Z = 1 \dots 3$ - коефіцієнт нерівномірності освітлення. Приймаємо: $k_z = 1,35$, $k_{\text{вт}} = 1,15$, $Z = 2$.

Технічні параметри обраного прожекторного обладнання представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – параметри прожектора LED Floodlight High Power

Тип прожектора	Тип лампи	Напруга, В	Потужність, Вт	Світловий потік, лм	Максимальна сила світла, кд	ККД %
LED Floodlight High Power	Світлодіодна (LED)	220	200	30000	120000	90

Визначаємо кількість прожекторів для освітлення даного майданчика:

$$N_{\text{пр}} = \frac{\sum \Phi}{\Phi_{\text{л}} \cdot \eta_{\text{пр}}} = \frac{69862,5}{30000 \cdot 0,9} \approx 3; \quad (2.6)$$

де $\eta_{\text{пр}}$ - ККД прожектора; $\Phi_{\text{л}}$ - світловий потік лампи прожектора, лм.

Приймаємо кількість прожекторів LED Floodlight High Power: $N_{\text{пр}} = 3$ шт.

Визначаємо висоту розміщення прожекторів на освітлювальній щоглі. Для мінімізації засліплювального ефекту та забезпечення комфортних умов праці висота монтажу становить, м:

$$h \geq \sqrt{\frac{I_{\text{max}}}{300}} = \sqrt{\frac{120000}{300}} = 20 \text{ м}; \quad (2.7)$$

де I_{max} - осьова сила світла прожектора.

Необхідну на освітлення прожекторами потужність розраховуємо аналогічно точковому методу.

$$P_{\text{ро}} = N_{\text{пр}} \cdot P_{\text{л}} = 3 \cdot 200 = 600 \text{ Вт};$$

Де $N_{\text{пр}}$ – кількість прожекторів; $P_{\text{л}}$ -потужність прожекторів.

Обчислення сприятливого кута нахилу:

Освітленість світлової плями розраховується за умови взаємного перекриття зон дії декількох прожекторів:

$$E_o = \frac{1}{2} \cdot k_z \cdot E_n \cdot h^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,35 \cdot 15 \cdot 20^2 = 4050 \text{ м}; \quad (2.8)$$

де E_n - нормована освітленість, k_z - коефіцієнт запасу.

Враховуючи значну висоту щогли (20 м) та геометричні параметри майданчика (30 х 50 м), для забезпечення максимальної площі покриття та рівномірності світлового потоку приймаємо оптимальний кут нахилу прожекторів. Згідно з рекомендаціями для промислових LED-установок такого типу, кут нахилу оптичної осі до горизонту приймається рівним $\theta = 55^\circ$.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таке значення дозволяє перекрити всю територію майданчика світловими плямами з необхідною інтенсивністю, забезпечуючи нормовану освітленість 15 лк із заданим коефіцієнтом запасу.

2.2. Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок електричних навантажень методом коефіцієнта попиту проводиться від нижчого рівня напруги до вищого з поетапним об'єднанням електроприймачів у збірку (вузол). Усі електроприймачі будівельного майданчика відносяться до III категорії за надійністю електропостачання, тому живлення передбачається від одного джерела без резервування.

Таблиця 2.3 – Розрахункові параметри споживачів будівельного майданчика

№	Споживач	P_H , кВт	n	K_{Π}	η_n	$\cos\varphi$
1	Зварювальні трансформатори (ПВ = 25%)	20	2	0,6	0,8	0,7
2	Токарно-гвинторізний верстат	20	1	0,7	0,85	0,65
3	Трубогінний верстат	5	1	0,6	0,85	0,7
4	Ножиці механічні	7	1	0,6	0,85	0,65
5	Транспортер вантажний	12	1	0,75	0,9	0,75
6	Кран-перевантажувач	25	1	0,7	0,9	0,8
7	Баштовий кран	55	1	0,6	0,9	0,75
8	Насоси розчину	16	2	0,7	0,9	0,7
9	Станція термообробки бетону	80	1	0,8	0,95	0,9
10	Насос поршневий	15	2	0,7	0,9	0,7
11	Підйомник вантажний мачтовий	22	1	0,7	0,9	0,7
12	Верстат-різак металообробний	12	1	0,6	0,85	0,65
13	Свердлильний верстат	3	1	0,6	0,85	0,65
14	Побутові приміщення	10	1	0,9	1	0,7

За формулою (2.9) визначається розрахункове активне навантаження P_p для електроприймачів та сумарне активне навантаження на вузол.

$$P_p = K_{\Pi} \cdot \sum_{i=1}^n P_{H.i.} \quad (2.9)$$

$$P_{p1} = K_{\Pi 1} \cdot P_{H1} = 0,6 \cdot 2 \cdot 20 \cdot \sqrt{0,25} = 12 \text{ кВт};$$

Оскільки зварювальні трансформатори працюють у повторно-короткочасному режимі, їхня потужність приведена до тривалого режиму.

Інші споживачі розраховуються в Microsoft Excel. Результати обчислень занесені до табл. 2.2.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За формулою (2.10) обрахуємо коефіцієнт реактивної потужності кожного споживача:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} = \operatorname{tg}(\arccos(\cos \varphi_{\text{н}})) \quad (2.10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}1} = \operatorname{tg}(\arccos(0,7)) = 1,02;$$

За формулою (2.11) визначаємо розрахункове реактивне навантаження Q_p для кожного електроприймача та сумарне реактивне навантаження:

$$Q_p = P_p \cdot \tan \varphi_p \quad (2.11)$$

$$Q_{p5} = P_{p5} \cdot \tan \varphi_{p5} = 12 \cdot 1,02 = 12,24 \text{ кВАр};$$

Визначаємо повне розрахункове навантаження S_p . Приймаємо коефіцієнт одночасності рівний 1:

$$S_p = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.12)$$

$$S_{p1} = \sqrt{P_{p1}^2 + Q_{p1}^2} = \sqrt{12^2 + 12,24^2} = 17,14 \text{ кВА};$$

$$S_{\text{Рсум}} = \sqrt{P_{\text{Рсум}}^2 + Q_{\text{Рсум}}^2} = \sqrt{233,5^2 + 197,43^2} = 305,78 \text{ кВА};$$

Таблиця 2.4 – Розрахунок електричних навантажень

Вхідні дані							Розрахунок			
№	Споживач	$P_{\text{н}}$, кВт	n	$K_{\text{п}}$	$\eta_{\text{н}}$	$\cos \varphi$	$P_{\text{р}}$, кВт	$\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}$	$Q_{\text{р}}$, кВАр	$S_{\text{р}}$, кВА
РП1										
1	Баштовий кран	55	1	0,6	0,9	0,75	33	0,882	29,1	44
2	Кран-перевантажувач	25	1	0,7	0,9	0,8	17,5	0,75	13,13	21,88
3	Підйомник вантажний мачтовий	22	1	0,7	0,9	0,7	15,4	1,02	15,71	22
Разом РП1							65,9		57,94	87,75
РП2										
4	Станція термообробки бетону	80	1	0,8	0,95	0,9	64	0,484	31	71,11
5	Насоси розчину	16	2	0,7	0,9	0,7	22,4	1,02	22,85	32
6	Насос поршневий	15	2	0,7	0,9	0,7	21	1,02	21,42	30
Разом РП2							107,4		75,27	131,15
РП3										
7	Зварювальні трансформатори (ПВ = 25%)	20	2	0,6	0,8	0,7	12	1,02	12,24	17,14
8	Токарно-гвинторізний верстат	20	1	0,7	0,85	0,65	14	1,169	16,37	21,54
9	Трубогібний верстат	5	1	0,6	0,85	0,7	3	1,02	3,06	4,29
10	Ножиці механічні	7	1	0,6	0,85	0,65	4,2	1,169	4,91	6,46

11	Транспортер вантажний	12	1	0,75	0,9	0,75	9	0,882	7,94	12
12	Верстат-різак металообробний	12	1	0,6	0,85	0,65	7,2	1,169	8,42	11,08
13	Свердлильний верстат	3	1	0,6	0,85	0,65	1,8	1,169	2,1	2,77
14	Побутові приміщення	10	1	0,9	1	0,7	9	1,02	9,18	12,86
РПЗ							60,2		64,22	88,03
Разом (РП1+РП2+РП3)							233,5	-	197,43	305,78

Обираємо трансформатор Т1 згідно заданої потужності, враховуючи що трансформатор може працювати при навантаженні до 30% більше номінального, $U_{\text{номВН}} = 10 \text{ кВ}$, а $U_{\text{номНН}} = 0,4 \text{ кВ}$;

Таблиця 2.5 – Параметри трансформатора

Тип	Номінальна потужність, $S_{\text{ном}}$, кВА	Номінальні напруги, кВ		Втрати потужності ХХ, $P_{\text{х}}$, кВт	Втрати потужності КЗ, $P_{\text{к}}$, кВт	Струм ХХ $I_{\text{х}}$, %	Напруга КЗ, $U_{\text{к}}\%$
		ВН (Y)	НН (Δ)				
ТМ- 400/10/0.4	400	10	0,4	0,85	5,5	1,8	4,5

Розрахунок втрат активної та реактивної потужності в трансформаторі Т1:

$$\Delta P_{T1} = 0,02 \cdot S_{\text{ном.Т}} = 0,02 \cdot 400 = 8 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{T1} = 0,1 \cdot S_{\text{ном.Т}} = 0,1 \cdot 400 = 40 \text{ кВАр};$$

2.3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

2.3.1 Основні відомості

При розробці систем живлення та розподілу електроенергії для об'єктів будівництва обов'язково виконуються електричні та механічні розрахунки мереж. Першим етапом є складання детальної схеми електропостачання майданчика із чітким зазначенням довжини кожної ділянки мережі та розташування точок підключення.

Оскільки будівельні механізми (баштові крани, підйомники, бетононасоси) постійно переміщуються по об'єкту, а інтенсивність робіт змінюється, розрахунок схеми проводиться для найменш сприятливого сценарію. Це стан, при якому розташування обладнання та концентрація навантажень у кінцевих точках ліній призводять до максимальних втрат напруги.

Вибір перерізу кабелів для об'єкта базується на балансі технічної надійності та економічної доцільності. Головними технічними критеріями є здатність провідника витримувати тривалі навантаження без перегріву, стійкість до струмів короткого замикання та забезпечення допустимого рівня втрат напруги, що критично для віддалених споживачів. Крім того, враховується висока механічна міцність кабелю в умовах будмайданчика, а для стаціонарних ліній додатково оцінюється економічна щільність струму для оптимізації тривалої експлуатації.

Мережі напругою до 1000 В: Це основна частина мереж майданчика. Їх розраховують переважно за втратами напруги, що критично для пуску потужних двигунів. Також проводиться обов'язкова перевірка на нагрів та узгодження з параметрами захисних автоматів, щоб забезпечити миттєве відключення при короткому замиканні.

Переносні та гнучкі кабельні лінії: Для живлення мобільного інструменту та пересувних установок головними критеріями є нагрівання та термічна стійкість.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Високовольтні лінії (6–10 кВ): Якщо об'єкт має власну підстанцію, такі лінії розраховуються за економічною щільністю струму з обов'язковою перевіркою на допустимі втрати напруги та умови нагріву.

2.3.2 Розрахунок струмів навантаження групи електроприймачів

Для забезпечення стабільної роботи мережі та раціонального вибору кабелів, навантаження об'єкта розподіляється між декількома розподільчими пунктами (РП). Це рішення дозволяє уникнути критично високих значень струму на одній магістралі, що дає змогу використовувати провідники меншого перерізу, які легше монтувати та підключати.

Такий підхід суттєво підвищує надійність системи: відокремлення потужної техніки (кранів, систем прогріву бетону) від допоміжного обладнання мінімізує ризик повного знеструмлення майданчика при локальних аваріях.

При виборі перетинів проводів і жил кабелів розрахунковий струм навантаження групи електроприймачів визначається так:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (2.13)$$

Де S_P – розрахункове навантаження групи споживачів, кВА; U_H – напруга мережі, кВ.

Розрахунковий струм двигуна (груп двигунів) визначається по його номінальній потужності:

$$I_P = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} \quad (2.14)$$

де η_H – ККД двигуна при номінальному навантаженні; $\cos \varphi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності.

$$I_{P1} = \frac{P_{H1}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_{H1} \cdot \cos \varphi_{H1}} = \frac{33}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,99 \cdot 0,75} = 81,48 \text{ A};$$

$$I_{РП1} = \frac{S_{РП1}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{87,85}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 126,81 \text{ A};$$

Аналогічно розраховуємо решту електроприймачів та заносимо дані в Табл. 2.6.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.6 – Зведена відомість розрахункових параметрів ліній електропостачання розподільчих пунктів РП1, РП2, РП3

Споживач	№ лінії	Довжина лінії, м	Тип лінії	Потужність, що передається лінією, кВт	cosφ	ККД	Розрахунковий робочий струм лінії I _p , А
РП1							
РП1	РП1	50	КЛ	65,9	-	-	126,81
Баштовий кран	1	50	КЛ	33	0,75	0,9	81,48
Кран-перевантажувач	2	35	КЛ	17,5	0,8	0,9	40,51
Підйомник вантажний мачтовий	3	30	КЛ	15,4	0,7	0,9	40,74
РП2							
РП2	РП2	35	КЛ	107,4	-	-	189,52
Станція термообробки бетону	4	50	КЛ	64	0,9	0,95	124,76
Насоси розчину	5	30	КЛ	22,4	0,7	0,9	59,26
Насос поршневий	6	15	КЛ	21	0,7	0,9	55,56
РП3							
РП3	РП3	20	КЛ	60,2	-	-	127,21
Зварювальні трансформатори (ПВ = 25%)	7	25	КЛ	12	0,7	0,8	35,71
Токарно-гвинторізний верстат	8	40	КЛ	14	0,65	0,85	42,23
Трубогібний верстат	9	45	КЛ	3	0,7	0,85	8,40
Ножиці механічні	10	20	КЛ	4,2	0,65	0,85	12,67
Транспортер вантажний	11	25	КЛ	9	0,75	0,9	22,22
Верстат-різак металообробний	12	20	КЛ	7,2	0,65	0,85	21,72
Свердлильний верстат	13	45	КЛ	1,8	0,65	0,85	5,43
Побутові приміщення	14	15	КЛ	9	0,7	1	21,43

2.3.3 Вибір перетину провідників і жил кабелів за нагрівом

Вибір перерізу проводів повітряних ліній та жил кабелів за нагрівом розрахунковим (робочим) струмом в нормальному тривалому режимі роботи полягає в порівнянні розрахункового струму і-ї лінії з допустимим струмом, для якого ПУЕ рекомендує стандартні значення перерізів проводів КЛ та жил кабелів, за умови

$$I_p \leq I_{\text{доп}} \quad (2.15)$$

де I_p - розрахунковий (або робочий) струм i -ї лінії, А;

$I_{\text{доп}}$ - тривало-допустимі струми для стандартного ряду перерізів провідника ліній.

Для прокладання ліній розподільчих пунктів об'єкта обираємо чотирьохжильні кабелі з мідними жилами марки ВВГнг із ПВХ-ізоляцією:

Таблиця 2.7 – Вибір перерізу жил кабелів за умовою нагріву

Лінія	I_p	$I_{\text{доп}}$	$S_{\text{нагр}}$	Марка
$L_{\text{РП1}}$	126,81	145	50	ВВГнг
$L_{\text{РП2}}$	189,52	220	95	ВВГнг
$L_{\text{РП3}}$	127,21	145	50	ВВГнг
L_1	81,48	95	25	ВВГнг
L_2	40,51	42	6	ВВГнг
L_3	40,74	42	6	ВВГнг
L_4	124,76	145	50	ВВГнг
L_5	59,26	75	16	ВВГнг
L_6	55,56	75	16	ВВГнг
L_7	35,71	42	6	ВВГнг
L_8	42,23	55	10	ВВГнг
L_9	8,40	19	1.5	ВВГнг
L_{10}	12,67	19	1.5	ВВГнг
L_{11}	22,22	25	2.5	ВВГнг
L_{12}	21,72	25	2.5	ВВГнг
L_{13}	5,43	19	1.5	ВВГнг
L_{14}	21,43	25	2.5	ВВГнг

2.3.4 Розрахунок електричної мережі за допустимими втратами напруги

Обраний перетин провідників ЛЕП повинен відповідати як економічним, так і технічним вимогам, зокрема забезпечувати споживачів електроенергією необхідної якості. Тому електрична мережа підлягає обов'язковій перевірці на допустиму втрату напруги.

Для низьковольтних електроприймачів об'єкта з номінальною напругою мережі 380 В граничну величину втрат напруги приймають рівною 39 В. Ділянка мережі складається з трансформаторної підстанції та кабельних ліній (магістральних та гнучких), що з'єднують джерело живлення та електроприймач.

$$\Delta U_{\text{доп}} = 39 \text{ В};$$

Сумарна втрата напруги в усіх елементах мережі не повинна перевищувати нормоване значення. У разі виявлення надмірних втрат необхідно збільшити переріз кабелів на відповідних ділянках.

Розрахунок втрат напруги в трансформаторі [%] проводиться за формулою:

$$\Delta U_{\text{ТР}\%} = \beta (U_{a\%} \cos \varphi_{\text{ТР}} + U_{p\%} \sin \varphi_{\text{ТР}})$$

де $\beta = \frac{S_p}{S_{\text{н.т.}}}$ – коефіцієнт завантаження трансформатора;

$U_{a\%} = \frac{\Delta P_K}{10 S_{\text{н.т.}}}$ – активна складова напруги КЗ трансформатора;

ΔP_K - втрати КЗ трансформатора, Вт;

$S_{\text{н.т.}}$ - номінальна потужність трансформатора, кВА;

$U_{p\%} = \sqrt{(U_{k\%})^2 - (U_{a\%})^2}$ – реактивна складова напруги КЗ трансформатора;

Враховуючи можливість регулювання напруги на виході трансформатора за рахунок переключення відпайок обмотки первинної напруги абсолютне значення втрат напруги в трансформаторі, В:

$$\Delta U_{\text{ТР}} = \Delta U_{\text{ТР}\%} \cdot K_0 \cdot \frac{U_0}{100}$$

де K_0 – коефіцієнт зміни напруги в трансформаторі, що дорівнює 0,95, 1,0 та 1,05 при відпайках +5%, 0, -5%. U_0 – вторинна напруга холостого ходу трансформатора.

Розраховуємо втрати напруги для трансформатора ТМ-400/10/0.4:

$$\beta = \frac{S_p}{S_{\text{н.т.}}} = \frac{322,85}{400} = 0,8;$$

$$U_{a\%} = \frac{\Delta P_K}{10 \cdot S_{\text{н.т.}}} = \frac{5500}{10 \cdot 400} = 1,375 \%;$$

$$U_{p\%} = \sqrt{(U_{k\%})^2 - (U_{a\%})^2} = \sqrt{4,5^2 - 1,375^2} = 4,28 \%;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{245,5}{322,85} = 0,76;$$

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos\varphi^2} = \sqrt{1 - 0,76^2} = 0,64;$$

$$\Delta U_{TP\%} = \beta \cdot (U_{a\%} \cdot \cos\varphi + U_{P\%} \cdot \sin\varphi) = 0,8 \cdot (1,375 \cdot 0,76 + 4,28 \cdot 0,64) = 3,02 \%$$

$$\Delta U_{TP} = \Delta U_{TP\%} \cdot K_0 \cdot \frac{U_0}{100} = 3,02 \cdot 1 \cdot \frac{400}{100} = 12,08 \text{ В};$$

Тоді допустимі втрати напруги в кабелі:

$$\Delta U_{МК} = \Delta U_{доп} - \Delta U_{TP} = 39 - 12,08 = 26,92 \text{ В};$$

Розрахунок втрат напруги в кабелі [В] проводиться за формулою:

$$\Delta U_{М.К.} = \frac{P_H \cdot L_{М.К.} \cdot 10^3}{\gamma \cdot S_{М.К.} \cdot U_H \cdot \eta_H}$$

$$\Delta U_{РП1} = \frac{S_{РП1} \cdot L_{РП1} \cdot 10^3}{\gamma \cdot S_{РП1} \cdot U_H} = \frac{87,85 \cdot 50 \cdot 10^3}{50 \cdot 50 \cdot 380} = 4,62 \text{ В};$$

Таблиця 2.8 – Допустимі втрати напруги для магістральних кабелів розподільчих пунктів

№	Допустимі втрати ($\Delta U_{МК} = \Delta U_{доп} - \Delta U_{TP} - \Delta U_{РП}$)
РП1	22,3
РП2	24,38
РП3	25,07

Якщо напруга більше допустимої - поступово збільшуємо показники S поки не отримаємо задовільний результат.

$$\Delta U_{М.К1} = \frac{P_{H1} \cdot L_{М.К1} \cdot 10^3}{\gamma \cdot S_{М.К1} \cdot U_H \cdot \eta} = \frac{33 \cdot 50 \cdot 10^3}{50 \cdot 25 \cdot 380 \cdot 0,9} = 3,86 \text{ В};$$

P_H - потужність всіх електроприймачів, що живиться цим кабелем [кВт];

$L_{М.К.}$ – довжина кабелю [м];

$\gamma=50$ [м/(Ом•мм²)] – питома провідність мідного кабелю;

$S_{М.К.}$ – найбільший переріз кабелю з попередніх перевірок[мм²];

U_H - номінальна напруга мережі, для якої розраховуються втрати напруги [В];

η_H - ККД електроприймача

Приклад розрахунку сумарних втрат напруги для найбільш завантаженої лінії L₂:

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_T + \Delta U_{MK} + \Delta U_{ГК} = 12,08 + 4,62 + 5,97 = 22,67 \text{ В};$$

2.3.5. Остаточний вибір перетинів проводів і жил кабелів

Розрахунок електричної розподільної мережі ділянки зводять у таблицю, у якій повинні бути приведені основні розрахункові параметри елементів мережі, мінімальні значення перетинів провідників, обрані за різними умовами для кожної із ліній, марка остаточно обраного проводу або тип кабелів.

Розрахунок розподільної мережі можна звести у таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Остаточний розрахунок мережі

№ лінії	Розрахунковий робочий струм I_p , А	За нагрівом		Мех. міцність $S_{мех}$, мм ²	За втратами напруги		Остаточна обрана марка
		$I_{доп}$, А	$S_{нагр}$, мм ²		Втрати напруги, В	$S_{втр}$ напруги мм ²	
$L_{рп1}$	126,81	145	50	1,5	4,62	50	ВВГнг 4х50
$L_{рп2}$	189,52	220	95	1,5	2,54	95	ВВГнг 4х95
$L_{рп3}$	127,21	145	50	1,5	1,85	50	ВВГнг 4х50
L_1	81,48	95	25	1,5	3,86	25	ВВГнг 4х25
L_2	40,51	42	6	1,5	5,97	6	ВВГнг 4х6
L_3	40,74	42	6	1,5	4,5	6	ВВГнг 4х6
L_4	124,76	145	50	1,5	3,55	50	ВВГнг 4х50
L_5	59,26	75	16	1,5	2,46	16	ВВГнг 4х16
L_6	55,56	75	16	1,5	1,15	16	ВВГнг 4х16
L_7	35,71	42	6	1,5	3,29	6	ВВГнг 4х6
L_8	42,23	55	10	1,5	3,47	10	ВВГнг 4х10
L_9	8,40	19	1,5	1,5	5,57	1,5	ВВГнг 4х1,5
L_{10}	12,67	19	1,5	1,5	3,47	1,5	ВВГнг 4х1,5
L_{11}	22,22	25	2,5	1,5	5,26	2,5	ВВГнг 4х2,5
L_{12}	21,72	25	2,5	1,5	3,57	2,5	ВВГнг 4х2,5
L_{13}	5,43	19	1,5	1,5	3,34	1,5	ВВГнг 4х1,5
L_{14}	21,43	25	2,5	1,5	2,84	2,5	ВВГнг 4х2,5

2.4. Розрахунок струмів КЗ

Коротке замикання (КЗ) є найбільш небезпечним аварійним режимом для мереж будівельного майданчика. В умовах будівництва ризик виникнення КЗ значно зростає через високу ймовірність механічного пошкодження кабелів будівельною технікою, роботу в умовах підвищеної вологості та тимчасовий характер прокладання ліній.

Розрахунок струмів короткого замикання виконується з метою отримання вихідних даних для подальшого вибору захисної апаратури. Знання величин струмів КЗ дозволить у наступних розділах правильно підібрати номінали автоматичних вимикачів у РП1, РП2, РП3 та перевірити їх на здатність розривати аварійні струми (комутаційну здатність). За основу розрахунку прийнято трифазне коротке замикання, оскільки воно характеризується найбільшими значеннями струмів у магістральних мережах об'єкта.

Основними наслідками КЗ є перегрів провідників, що може призвести до руйнування ізоляції та виникнення пожежі, а також значне падіння напруги, яке критично впливає на роботу електродвигунів кранів та насосів. Для локалізації аварійної ділянки передбачається встановлення швидкодіючих автоматичних вимикачів.

Для виконання обчислень складено розрахункову схему заміщення (рис. 4.1), де позначено характерні точки на шинах ГРЩ та на ввідних пристроях розподільчих пунктів. Саме в цих точках буде розраховано очікувані струми короткого замикання.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

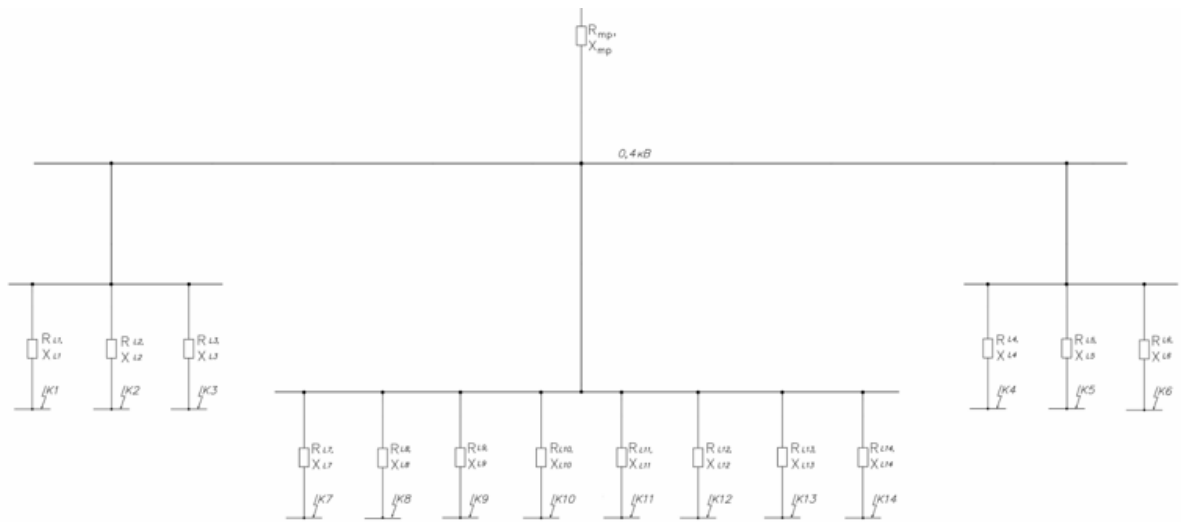


Рисунок 4.1 – Схема КЗ

2.4.1 Розрахунок струмів КЗ в мережах напругою до 1000 В

При розрахунку струмів КЗ визначаються наступні величини:

I'' - діюче значення початкового зверхперехідного струму для вибору уставки для вибору уставок спрацювання швидкодіючого захисту;

I_{∞} - усталений струм КЗ для перевірки на термічну стійкість електричних апаратів та кабелів;

i_y - миттєве значення ударного струму КЗ для перевірки електричних апаратів на динамічну стійкість;

I_y - найбільше діюче значення повного струму КЗ для перевірки електричних апаратів на динамічну стійкість на протязі першого періоду КЗ;

I_i - діюче значення повного струму КЗ для довільного моменту часу для вибору t вимикачів за відмикаючим струмом;

S_t - потужність КЗ для довільного моменту часу для перевірки вимикача за відключаючою ним потужністю.

При розрахунку струмів КЗ в мережі напругою до 1000 В потрібно враховувати опір всіх елементів схеми, а також врахування активної та реактивної складової опору.

Величина активного опору лінії визначається за перерізом:

$$R = r_0 \cdot L = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot L \quad (2.16)$$

Величина реактивного опору лінії визначається за питомим опором:

$$X = x_0 \cdot L \quad (2.17)$$

Питомий індуктивний опір лінії приймаємо: для кабельних ЛЕП напругою до 1 кВ - 0,07 Ом/км; до 10 кВ - 0,08, Ом/км

Трифазний струм КЗ:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x)^2}} \quad (2.18)$$

де U_{cp} - середня номінальна напруга ступіні КЗ (690,400, 230,133 В)

$\sum r, \sum x$ - сума активних і реактивних опорів до точки КЗ, Ом.

Опір трансформатора:

$$R_T = \Delta P_K / (3 \cdot I_{H.T.}^2) \quad (2.19)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (2.20)$$

$$Z_T = U_K \cdot U_{C.H.} / 100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{H.T.} \quad (2.21)$$

де: ΔP_K - втрати короткого замикання трансформатора, Вт; $I_{H.T.}$ - номінальний струм вторинної обмотки трансформатора. А; U_K - напруга короткого замикання трансформатора, %.

$$I_{H.T.} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 577,35 \text{ А}; \quad (2.22)$$

$$Z_{Tp} = \frac{U_k \cdot U_{CH}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{H.T.}} = \frac{4,5 \cdot 400}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 577,35} = 0,018 \text{ Ом};$$

$$R_{Tp} = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_{H.T.}^2} = \frac{5500}{3 \cdot 577,35^2} = 0,0055 \text{ Ом};$$

$$X_{Tp} = \sqrt{Z_{Tp}^2 - R_{Tp}^2} = \sqrt{0,018^2 - 0,0055^2} = 0,017 \text{ Ом};$$

Активний опір кабельних ліній, що живить споживачів низької напруги (Ом) (довжину КЛ переводимо в кілометри):

$$R_{L1} = \frac{1000}{\gamma \cdot S_{M.K1}} \cdot L_1 = \frac{1000}{50 \cdot 25} \cdot 0,05 = 0,04 \text{ Ом};$$

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реактивний опір кабельних ліній, що живить споживачів низької напруги
 $x_0=0,07$ Ом/км - реактивний опір КЛ, $U < 1$ кВ довжиною 1 км;

$$X_{L1} = x_0 \cdot L_1 = 0,07 \cdot 0,05 = 0,035 \text{ Ом};$$

Заносимо розраховані значення до табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Опори елементів мережі у іменованих одиницях

Елемент мережі	R, Ом	X, Ом
Трансформатори ТМ-400	0,0055	0,017
L ₁	0,04	0,0035
L ₂	0,12	0,0025
L ₃	0,10	0,0021
L ₄	0,02	0,0035
L ₅	0,04	0,0021
L ₆	0,02	0,0011
L ₇	0,08	0,0018
L ₈	0,08	0,0028
L ₉	0,60	0,0032
L ₁₀	0,27	0,0014
L ₁₁	0,20	0,0018
L ₁₂	0,16	0,0014
L ₁₃	0,60	0,0032
L ₁₄	0,12	0,0011

Розрахуємо сумарний опір до кожної точки КЗ:

Точка К_{тр}: Опір складається з опору трансформатора ТМ-400:

$$\sum R_{K_{тр}} = R_{Tp} = 0,0055 \text{ Ом};$$

$$\sum X_{K_{тр}} = X_{Tp} = 0,017 \text{ Ом};$$

$$Z_{K_{тр}} = \sqrt{(\sum R_{K_{тр}})^2 + (\sum X_{K_{тр}})^2} = \sqrt{0,0055^2 + 0,017^2} = 0,018 \text{ Ом};$$

Точка К₁: Складається з опорів трансформатора ТМ-400 та лінії:

$$\sum R_{K1} = R_{Tp} + R_{L1} = 0,0055 + 0,04 = 0,0455 \text{ Ом};$$

$$\sum X_{K1} = \sum X_{Tp} + X_{L1} = 0,017 + 0,0035 = 0,0205 \text{ Ом};$$

$$Z_{K1} = \sqrt{(\sum R_{K1})^2 + (\sum X_{K1})^2} = \sqrt{0,0455^2 + 0,0205^2} = 0,0499 \text{ Ом};$$

Для точок К2 – К14 розрахунок аналогічний точці К1. Результати заносимо в табл. 2.11

Таблиця 2.11 – Опори до точок КЗ

Точка	$\sum R_K$	$\sum X_K$	Z_K
К _{тр}	0,0055	0,017	0,018
К1	0,0455	0,0205	0,0499
К2	0,1222	0,0195	0,1237
К3	0,1055	0,0191	0,1072
К4	0,0255	0,0205	0,0327
К5	0,0430	0,0191	0,0471
К6	0,0243	0,0181	0,0302
К7	0,0888	0,0188	0,0908
К8	0,0855	0,0198	0,0878
К9	0,6055	0,0202	0,6058
К10	0,2722	0,0184	0,2728
К11	0,2055	0,0188	0,2064
К12	0,1655	0,0184	0,1665
К13	0,6055	0,0202	0,6058
К14	0,1255	0,0181	0,1268

Розрахунок струмів КЗ для точок

а) діюче значення струму трифазного КЗ для і-ої точки ланцюга

$$I_{Kтр}^3 = \frac{U_{с.н.}}{\sqrt{3} \cdot Z_{Kтр}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,018} = 12,83 \text{ кА};$$

$$I_{K1}^3 = \frac{U_{с.н.}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,0499} = 4,63 \text{ кА};$$

б) струм двофазного короткого замикання

$$I_{Kтр}^2 = \frac{U_{с.н.}}{2 \cdot Z_{Kтр}} = \frac{400}{2 \cdot 0,018} = 11,11 \text{ кА};$$

$$I_{K1}^2 = \frac{U_{C.H.}}{2 \cdot Z_{K1}} = \frac{400}{2 \cdot 0,0499} = 4,01 \text{ кА};$$

в) миттєве значення ударного струму КЗ через півперіод (0.01с) після виникнення КЗ

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_K^3 + 6,5 \cdot \sum I_H; \quad (2.23)$$

де: k_y - ударний коефіцієнт; $k_y = 1,2...1,3$ при короткому замиканні на шинах підстанції, $k_y = 1$ при короткому замиканні у віддаленій точці; $\sum I_H$ - сума номінальних струмів асинхронних двигунів потужністю понад 100 кВ·А.

$$i_{yKтр} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{Kтр}^3 = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,83 = 23,59 \text{ кА};$$

$$i_{yK1} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K1}^3 = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,63 = 6,54 \text{ кА};$$

г) діюче значення повного струму КЗ

$$I_{yKтр} = I_{Kтр}^3 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 12,83 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,3 - 1)^2} = 13,93 \text{ кА};$$

$$I_{yK1} = I_{K1}^3 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 4,63 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1 - 1)^2} = 4,63 \text{ кА};$$

Заносимо розраховані значення до табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Розрахунок струмів КЗ у іменованих одиницях

Точка КЗ	U_{CH}, B	R, Ом	X, Ом	Z, Ом	$I_K^{(3)}, \text{кА}$	$I_K^{(2)}, \text{кА}$	$i_y, \text{кА}$	$I_y, \text{кА}$
Kтр	400	0,0055	0,017	0,018	12,83	11,11	23,59	13,93
K1	400	0,04	0,0035	0,0517	4,63	4,01	6,54	4,63
K2	400	0,12	0,0025	0,1244	1,87	1,62	2,64	1,87
K3	400	0,10	0,0021	0,1080	2,15	1,87	3,05	2,15
K4	400	0,02	0,0035	0,0354	7,06	6,11	9,98	7,06
K5	400	0,04	0,0021	0,0488	4,91	4,25	6,94	4,91
K6	400	0,02	0,0011	0,0328	7,64	6,62	10,80	7,64
K7	400	0,08	0,0018	0,0917	2,54	2,20	3,60	2,54
K8	400	0,08	0,0028	0,0888	2,63	2,28	3,72	2,63
K9	400	0,60	0,0032	0,6060	0,38	0,33	0,54	0,38
K10	400	0,27	0,0014	0,2731	0,85	0,73	1,20	0,85
K11	400	0,20	0,0018	0,2068	1,12	0,97	1,58	1,12
K12	400	0,16	0,0014	0,1670	1,39	1,20	1,96	1,39
K13	400	0,60	0,0032	0,6060	0,38	0,33	0,54	0,38
K14	400	0,12	0,0011	0,1274	1,82	1,58	2,58	1,82

2.5. ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Вибір комутаційної та захисної апаратури для об'єкта має здійснюватися з урахуванням умов експлуатації та згідно з вимогами ПУЕ. Для забезпечення надійної роботи електромереж напругою до 0,4 кВ передбачається використання сучасних серій комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) та ввідно-розподільних пристроїв у відповідному конструктивному виконанні.

Усі комутаційні апарати та шинні конструкції мають бути підібрані за умови їх тривалої роботи в нормальному режимі за номінальною напругою та розрахунковим струмом навантаження споживачів. Крім того, обладнання повинно проходити перевірку на термічну та динамічну стійкість у режимах короткого замикання. Зокрема, номінальна гранична вимикальна здатність автоматичних вимикачів ГРЩ має бути не меншою за розрахований струм трифазного КЗ (10,49 кА), що дозволить забезпечити безпечне відключення мережі при виникненні аварійних режимів у будь-якій точці ланцюга.

2.5.1 Вибір апаратів захисту та комутації на стороні вищої напруги (10 кВ)

Для захисту силового трансформатора КТП потужністю 400 кВА на стороні вищої напруги (ВН) передбачається встановлення роз'єднувача та високовольтних запобіжників. Вибір здійснюється за номінальною напругою та робочим струмом трансформатора.

Розрахунок номінального струму на стороні 10 кВ:

$$I_{ВН} = \frac{S_{ном}}{U_{ВН} \cdot \sqrt{3}} = \frac{400}{10 \cdot \sqrt{3}} = 23,1 \text{ А};$$

Для надійного захисту від струмів КЗ та відлаштування від кидків намагнічування при ввімкненні трансформатора, струм плавкої вставки обирається з умови $I_{ЗП} \geq (1,5 \dots 2) \cdot I_{ВН}$:

$$23,1 \cdot 1,5 = 34,65 \text{ А};$$

Приймаємо до встановлення запобіжник серії ПКТ-101-10-40-20У3 з номінальним струмом плавкої вставки 40 А та струмом відключення 20 кА.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для створення видимого розриву кола та безпечного обслуговування трансформатора обирається роз'єднувач зовнішньої установки. Приймаємо до встановлення роз'єднувач серії РЛНД-1-10/400 У1 ($U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$, $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$).

2.5.2 Вибір пускатів

Магнітні пускачі добирають за номінальною напругою мережі $U_{\text{н.м.}}$ номінальним струмом керованого двигуна $I_{\text{н.д.}}$ а також за потужністю та режимом роботи двигуна:

$$I_{\text{н.п.}} \geq I_{\text{н.д.}}; U_{\text{н.п.}} = U_{\text{н.м.}}; P_{\text{м.}j} \geq P_{\text{м.д.}} \quad (2.24)$$

де: $I_{\text{н.п.}}$, $U_{\text{н.п.}}$ - номінальний струм і напруга пускача; $P_{\text{м.}j}$ - максимальна потужність керованого пускатем, двигуна залежно від j -ї категорії застосування контактора за ГОСТ 11206-77Е; $P_{\text{н.д.}}$ - номінальна потужність двигуна.

Обраний пускач перевіряють за розривною здатністю при наявності максимального захисту:

$$I_{\text{р.п.}} \geq 1,2 \cdot I_{\text{К}}^{(3)} \quad (2.25)$$

де: $I_{\text{р.п.}}$ - граничний струм до вимикається; $I_{\text{К}}^{(3)}$ - струм трифазного короткого замикання на виході пускача.

Для захисту відгалуження з одним електродвигуном з короткозамкненим ротором уставка спрацювання захисту пускача $I_{\text{у.п.}}$ вибирається за умовою:

$$I_{\text{у.п.}} \geq I_{\text{р}}, \quad (2.26)$$

Перевірка надійності спрацювання захисту при мінімальному струмі КЗ:

$$I_{\text{К.мін}}^{(2)} / I_{\text{у.п.}} \geq 1,5. \quad (2.27)$$

Результати вибору магнітних пускатів для силових ліній наведені в таблиці 2.13.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 2.13 – Вибір магнітних пускачів

№ лінії	Споживач	Розрахунковий струм I_p , А	Марка / Номінал пускача, А
1	Баштовий кран	81,48	ПМЛ-5100 (100 А)
2	Кран-перевантажувач	40,51	ПМЛ-4100 (63 А)
3	Підйомник вантажний	40,74	ПМЛ-4100 (63 А)
4	Станція термообробки	124,76	ПМЛ-6100 (160 А)
5	Насоси розчину	59,26	ПМЛ-4100 (63 А)
6	Насос поршневий	55,56	ПМЛ-4100 (63 А)
8	Токарно-гвинторізний верстат	42,23	ПМЛ-4100 (63 А)
9	Трубогібний верстат	8,40	ПМЛ-1100 (10 А)
10	Ножиці механічні	12,67	ПМЛ-2100 (16 А)
11	Транспортер вантажний	22,22	ПМЛ-2100 (25 А)
12	Верстат-різак металообробний	21,72	ПМЛ-2100 (25 А)
13	Свердлильний верстат	5,43	ПМЛ-1100 (10 А)

2.5.3 Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі виконують функцію захисту електричних ліній від перевантажень та коротких замикань. На відміну від запобіжників, вони є апаратами багаторазової дії та забезпечують одночасне вимкнення всіх фаз мережі.

Вибір апаратів захисту здійснюється за трьома основними умовами:

$$I_{н.а.} \geq I_p; U_{н.а.} = U_{н.м.}; I_{в.} \geq 1,2 \cdot I_K^{(3)} \quad (2.28)$$

де $I_{н.а.}$, $U_{н.а.}$ – номінальні струми та напруги автомата; $I_{в.}$ - граничний струм автомата, що вимикається; $I_K^{(3)}$ - струм трифазного короткого замикання на входних затискачах автоматичного вимикача.

Для забезпечення надійної роботи при пуску двигунів, струм уставки електромагнітного розчеплювача $I_{у.а.}$ (відсічка) має задовольняти умові:

$$I_{у.а.} \geq I_{пуск} \cdot 1,2 \quad (2.29)$$

де: $I_{пуск}$ - пусковий струм електродвигуна. Для ліній з двигунами прийнято використовувати автомати з характеристикою типу D або C.

Вибране значення перевіряється на чутливість до мінімального струму КЗ:

$$I_{K.min}^{(2)} / I_{у.а} \geq 1,25 \quad (2.30)$$

Результати вибору автоматичних вимикачів для розподільної мережі наведені в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Вибір автоматичних вимикачів

№ лінії	Споживач	I_p , А	$I_K^{(3)}$, кА	Номінал АВ, А	Обраний автомат (тип/марка)
1	Баштовий кран	81,48	4,47	100	iC120H 100A (D)
2	Кран-перевантажувач	40,51	1,86	50	iC60H 50A (D)
3	Підйомник вантажний мачтовий	40,74	2,14	50	iC60H 50A (D)
4	Станція термообробки бетону	124,76	6,53	160	iC120H 125A (C)
5	Насоси розчину	59,26	4,73	63	iC60H 63A (C)
6	Насос поршневий	55,56	7,05	63	iC60H 63A (C)
7	Зварювальні трансформатори (ПВ = 25%)	35,71	2,52	40	iC60H 40A (D)
8	Токарно-гвинторізний верстат	42,23	2,60	50	iC60H 50A (C)
9	Трубогибний верстат	8,40	0,38	10	iC60H 10A (C)

10	Ножиці механічні	12,67	0,85	16	iC60H 16A (C)
11	Транспортер вантажний	22,22	1,12	25	iC60H 25A (D)
12	Верстат-різак металообробний	21,72	1,38	25	iC60H 25A (C)
13	Свердлильний верстат	5,43	0,38	6	iC60H 6A (C)
14	Побутові приміщення	21,43	1,81	25	iC60H 25A (C)

Висновок по розділу №2

У даному розділі дипломної роботи було розроблено систему електропостачання будівельного майданчика та виконано основні електротехнічні розрахунки, необхідні для забезпечення надійної та безпечної роботи електрообладнання об'єкта.

У ході роботи проведено розрахунок внутрішнього та зовнішнього освітлення будівельного майданчика. Для освітлення приміщення було обрано світлодіодні світильники LED Floodlight IP66, а для освітлення відкритого майданчика - прожектори LED Floodlight High Power. Виконані розрахунки підтвердили забезпечення нормованого рівня освітленості відповідно до вимог нормативних документів.

Було визначено розрахункові електричні навантаження всіх електроприймачів майданчика. Сумарне повне навантаження об'єкта склало 305,78 кВА. На основі отриманих результатів обрано силовий трансформатор типу ТМ-400/10/0,4 потужністю 400 кВА, який забезпечує необхідний запас потужності для стабільної роботи споживачів.

У роботі виконано вибір кабельних ліній за умовами нагріву та допустимих втрат напруги. Для живлення споживачів прийнято кабелі марки ВВГнг із мідними жилами відповідних перерізів. Проведена перевірка показала, що втрати напруги в мережі не перевищують допустимих значень, а обрані кабелі забезпечують надійну передачу електроенергії.

Також виконано розрахунок струмів короткого замикання для характерних точок мережі, що дало можливість правильно вибрати апарати захисту та комутації.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система електропостачання будівельного майданчика відповідає вимогам надійності, електробезпеки та ефективності й може бути використана для забезпечення безперебійної роботи технологічного обладнання та допоміжних систем об'єкта.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Основні припущення та трифазна математична модель електроприводу

Математичне моделювання процесів електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні (АД) є необхідною умовою для синтезу сучасних мікропроцесорних систем керування. Асинхронна машина являє собою складну нелінійну систему з розподіленими параметрами, параметри якої (особливо взаєміндуктивності) періодично змінюються залежно від просторового положення ротора.

Для отримання математичної моделі, яка з одного боку здатна з достатньою точністю описувати динамічні процеси, а з іншого - придатна для реалізації в середовищі MATLAB/Simulink, вводиться ряд класичних спрощуючих припущень (гіпотез):

1. Повітряний зазор між статором і ротором вважається рівномірним по всьому колу розточки (відсутність явної полюсності).
2. Магнітне коло машини вважається ненасиченим (крива намагнічування лінійна), що дозволяє використовувати принцип суперпозиції.
3. Розподіл магніторушійних сил (МРС) і магнітної індукції в зазорі вздовж кола статора вважається синусоїдальним. Вищі просторові гармоніки ігноруються.
4. Втратами в сталі магнітопроводу (на вихрові струми та гістерезис) нехтують.
5. Поверхневий ефект (витіснення струму) в пазах короткозамкненого ротора не враховується, отже, активні опори обмоток є постійними.

На основі цих припущень будується еквівалентна трифазна розрахункова схема узагальненої електричної машини.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	Лім.Лім		АркушівАрку
Розроб.		Бондарчук О.						
Перевір.		Мугенов Д. Д.						
Реценз.						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21		
Н. Контр.		Кулаковський Л.						
Затверд.		Бойченко С.						

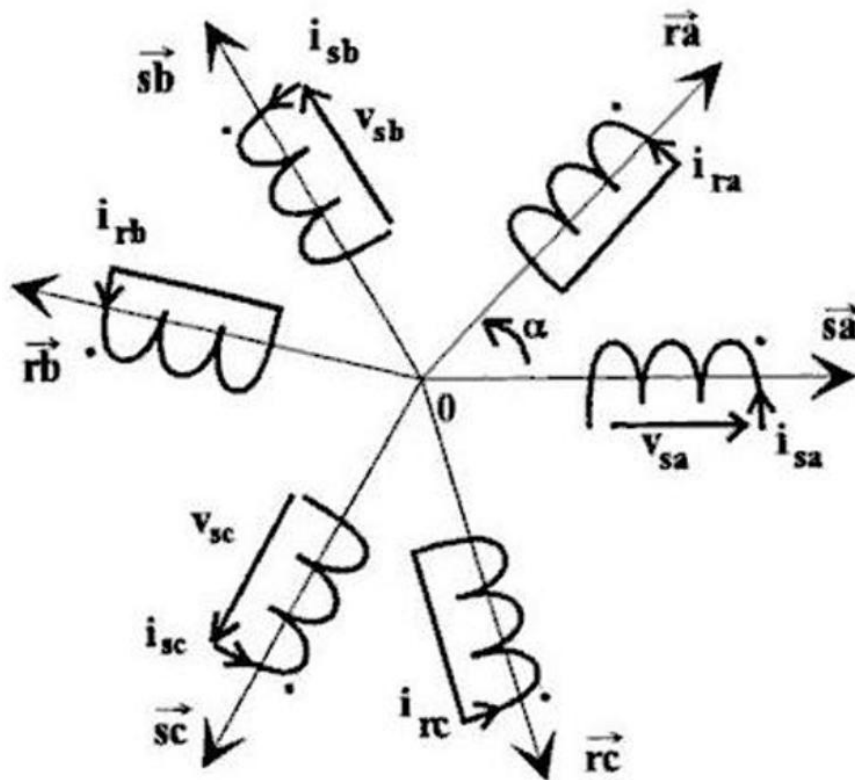


Рис. 3.1 – Просторова кінематична схема розташування обмоток статора і ротора асинхронної машини

Відповідно до законів Кірхгофа та Фарадея, рівняння електричної рівноваги для трифазних обмоток статора і ротора можна записати у матричній формі:

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sabc}]$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{rabc}]$$

де:

$[V_{sabc}]$, $[V_{rabc}]$ – вектори-стовпці фазних напруг статора і ротора відповідно;

$[I_{sabc}]$, $[I_{rabc}]$ – вектори-стовпці фазних струмів;

$[\Psi_{sabc}]$, $[\Psi_{rabc}]$ – вектори-стовпці потокозчеплень фаз статора і ротора;

$[R_s]$, $[R_r]$ – діагональні матриці активних опорів обмоток.

Оскільки для проектованого механізму підйому використовується двигун 4МТКМ 250 М4 з короткозамкненим ротором, напруги на обмотках ротора дорівнюють нулю:

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Зв'язок між потокозчепленнями та струмами фаз визначається через індуктивності обмоток. Через обертання ротора взаємні індуктивності між фазами статора і ротора безперервно змінюються як функція кута повороту θ . Загальна матрична система потокозчеплень має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sabc} \\ \Psi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{ss} & \mathcal{L}_{sr}(\theta) \\ \mathcal{L}_{rs}(\theta) & \mathcal{L}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix}$$

Матриці власних і взаємних індуктивностей статора $[\mathcal{L}_{ss}]$ та ротора $[\mathcal{L}_{rr}]$ є симетричними і незалежними від кута повороту θ :

$$\mathcal{L}_{ss} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, \quad \mathcal{L}_{rr} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

де l_s, l_r – власні індуктивності однієї фази;

m_s, m_r – взаємоіндуктивності між фазами.

Матриця взаємоіндуктивностей між статором і ротором $[\mathcal{L}_{sr}(\theta)]$ є функцією кута просторового положення ротора θ і має наступний вигляд:

$$\mathcal{L}_{sr}(\theta) = \mathcal{L}_{rs}^T(\theta) = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Наведена система диференціальних рівнянь у природній трифазній системі координат abc містить періодичні коефіцієнти, що робить її практично непридатною для безпосереднього розв'язання та побудови системи автоматичного керування. Для усунення цієї нелінійності необхідно виконати перетворення змінних до спеціальних ортогональних систем координат.

3.2. Координатні перетворення та двофазна математична модель електродвигуна

Як було показано в підрозділі 3.1, математична модель асинхронного двигуна в природних фазних осях А, В, С є системою диференціальних рівнянь зі змінними в часі коефіцієнтами. Розв'язання такої системи в режимі реального часу для синтезу керуючих впливів є вкрай складним завданням.

Для подолання цієї проблеми у сучасній теорії електроприводу застосовують метод перетворення координат. Суть методу полягає у переході від трифазної системи А, В, С до еквівалентної двофазної системи d-q, яка обертається в просторі з довільною швидкістю ω_s . Цей перехід здійснюється у два етапи за допомогою матричних перетворень Кларка та Парка.

1. Перетворення Кларка

Перший етап полягає у переході від трифазної нерухомої системи координат статора А, В, С до двофазної еквівалентної нерухомої системи координат α - β . Матричне рівняння перетворення Кларка для довільної змінної X (напруги, струму або потокозчеплення) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix}$$

Множник $\sqrt{\frac{2}{3}}$ забезпечує інваріантність (незмінність) потужності при переході між системами координат.

2. Перетворення Парка

Другий етап – це перехід від нерухомої двофазної системи α - β до обертової двофазної системи координат d-q, яка обертається синхронно з вектором магнітного потоку поля статора (зі швидкістю ω_s). Перетворення здійснюється за допомогою матриці повороту, де θ_s – кут просторового положення обертової системи координат:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}$$

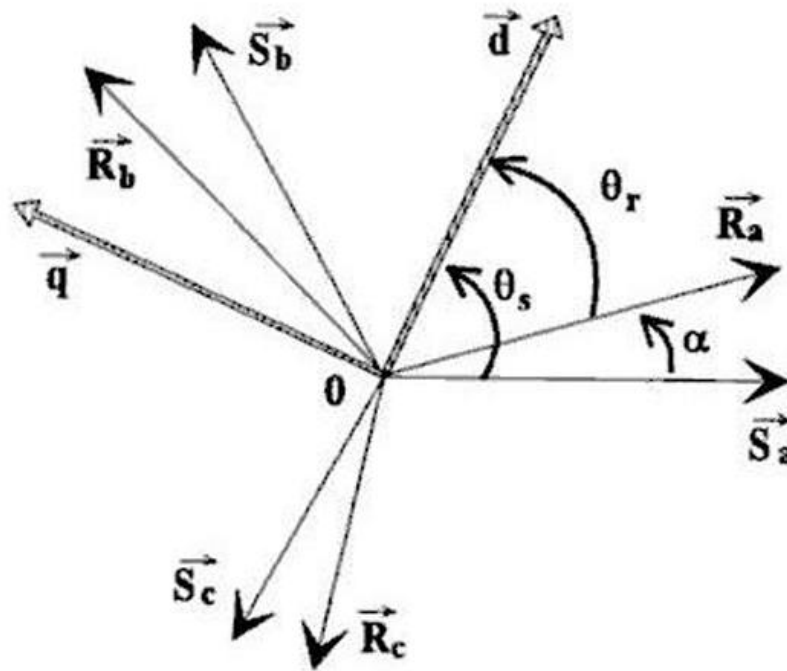


Рис. 3.2 – Векторна діаграма просторового положення нерухомих та обертових систем координат

3. Динамічна модель двигуна в осях d-q

Застосувавши вищенаведені перетворення до рівнянь узагальненої машини, отримуємо математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у системі координат d-q. Усі коефіцієнти взаємодуктивності в цій системі стають постійними.

Рівняння електричної рівноваги напруг статора і ротора:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_s \Psi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_s \Psi_{sd}$$

$$0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{rq}$$

$$0 = R_r I_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{rd}$$

де R_s , R_r – активні опори статора і ротора двигуна 4МТКМ 250 М4;

ω_r – електрична кутова швидкість обертання ротора.

Рівняння потокозчеплень, які є лінійними функціями струмів:

$$\Psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}$$

$$\Psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}$$

$$\Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}$$

$$\Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}$$

де L_s, L_r – повні індуктивності статора і ротора;

L_m – взаємодуктивність магнітного кола.

4. Рівняння електромагнітного моменту та руху

Електромагнітний крутний момент T_e , що генерується двигуном, у системі d-q розраховується через векторний добуток потокозчеплень та струмів ротора і статора:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{rd} I_{sq} - \Psi_{rq} I_{sd})$$

де p – кількість пар полюсів двигуна ($p=2$).

Електромеханічний зв'язок між електричною частиною двигуна та механічною системою підйому баштового крана описується основним рівнянням руху:

$$J_\Sigma \frac{d\Omega}{dt} = T_e - M_c - f_m \Omega$$

де J_Σ – зведений до вала сумарний момент інерції приводу;

M_c – зведений статичний момент опору від вантажу масою 8 т;

f_m – коефіцієнт в'язкого тертя механізму;

Ω – механічна кутова швидкість обертання ротора.

Отримана система диференціальних рівнянь повністю описує динаміку асинхронного двигуна і є математичною базою для синтезу структури векторного керування (FOC) та імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink.

3.3. Математична модель електродвигуна у просторі станів

Для комп'ютерного моделювання динамічних систем у середовищі MATLAB (зокрема для використання вбудованих функцій розв'язання диференціальних рівнянь та синтезу лінійно-квадратичних регуляторів) найзручнішою формою запису є представлення моделі у просторі станів (State-Space representation).

Загальний вигляд системи рівнянь у просторі станів описується матричним диференціальним рівнянням стану та алгебраїчним рівнянням виходу:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

де $x(t)$ – вектор змінних стану;

$u(t)$ – вектор вхідних керуючих впливів;

$y(t)$ – вектор вихідних змінних (координат, що спостерігаються);

A – матриця системи (матриця динаміки);

B – матриця керування;

C – матриця спостереження;

D – матриця прямого зв'язку (для електромеханічних систем зазвичай $D = 0$).

Для побудови моделі асинхронного двигуна 4МТКМ 250 М4 у просторі станів, на основі рівнянь, отриманих у підрозділі 3.2, оберемо як змінні стану проекції струмів статора та потокозчеплень ротора в обертовій системі координат d-q.

Вектор стану x та вектор входу u набувають вигляду:

$$x = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}$$

Для спрощення запису матриць введемо наступні базові коефіцієнти, що характеризують електромагнітні параметри машини:

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт розсіяння: $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

Еквівалентна індуктивність статора: $L_s' = \sigma L_s$

Електромагнітна стала часу ротора: $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

Коефіцієнт магнітного зв'язку: $K_r = \frac{L_m}{L_r}$

Еквівалентний активний опір статора: $R_s' = R_s + R_r K_r^2$

Виконавши алгебраїчні перетворення системи рівнянь Парка-Горєва та розв'язавши їх відносно похідних струмів і потоків (форми Коші), отримаємо матрицю динаміки системи А розмірністю 4 x 4:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s'}{\sigma L_s} & \omega_s & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} & \frac{K_r \omega_r}{\sigma L_s} \\ -\omega_s & -\frac{R_s'}{\sigma L_s} & -\frac{K_r \omega_r}{\sigma L_s} & \frac{K_r}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

Матриця керування В розмірністю 4 x 2, яка визначає вплив напруг статора на змінні стану, записується як:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Оскільки в реальній системі керування баштовим краном вимірюванню підлягають лише фазні струми статора (за допомогою датчиків струму фаз), матриця спостереження С розмірністю 2 x 4 виділяє лише перші дві змінні стану:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Аналіз матриці А показує наявність перехресних зв'язків між осями d та q (елементи з ω_s та ω_r поза головною діагоналлю). Це підтверджує, що

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

асинхронний двигун є складною багатозв'язною нелінійною системою. Зміна напруги за однією віссю неминуче викликає перехідний процес за іншою віссю.

Саме для компенсації цих перехресних зв'язків і забезпечення незалежного керування потоком і моментом (аналогічно до двигуна постійного струму) у системі векторного керування FOC впроваджуються спеціальні компенсуючі контури у мікропроцесорній системі. Отримана State-Space модель є ідеальною математичною платформою для їх синтезу та наступного імітаційного моделювання.

3.4. Імітаційне моделювання електроприводу в MATLAB/Simulink та аналіз результатів

Для валідації розробленої математичної моделі асинхронного двигуна 4МТКМ 250 М4 у просторі станів (State-Space) було створено її віртуальний аналог у середовищі імітаційного моделювання MATLAB/Simulink. Метою моделювання є дослідження динаміки електромеханічних та електромагнітних процесів при прямому пуску двигуна та подальшому прикладанні номінального статичного навантаження, що відповідає масі вантажу баштового крана.

Структурна реалізація моделі

Глобальна імітаційна модель побудована на основі розв'язання рівнянь Парка-Горєва в обертовій системі координат d-q з використанням блоків математичних операцій та інтегрування.

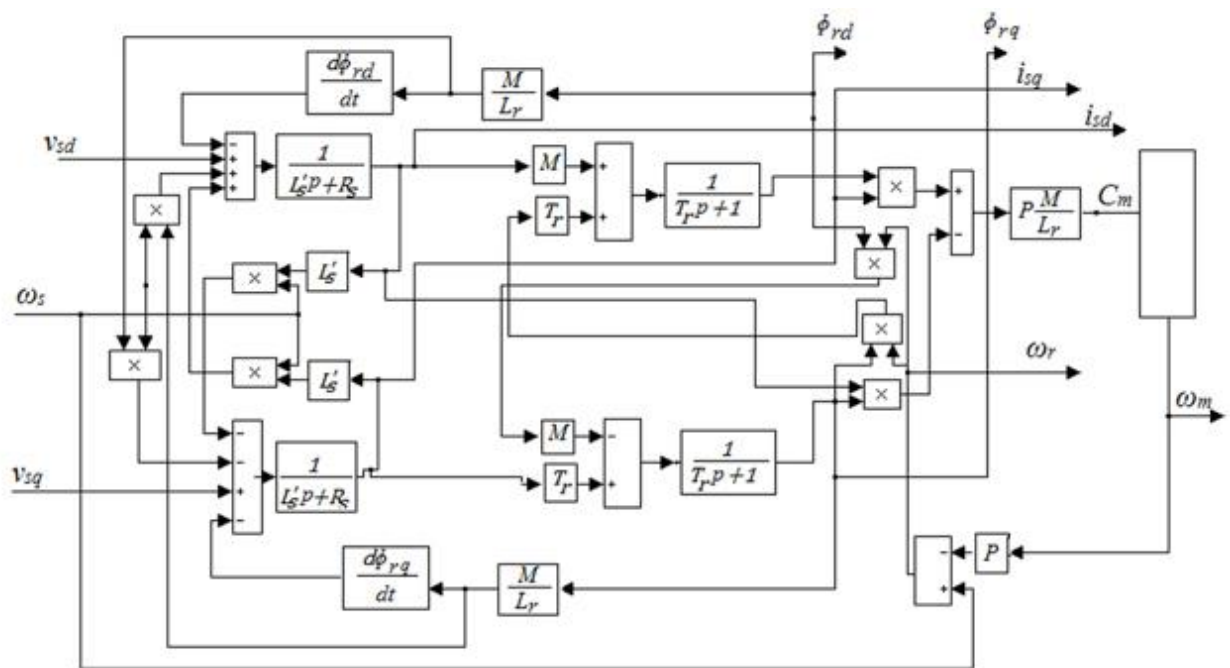


Рис. 3.3 – Глобальна імітаційна модель асинхронного двигуна в середовищі Simulink

Відповідно до рис. 3.3, структура моделі містить наступні основні підсистеми:

- Блок перетворення координат (з трифазної системи напруг мережі у двофазну обертову V_{sd} , V_{sq});
- Блок інтегрування рівнянь стану (для обчислення потокозчеплень та фазних струмів);
- Блок розрахунку електромагнітного моменту T_e ;
- Механічний блок інтегрування рівняння руху для отримання швидкості Ω .

Моделювання проводилося за допомогою методу інтегрування Рунге-Кутти зі змінним кроком, що забезпечує високу точність обчислення швидкоплинних електромагнітних перехідних процесів.

Аналіз динамічних режимів роботи

Сценарій симуляції відповідає типовому циклу роботи механізму підйому: прямий розгін двигуна з попередньо зачепленим номінальним вантажем масою 8 тонн ($M_c = 347 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

Отримані осцилограми перехідних процесів дозволяють детально оцінити поведінку приводу.

1. Динаміка швидкості ротора

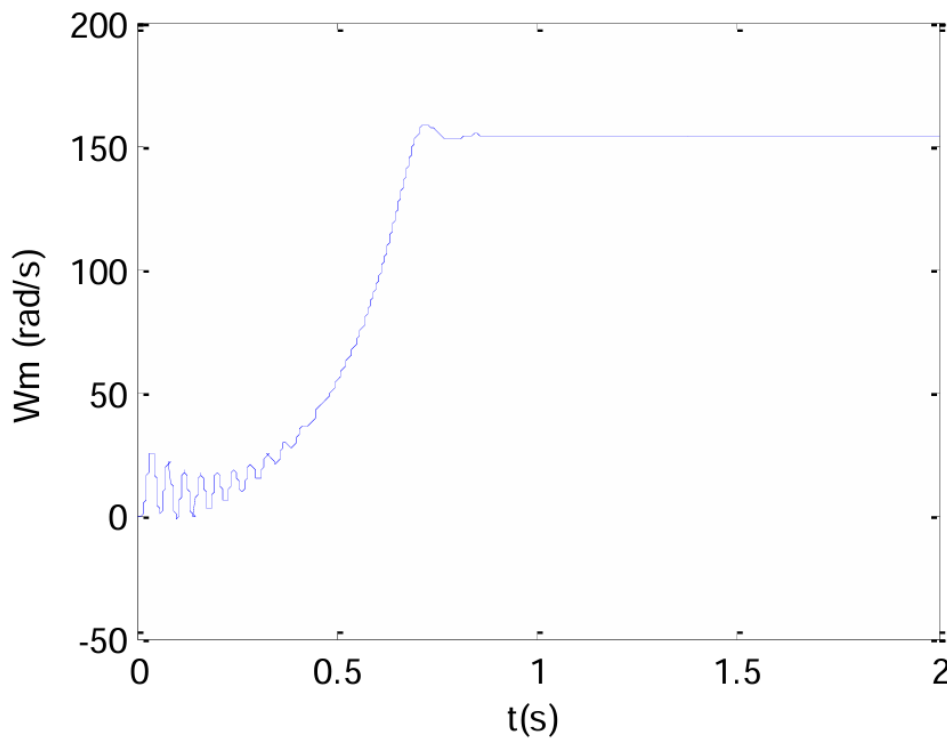


Рис. 3.4 – Перехідний процес кутової швидкості ротора при пуску та накиданні навантаження

Аналіз графіка швидкості (рис. 3.4) показує, що під час прямого пуску під навантаженням ротор двигуна інтенсивно розганяється. Після завершення перехідного процесу (близько 0.8 с) система стабілізується на номінальній робочій швидкості (1465 об/хв). Наявність статичної похибки (ковзання) відносно синхронної швидкості є фундаментальною властивістю асинхронної машини.

2. Електромагнітний крутний момент

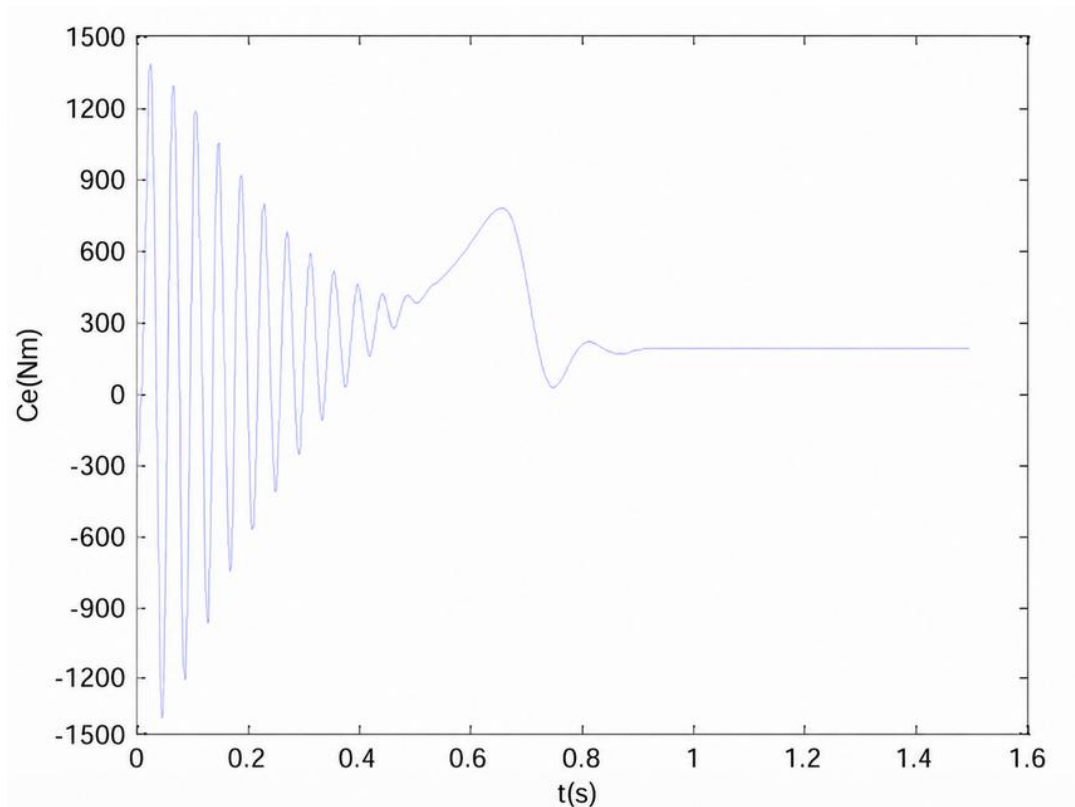


Рис. 3.5 – Динаміка електромагнітного моменту двигуна

Осцилограма на рис. 3.5 яскраво ілюструє складний коливальний характер електромагнітного моменту T_e у початковий момент часу. Ці значні пульсації зумовлені наявністю аперіодичних складових у струмах статора під час включення двигуна в мережу. Після завершення пускових коливань (близько 0.8 с) електромагнітний момент стабілізується на рівні статичного опору $M_c = 347$ Н·м, повністю врівноважуючи масу підвішеного вантажу.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано комплексне математичне та імітаційне моделювання електроприводу механізму підйому баштового крана на базі асинхронного двигуна 4МТКМ 250 М4. За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

На основі класичних рівнянь узагальненої електричної машини та застосування матричних перетворень Кларка і Парка здійснено перехід від нелінійної трифазної моделі до лінійної двофазної моделі в обертовій системі координат d-q. Це дозволило позбутися змінних у часі коефіцієнтів взаємоіндуктивності та суттєво спростити математичний опис системи.

Для забезпечення можливості використання сучасних методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання, систему диференціальних рівнянь двигуна було успішно перетворено та записано у формі простору станів (State-Space). Отримані матриці динаміки, керування та спостереження доводять наявність сильних перехресних зв'язків між магнітним потоком та електромагнітним моментом.

На базі розробленої State-Space моделі у середовищі MATLAB/Simulink побудовано адекватну імітаційну модель електроприводу та досліджено найважчий динамічний режим - прямий пуск із попередньо підвішеним номінальним вантажем (масою 8 т).

Аналіз отриманих осцилограм перехідних процесів (швидкості та електромагнітного моменту) виявив, що при прямому пуску від мережі виникають значні ударні коливання крутного моменту. Для кранового механізму такі динамічні навантаження є абсолютно неприпустимими, оскільки вони неминуче призводять до небезпечного розгойдування вантажу, надмірних пружних деформацій у вантажних канатах та прискореного зносу зубчастих передач редуктора.

Отримані результати математичного та імітаційного моделювання теоретично обґрунтовують та доводять необхідність відмови від прямого

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пуску. Для забезпечення плавного та безпечного переміщення вантажу механізм підйому повинен бути оснащений системою векторного керування (FOC) на базі перетворювача частоти.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ

4.1. Загальна функціональна схема системи автоматизації

Для практичної реалізації розробленого у попередньому розділі алгоритму векторного керування (FOC) асинхронним двигуном 4МТКМ 250 М4, необхідно спроектувати архітектуру системи автоматизації, що забезпечує виконання обчислювальних процесів у режимі реального часу та надійне керування силовими ключами інвертора.

Загальна функціональна схема системи автоматизації, що відображає взаємодію основних вузлів електроприводу, наведена на рис. 4.1.

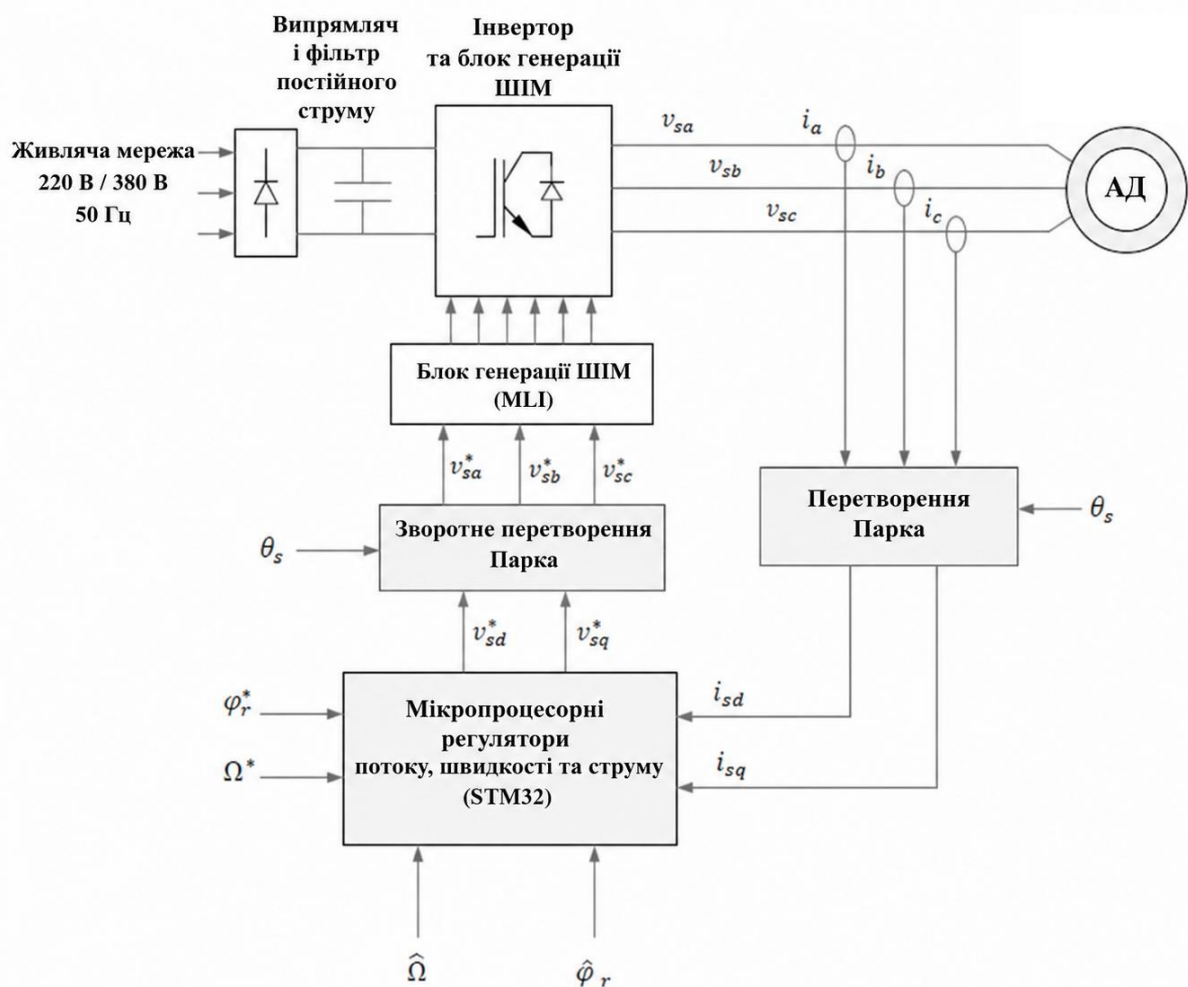


Рис. 4.1 – Загальна функціональна схема мікропроцесорної системи векторного керування

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бондарчук О.				Автоматизація	Лім.Лім		АрхивАрку
Перевір.	Мугенов Д. Д.							
Реценз.						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21		
Н. Контр.	Кулаковський Л.							
Затверд.	Бойченко С.							

Відповідно до рис. 4.1, система має дворівневу структуру, яка розділяє керуючі (слабкострумові) та силові (високовольтні) ланцюги. Основні вузли системи включають:

- Мікропроцесорний блок (MCU): є інтелектуальним ядром системи, що реалізує програмний код векторного керування. Блок отримує дані від датчиків зворотного зв'язку, обробляє їх, розраховує необхідні значення напруг за осями d-q та формує команди для силового інвертора.
- Силовий інвертор (Inverter): напівпровідниковий перетворювач, що отримує керуючі сигнали від MCU (через драйвери транзисторів) і формує трифазну напругу змінної амплітуди та частоти для живлення обмоток статора двигуна.
- Електродвигун (Induction Motor - IM): керований об'єкт, асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, на валу якого встановлено датчик зворотного зв'язку.
- Канал зворотного зв'язку: система датчиків, що включає вимірювачі фазних струмів та швидкості (положення ротора). Дані датчики забезпечують замикання контурів регулювання, що є обов'язковою умовою для стабільної роботи алгоритму FOC.

Важливою особливістю запропонованої схеми автоматизації є наявність вузлів гальванічної розв'язки. Ці елементи забезпечують електричну ізоляцію між чутливими входами мікроконтролера та силовими колами інвертора, що захищає керуючу електроніку від високочастотних завад та аварійних напруг, які можуть виникати під час комутації силових IGBT-транзисторів.

Така структура системи автоматизації є класичною для сучасних високоточних кранових електроприводів, оскільки дозволяє мінімізувати час реакції системи на зміну навантаження та забезпечити необхідну плавність руху підйомного механізму.

4.2. Обґрунтування вибору та опис мікропроцесорної платформи

STM32F407VG

Вибір мікроконтролера є визначальним етапом проектування системи автоматизації, оскільки він має забезпечити виконання складного алгоритму векторного керування (FOC) у реальному часі. Для керування асинхронним двигуном 4МТКМ 250 М4 було обрано 32-бітний мікроконтролер серії STM32F4 на базі ядра ARM Cortex-M4 - STM32F407VG від компанії STMicroelectronics.

Архітектурні особливості ядра

Мікроконтролер STM32F407VG побудований на архітектурі ARM Cortex-M4, яка оптимізована для задач цифрової обробки сигналів (DSP). На відміну від 8-бітних чи навіть ранніх 16-бітних рішень, ця архітектура має:

- Апаратний модуль FPU (Floating Point Unit): дозволяє виконувати операції з числами з плаваючою комою за один такт. Це критично важливо для матричних обчислень у моделі стану (State-Space), де коефіцієнти розсіяння σ та сталі часу T_r мають дробові значення.
- Тактова частота до 168 МГц: забезпечує запас продуктивності для паралельного виконання основного алгоритму керування та фонових завдань (діагностика, зв'язок по CAN-шині).

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

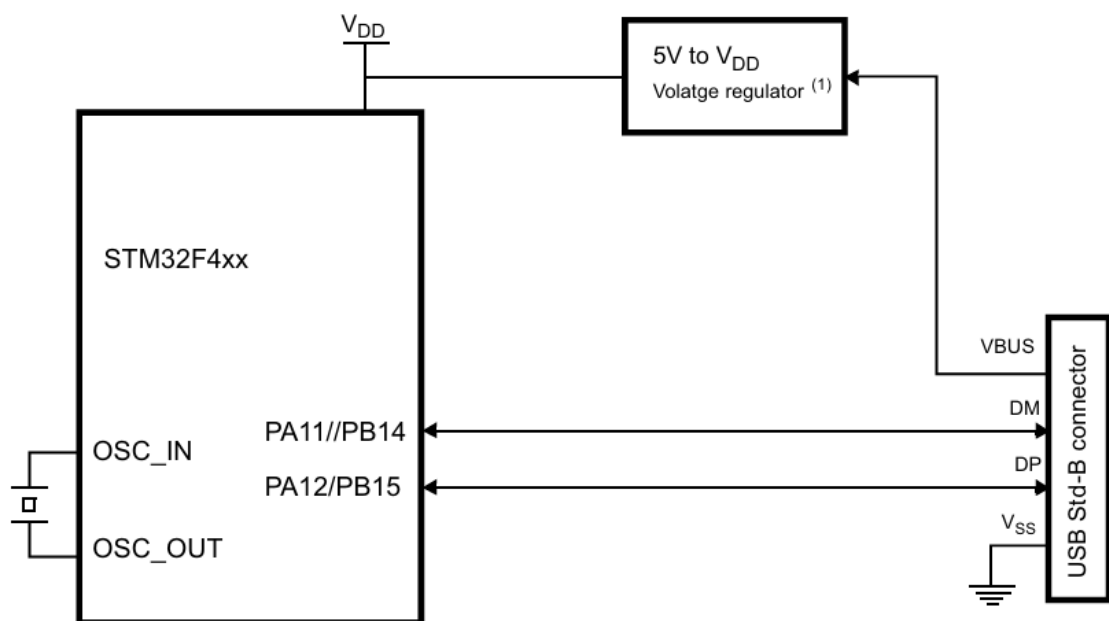


Рис. 4.2 – Блок-схема архітектури мікроконтролера STM32F407VG

Периферійні вузли для керування електроприводом

Успішна реалізація FOC залежить від якості периферії, яка безпосередньо взаємодіє з силовими компонентами інвертора.

1. Таймери (Advanced-control timers - TIM1, TIM8):

Це найважливіший вузол для генерації ШІМ (PWM). На відміну від стандартних таймерів, TIM1/TIM8 підтримують:

- Комплементарні виходи: генерація сигналів для верхнього та нижнього плеча IGBT-транзисторів одночасно.
- Dead-time insertion (апаратний мертвий час): автоматичне додавання паузи між перемиканнями транзисторів, що виключає можливість "наскрізного" струму та виходу інвертора з ладу.
- Центральне вирівнювання (Center-aligned mode): режим ШІМ, при якому перемикання відбувається симетрично, що значно знижує рівень електромагнітних завад у силових колах.

2. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП):

Для роботи контуру струму потрібно зчитувати миттєві значення фазних струмів статора. Контролер STM32F407 має три незалежні 12-бітні АЦП.

- Час перетворення: 0.5 мкс.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

- Синхронізація: АЦП працюють у тандемі з таймерами ШІМ - це дозволяє виконувати вимірювання струму чітко у той момент, коли ключі інвертора знаходяться у стабільному стані, що виключає похибки через комутаційні шуми.

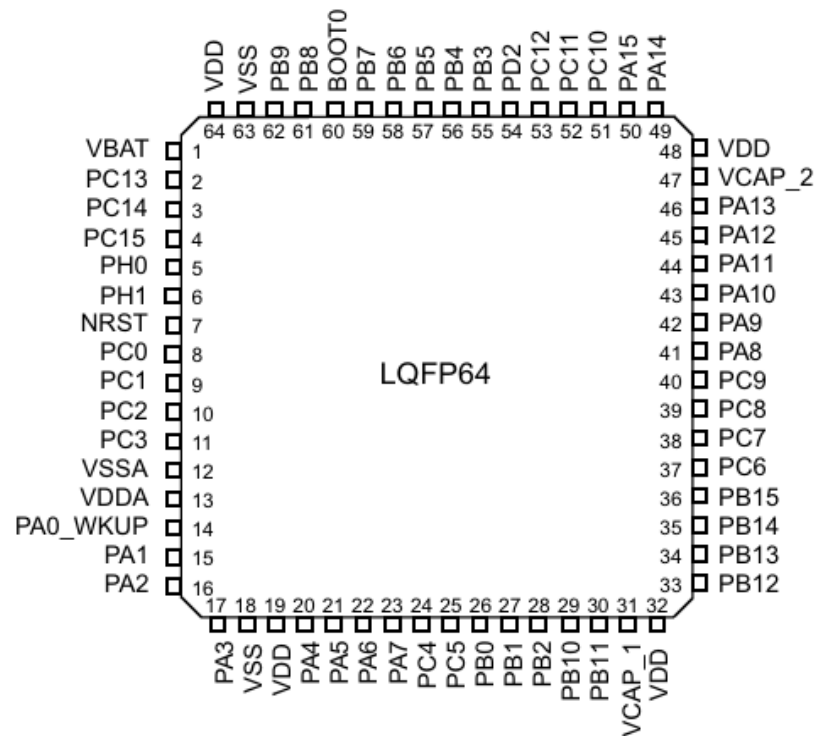


Рис. 4.3 – Розташування виводів мікроконтролера STM32F407VG (корпус LQFP100)

Підсистема зв'язку з датчиками (Енкодер)

Для визначення кута повороту вала двигуна (кут θ_s , необхідний для перетворення Парка) мікроконтролер використовує спеціалізований режим роботи таймерів - Encoder Interface Mode. Цей апаратний режим дозволяє рахувати імпульси з енкодера без залучення ресурсів центрального процесора (CPU), що дозволяє вивільнити обчислювальну потужність для виконання алгоритму регулювання.

4.3. Вибір силового перетворювача (інвертора) та системи захисту

Для керування асинхронним двигуном 4МТКМ 250 М4 потужністю 55 кВт, обрана мікропроцесорна система на базі STM32F407VG повинна бути доповнена силовим перетворювачем (інвертором). Зважаючи на високу потужність об'єкта керування та вимоги до надійності, було обрано концепцію використання інтелектуального силового модуля (IPM). Враховуючи номінальну потужність двигуна (55 кВт) та можливі пускові перевантаження, для реалізації силової частини обрано модуль Mitsubishi PM150CLA120 з номінальним струмом 150 А та робочою напругою 1200 В. Вибір 1200-вольтового виконання зумовлений необхідністю забезпечення запасу по напрузі при комутаційних викидах у промисловій мережі 380 В.

Обґрунтування вибору інтелектуального силового модуля (IPM)

На відміну від дискретних IGBT-транзисторів, модуль IPM включає в одному корпусі не лише силові ключі, але й вбудовані драйвери затворів, схеми захисту від перевантаження за струмом, короткого замикання та перегріву.

Переваги використання IPM для кранового електроприводу:

- Компактність: мінімізація довжини провідників силового кола, що знижує паразитну індуктивність та рівень перенапруг при комутації.
- Вбудовані функції захисту: модуль має вихід сигналу "Fault" (аварія), який миттєво повідомляє мікроконтролер STM32 про критичну ситуацію (наприклад, коротке замикання в обмотках двигуна), що дозволяє зупинити генерацію ШІМ до моменту пошкодження транзисторів.
- Оптимізована теплопередача: інтегрована структура забезпечує рівномірне охолодження кристалів транзисторів.

помилкового спрацювання мікроконтролера, якби він був з'єднаний гальванічно.

Логіка захисту та моніторингу

Система автоматизації підйому вантажу 8 т повинна працювати в умовах підвищеної відповідальності. Тому реалізовано дворівневу систему захисту:

- Апаратний рівень: Модуль ІРМ самостійно відключає силові ключі при фіксації струму, що перевищує поріг (наприклад, 150-200% від номінального), за час, менший ніж 5-10 мкс.
- Програмний рівень: Мікроконтролер STM32 постійно опитує стан виходу "Fault" через один із цифрових входів (GPIO). У разі активації цього сигналу, контролер негайно переходить у режим аварійної зупинки, закриваючи всі ключі інвертора та виводячи повідомлення про помилку на пульт оператора через CAN-інтерфейс.

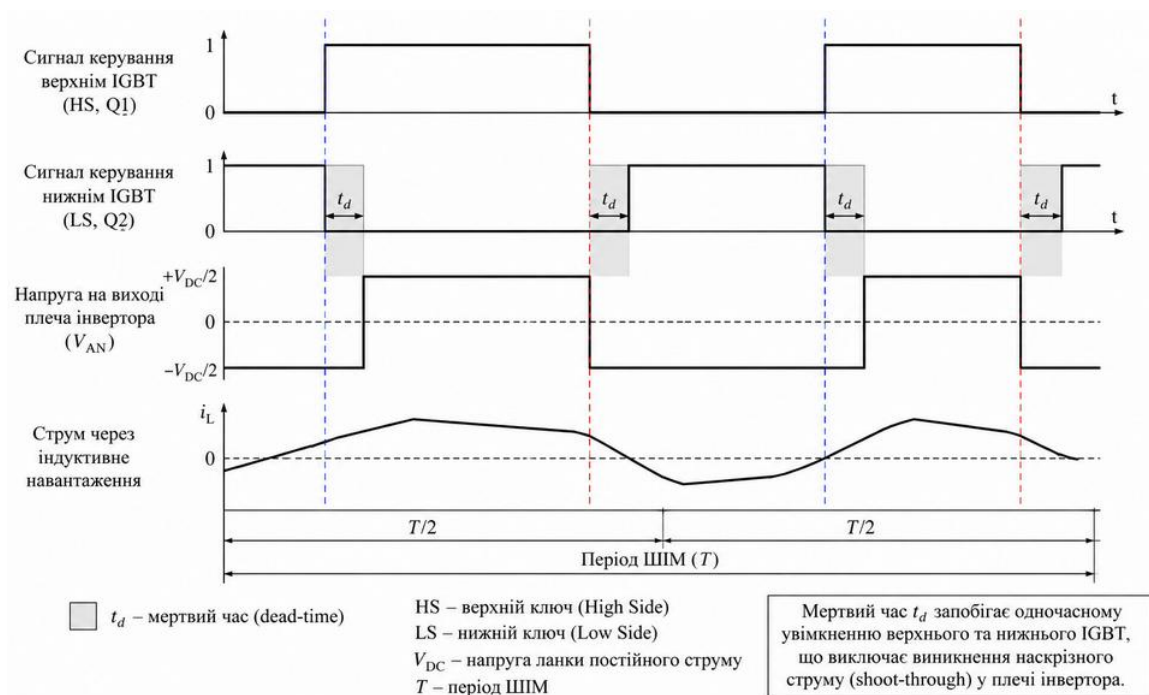


Рис. 4.5 – Часова діаграма генерації сигналів з "мертвим часом" (Dead-Time)

4.4 Елементи зворотного зв'язку (датчики автоматизації)

Ефективність векторного керування асинхронним двигуном 4МТКМ 250 М4 безпосередньо залежить від якості сигналів зворотного зв'язку. Для реалізації замкненої системи автоматизації необхідно вимірювати два параметри: миттєві значення фазних струмів статора та кутове положення вала ротора.

Датчики струму статора

Для вимірювання фазних струмів статора було обрано датчики на ефекті Холла. З урахуванням коефіцієнта перевантаження двигуна та необхідності лінійного вимірювання пускових струмів (що можуть сягати 2-3 кратних від номінального), обрано датчики серії LEM HASS 200-S із номінальним діапазоном 200 А. У промислових кранових електроприводах вони є стандартом завдяки наступним перевагам::

- Гальванічна розв'язка: первинне силовий коло (де протікають великі струми при пуску під навантаженням 8 т) повністю електрично ізольоване від вторинного кола керування, що захищає мікроконтролер STM32 від високовольтних викидів.
- Швидкодія: датчики типу LEM мають час відгуку менше 1 мкс, що дозволяє мікроконтролеру відстежувати динаміку струму в режимі реального часу і миттєво реагувати на стрибки моменту, які виникають при прямому пуску.

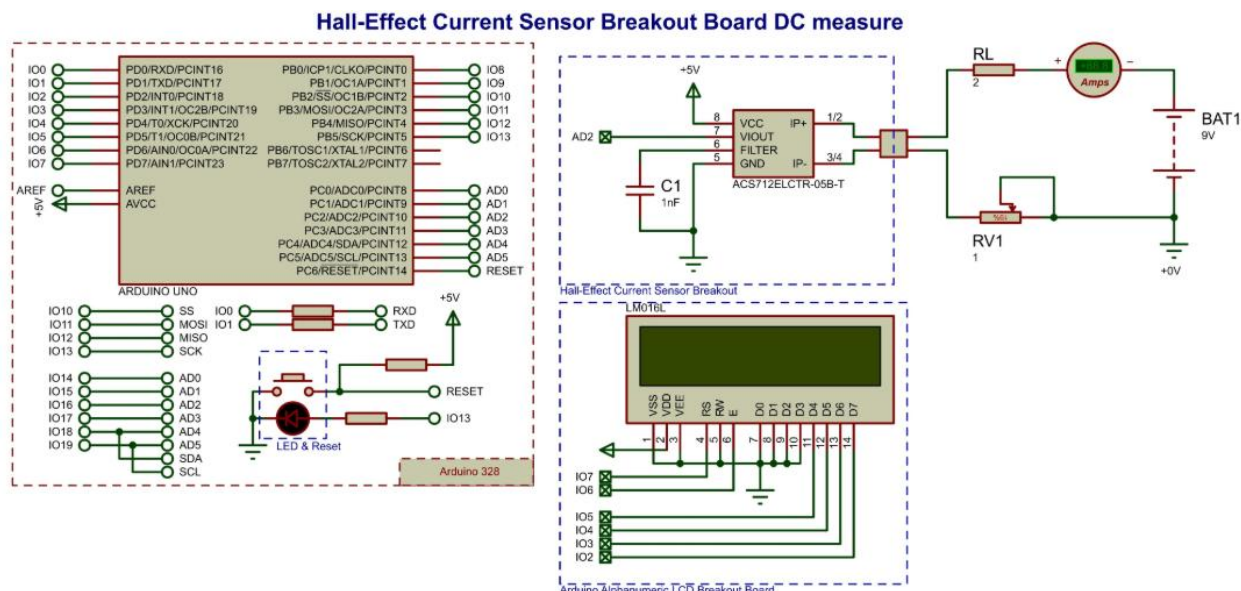


Рис. 4.6 – Зовнішній вигляд датчика струму на ефекті Холла (типу LEM)

Датчик швидкості та положення ротора (Енкодер)

Для визначення кута повороту θ (необхідного для розрахунку перетворення Парка) та швидкості Ω використовується інкрементальний оптичний енкодер з роздільною здатністю 1024 імпульси на оберт (імп./об). Така роздільна здатність є оптимальною, оскільки забезпечує необхідну точність визначення положення ротора (похибка $\approx 0.35^\circ$) без надмірного навантаження на апаратні таймери мікроконтролера STM32 при високих швидкостях обертання..

Принцип роботи:

Енкодер генерує два квадратурні сигнали (фази А та В), зсунуті на 90 градусів, та опорний Z-імпульс. Кількість імпульсів за оберт визначає роздільну здатність системи.

Підключення:

Сигнали з енкодера надходять на входи таймерів мікроконтролера STM32F407 (режим Encoder Interface Mode). Цей апаратний режим дозволяє автоматично рахувати імпульси та визначати напрямок обертання вала без навантаження на основне ядро процесора.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

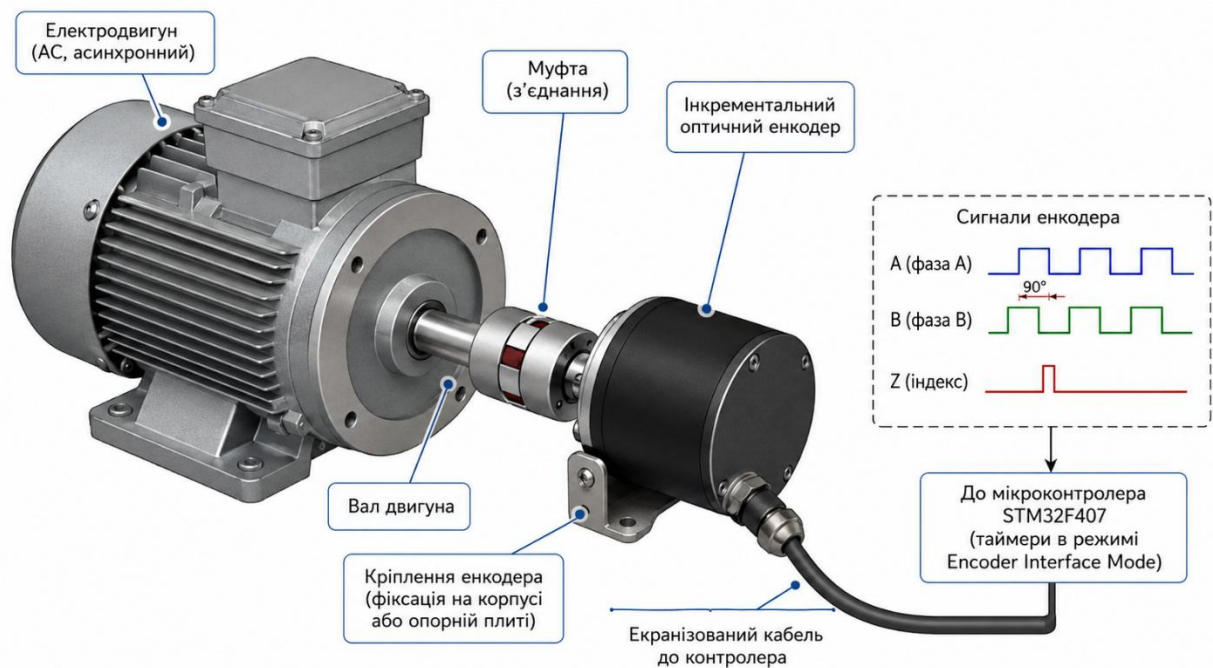


Рис. 4.7 – Схема встановлення інкрементального енкодера на вал двигуна

Рис. 4.7 – Схема встановлення інкрементального енкодера на вал двигуна

Використання цих датчиків дозволяє "замкнути" контур регулювання швидкості та моменту, перетворюючи теоретичну модель, розроблену в Розділі 3, на повноцінну автоматизовану систему, здатну забезпечити плавне керування вантажем без ударних навантажень на механічну частину редуктора.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі здійснено обґрунтування та проектування апаратної частини мікропроцесорної системи керування електроприводом механізму підйому баштового крана. За результатами розробки можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу поставлених завдань розроблено загальну функціональну схему системи автоматизації, побудовану за принципом підпорядкованого регулювання координат. Схема забезпечує повну реалізацію алгоритмів векторного керування (FOC), розроблених у попередньому розділі, та враховує необхідність гальванічної розв'язки між низьковольтними та силовими колами для підвищення надійності.

2. Обґрунтовано вибір 32-бітного мікроконтролера STM32F407VG на базі ядра ARM Cortex-M4. Завдяки наявності апаратного модуля FPU (Floating Point Unit) та спеціалізованої периферії (Advanced-control timers для генерації ШІМ з "мертвим часом", швидкісні 12-бітні АЦП), даний мікроконтролер забезпечує необхідну продуктивність для розрахунку матричних перетворень у режимі реального часу з періодом дискретизації 250 мкс.
3. Для силової частини системи обрано інтелектуальний силовий модуль (IPM), використання якого дозволило суттєво зменшити габарити пристрою та підвищити його надійність завдяки інтегрованим системам захисту від короткого замикання, перегріву та перенапруги. Апаратна реалізація "мертвого часу" (Dead-Time) гарантує відсутність наскрізних струмів в інверторі при будь-яких динамічних режимах навантаження.
4. До складу системи інтегровано датчики зворотного зв'язку, а саме: датчики струму на ефекті Холла (типу LEM) та інкрементальний енкодер. Це дозволяє замкнути контури регулювання струму та швидкості, забезпечуючи високоточне відпрацювання заданої тахограми підйому вантажу масою 8 т та гарантуючи стабільну роботу електроприводу в умовах промислової експлуатації.

Розроблена апаратна конфігурація є повністю придатною для практичної реалізації алгоритмів векторного керування та забезпечує необхідний рівень безпеки й керованості механізму підйому баштового крана.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації та обслуговуванні баштового крана

Робота машиніста крана та електромеханіка, що обслуговує системи автоматизації, характеризується наявністю цілого комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ) згідно з НПАОП 0.00-1.80-18 та ДСТУ EN 14439.

Всі фактори можна поділити на фізичні, психофізіологічні та біологічні (в умовах будівництва переважають перші два).

Фізичні небезпечні фактори:

- Електричний струм: Оскільки ми розглядаємо електромеханічне обладнання, ризик ураження при пробії ізоляції або дотику до струмоведучих частин є критичним.
- Рухомі частини механізмів: Відкриті передачі, барабани лебідок, редуктори повороту.
- Висота: Робота кабіни та вузлів автоматизації на значній відстані від землі.
- Падіння вантажу: При відмові систем обмежувача вантажопідйомності (автоматизації).

Шкідливі фактори:

- Шум та вібрація: Генеруються роботою електродвигунів та редукторів.
- Мікроклімат: Температурні коливання в кабіні та в щитових приміщеннях.
- Електромагнітні поля: Від силових кабелів та перетворювачів частоти.

Оцінка ризиків (Метод матриці)

Для системного аналізу використаємо метод оцінки ризиків, який базується на ймовірності виникнення події (P) та тяжкості її наслідків (S).

					ДП ОА21.05.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бондарчук О.			Охорона праці	Лім.Лім		АркушіАрку
Перевір.		Мугенов Д. Д.						
Реценз.								
Н. Контр.		Кулаковський Л.						
Затверд.		Бойченко С.				НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського ІЕЕ ОА-21		

Таблиця 5.1. Матриця оцінки ризиків для основних робіт з
електромеханічним обладнанням крана

Джерело небезпеки	Небезпечна подія	Ймовірність (1-5)	Тяжкість (1-5)	Рівень ризику (R=P×S)	Пріоритет заходу
Шафа керування (ПЛК, ЧП)	Ураження струмом при наладці	3	5	15 (Високий)	Негайний захист
Механізм підйому	Падіння вантажу через відмову датчика	2	5	10 (Середній)	Технічний контроль
Кабельні траси	Пошкодження ізоляції (КЗ)	3	4	12 (Високий)	Плановий огляд
Редуктор повороту	Захоплення одягу рухомими частинами	2	4	8 (Середній)	Огородження
Робота на висоті	Падіння персоналу при ремонті датчиків	2	5	10 (Середній)	ЗІЗ (пояси)

Специфіка факторів автоматизації

При впровадженні систем автоматизації виникають специфічні ризики:

- Помилкові спрацьовування: Збій у програмі ПЛК (програмна помилка) може призвести до неконтрольованого руху крана.
- Електромагнітна сумісність (ЕМС): Наведення від силових кабелів на сигнальні дроти датчиків може спричинити "тремтіння" сигналу, що призведе до аварійної зупинки або розкачування вантажу.
- Ергономіка (Психофізіологічні фактори): Велика кількість індикаторів та моніторів у кабіні може перевантажувати увагу машиніста, викликаючи втому зору та зниження швидкості реакції.

Таблиця 5.2. Допустимі рівні шкідливих факторів для кабіни баштового крана

Параметр	Одиниця виміру	Нормативне значення (ДСН)	Джерело впливу
Рівень шуму	дБА	не більше 80	Електродвигуни, лебідки
Локальна вібрація	дБ	згідно з ДСН 3.3.6.039-99	Конструкція крана
Напруженість ЕМП	В/м	до 0,5 (для 50 Гц)	Силові щити, частотники

5.2. Заходи попередження виникнення небезпечних ситуацій при експлуатації систем автоматизації та електромеханічного обладнання

На основі проведеного аналізу ризиків (табл. 5.1) та специфіки об'єкта розроблено комплекс заходів, спрямованих на запобігання аварійним ситуаціям та травматизму. Оскільки основна тема роботи стосується автоматизації, заходи поділяються на технічні (апаратні та програмні) та організаційні.

Технічні заходи запобігання аваріям електромеханічних систем:

Враховуючи, що електромеханічне обладнання баштового крана працює в режимах частих пусків, гальмувань та динамічних навантажень, передбачено наступні заходи:

1. Впровадження інтелектуальних обмежувачів вантажопідйомності:

На відміну від стандартних релейних схем, автоматизована система на базі ПЛК здійснює безперервний моніторинг ваги вантажу та вильоту стріли. При досягненні 90% номінальної вантажопідйомності система подає попереджувальний звуковий сигнал, а при 110% - автоматично блокує підйом та рух каретки в небезпечному напрямку.

2. Захист від зіткнень та обмеження робочих зон:

Для запобігання зіткненням з іншими кранами або будівлями використовуються ультразвукові або лазерні датчики відстані, інтегровані в систему керування. Програмно задаються «координатний захист» та «заборонені зони», куди рух стріли блокується автоматично.

3. Контроль гальмівних систем:

Електромеханічні гальма мають бути обладнані датчиками зносу накладок та датчиками стану (відкрито/закрито). Система автоматизації повинна блокувати роботу двигуна, якщо гальмо не розблокувалося (запобігання перегріву та пожежі), або якщо гальмо не спрацювало при зупинці.

Програмно-апаратні заходи надійності ПЛК та приводів:

Оскільки керування здійснюється через частотні перетворювачі (ЧП) та контролери, виникають специфічні ризики «програмних збоїв».

1. Принцип «Safe Torque Off» (STO): Частотні перетворювачі повинні підтримувати функцію безпечного зняття моменту. Це гарантує, що при натисканні кнопки аварійної зупинки, енергія на двигун не подаватиметься незалежно від стану програмного забезпечення ПЛК.
2. Використання Watchdog-таймерів: Програмне забезпечення контролера включає алгоритм самодіагностики. У разі «зависання» процесора або збою циклу програми, всі виходи автоматично переходять у безпечний стан (логічний «0»), що призводить до накладання механічних гальм.
3. Захист від несанкціонованого доступу: Доступ до зміни параметрів автоматизації (швидкості, обмеження моментів) захищається паролями та фізичними ключами-маркерами, щоб унеможливити помилкові дії обслуговуючого персоналу.

Заходи захисту від падіння вантажу та персоналу:

1. Контроль швидкості вітру: Анемометр, підключений до ПЛК, при перевищенні допустимої швидкості вітру (зазвичай 15 м/с для робочого стану) видає команду на припинення робіт та приведення крана у флюгерний стан.
2. Блокування люків та дверей: Всі входи до апаратної кабіни та на секції башти обладнуються кінцевими вимикачами, які розривають

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

коло керування при відкритті, запобігаючи випадковому руху крана, коли персонал перебуває на металоконструкціях.

Організаційні заходи попередження ризиків:

Організація безпеки базується на вимогах НПАОП 0.00-1.80-18:

Система нарядів-допусків: Проведення будь-яких налагоджувальних робіт у шафах автоматизації або на механізмах підйому дозволяється лише після зняття напруги та вивішування плакатів «Не вмикати! Працюють люди».

Регламентне обслуговування: Щотижнева перевірка справності датчиків обмеження висоти підйому та кінцевих вимикачів повороту.

Навчання персоналу: Машиніст крана та наладчик електромеханічного обладнання повинні проходити щорічну перевірку знань з електробезпеки (група не нижче IV для наладчика) та правил роботи з мікропроцесорною технікою.

5.3. Умови праці на робочому місці

Оцінка умов праці здійснюється для визначення відповідності фактичних параметрів виробничого середовища чинним санітарним нормам України. Для персоналу, що обслуговує електромеханічне обладнання та системи автоматизації баштового крана, основними факторами є мікроклімат, акустичне навантаження та якість освітлення.

Виробничий мікроклімат

Робота машиніста крана згідно з ДСН 3.3.6.042-99 належить до категорії робіт Іб (середня енерговитратність 121–150 ккал/год), що пов'язано з постійним психоемоційним напруженням та роботою з органами керування (джойстиками, пультами).

Температурний режим: Оскільки кабіна знаходиться на значній висоті та має велику площу скління, вона піддається інтенсивному сонячному опроміненню влітку та швидкому охолодженню взимку.

У теплий період року температура в кабіні повинна становити 22–24°C, у холодний - не нижче 18–20°C. Кабіна обов'язково обладнується системою

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

клімат-контролю, інтегрованою в загальну систему автоматизації крана, що підтримує задані параметри незалежно від зовнішніх умов.

Вологість та швидкість руху повітря: Відносна вологість має бути в межах 40–60%. Швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,2 м/с для запобігання виникненню протягів.

Акустичне навантаження (шум та вібрація)

Як зазначено в табл. 5.2, основними джерелами шуму є електродвигуни та редуктори механізмів підйому та повороту.

Шум:

Гранично допустимий рівень (ГДР): Не більше 80 дБА (згідно з ДСН 3.3.6.037-99).

Джерела: Робота частотних перетворювачів (високочастотний писк) та механічні шуми трансмісії.

Заходи захисту: Застосування звукоізолюючих матеріалів у конструкції кабіни, використання безшумних контакторів у шафах керування та встановлення обладнання на вібродемпферні опори.

Вібрація:

Локальна вібрація: Виникає на органах керування (джойстиках). Її рівень не повинен перевищувати значень, встановлених ДСН 3.3.6.039-99.

Загальна вібрація: Передається через крісло машиніста під час руху крана або роботи вантажної лебідки. Для її гасіння використовуються спеціальні підпружинені крісла-пульти з гідравлічними амортизаторами.

Стан повітряного середовища (запиленість)

На будівельних майданчиках та промислових підприємствах рівень пилу може бути підвищеним (цементний пил, металевий пил).

Кабіна машиніста повинна бути герметичною. Система вентиляції має бути обладнана фільтрами тонкої очистки (класу не нижче G4 або F7). Оскільки пил є електропровідним та може призвести до короткого замикання в ПЛК, шафи керування повинні мати ступінь захисту не нижче IP54.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виробниче освітлення

Якість освітлення безпосередньо впливає на безпеку вантажопідйомних операцій.

Зовнішнє освітлення: На стрілі та башті крана встановлюються прожектори (LED) для освітлення робочої зони (гака та майданчика) з рівнем освітленості не менше 50 лк.

Внутрішнє освітлення кабіни: Комбіноване. Загальне освітлення - не менше 100 лк, місцеве освітлення пультів керування - 300 лк.

Монітори систем керування повинні мати антиблікове покриття, а їхня яскравість має автоматично регулюватися залежно від часу доби (функція «день/ніч»), щоб не засліплювати машиніста та не викликати втому зору.

5.4. Заходи з електробезпеки при експлуатації електромеханічного обладнання та систем автоматизації

Для забезпечення надійної роботи системи керування баштовим краном та захисту персоналу від ураження електричним струмом розроблено комплекс технічних рішень. З огляду на специфіку об'єкта як пересувної електроустановки, основні заходи систематизовано у таблиці 5.3.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

Таблиця 5.3. Технічні та організаційні заходи забезпечення
електробезпеки

Об'єкт захисту	Вид небезпеки	Технічне рішення (захід)	Нормативне обґрунтування / Параметри
Силове коло (380 В)	Непрямий дотик при пошкодженні ізоляції	Автоматичне відключення живлення за допомогою комбінованих вимикачів та система заземлення TN-S.	ПУЕ, час відключення не більше 0,4 с.
Корпус крана та рейки	Винесення потенціалу на металоконструкції	Влаштування контуру заземлення та приєднання всіх частин до РЕ- провідника.	Опір розтіканню струму $R \leq 40\text{м}$
Система автоматизації (ПЛК)	Прямий дотик під час налагодження	Живлення кіл керування наднизькою напругою (PELV/SELV).	Напруга живлення 24 В.
Кабіна машиніста	Струми витоку на побутових приладах	Встановлення диференційних захисних пристроїв (ПЗВ).	Струм спрацювання $I_{\Delta n} = 30\text{мА}$
Частотні перетворювачі	Залишкова напруга на конденсаторах	Часова затримка на відкриття шафи та світлова індикація розряду.	ДСТУ EN 60204-1, розряд до 60 В за 5 хв.
Кабельні траси стріли	Механічне пошкодження та замикання	Прокладання в гнучких екранованих кабельних каналах (кабель-треках).	Ступінь захисту не нижче IP54.
Обслуговуючий персонал	Помилкові дії при ремонті	Система блокування «ЛОТО» (Lockout/Tagout) та наряди-допуски.	НПАОП 40.1-1.21- 98.

Застосування системи заземлення типу TN-S передбачає поділ нульового робочого (N) та нульового захисного (PE) провідників по всій довжині мережі, що суттєво знижує рівень завад для чутливої електроніки ПЛК. Всі металеві неструмоведучі частини електромеханічного обладнання, включаючи корпуси

двигунів механізмів підйому та повороту, інтегровані в загальну систему вирівнювання потенціалів. Це мінімізує напругу дотику в разі пробою фазної ізоляції на корпус.

Особлива увага приділяється захисту систем автоматизації від впливу частотно-регульованого приводу. Оскільки швидкі перемикання силових транзисторів інвертора створюють значні електромагнітні завади, застосовуються екрановані кабелі та фільтри ЕМС. Це запобігає «хибним спрацюванням» входів контролера, які могли б призвести до несанкціонованого пуску механізмів. Крім того, для роботи в умовах конденсації вологи, що є типовим для висотних кранів, всі електронні компоненти розміщуються в герметичних шафах з підігрівом, що підтримує температуру вище «точки роси».

Для гарантування безпеки під час проведення регламентних робіт передбачено обов'язкове використання засобів індивідуального захисту. Оскільки наладчик працює безпосередньо з мікропроцесорною технікою, яка інтегрована в силові щити, робоче місце повинно бути укомплектоване діелектричними килимками. Всі операції з перепрограмування або заміни датчиків на висоті виконуються виключно при знятій силовій напрузі, що контролюється візуально за допомогою засобів індикації на пульті керування.

5.5. Пожежна безпека на об'єкті

Пожежна безпека баштового крана забезпечується шляхом усунення потенційних джерел запалювання в електромеханічних вузлах та мінімізації наслідків у разі їх виникнення. Основна увага приділяється захисту шаф автоматизації та кабіни машиніста. Основні заходи та засоби пожежогасіння наведені у таблиці 5.4.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

Таблиця 5.4. Заходи пожежної безпеки та засоби ліквідації займань

Об'єкт (зона)	Потенційне джерело пожежі	Захід запобігання	Засоби пожежогасіння / Дії
Шафа керування ПЛК та ЧП	Коротке замикання, перегрів силових транзисторів	Використання швидких запобіжників, контроль температури всередині шафи, вогнестійкі кабелі "нг-LS".	Вуглекислотний вогнегасник (ВВ-2). Використання порошкових засобів заборонено.
Електродвигуни механізмів	Тривале перевантаження, міжвиткове замикання	Інтегрований термозахист (датчики РТС), що подає сигнал на зупинку через ПЛК.	Відключення живлення та використання вуглекислотних засобів гасіння.
Кабіна машиніста	Несправність побутових електроприладів, куріння	Обробка інтер'єру негорючими матеріалами, заборона використання відкритих нагрівальних елементів.	Вуглекислотний вогнегасник (ВВ-5), автономний димовий сповіщувач.
Кабельні траси та лотки	Пошкодження ізоляції, накопичення пилу	Регулярне очищення від сміття та мастил, перевірка цілісності екранів кабелів.	Первинні засоби (азбестове полотно), вогнезатримувальні перегородки.
Башта та стріла крана	Удар блискавки	Наявність блискавководу, з'єднаного з загальним контуром заземлення.	Перевірка цілісності з'єднань металоконструкцій щосезону.

Пожежна безпека баштового крана забезпечується через запобігання займанням у силових ланцюгах та захист систем автоматизації. Основними заходами є використання вогнестійких кабелів із низьким димовиділенням та інтеграція теплових датчиків ПЛК для моніторингу нагріву двигунів. У разі виникнення вогню пріоритетним є використання вуглекислотних вогнегасників, які ефективно ліквідують займання електроустановок до 1000В

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

без пошкодження електронних плат контролерів. Програмна логіка системи передбачає алгоритм «Пожежна тривога», що автоматично переводить кран у безпечний стан перед повним знеструмленням, мінімізуючи ризик падіння вантажу. Такий підхід гарантує захист дорогого обладнання та створює умови для безпечної евакуації персоналу з висоти.

Висновки до розділу 5

У розділі сформовано цілісну систему заходів з охорони праці для автоматизованого баштового крана. На основі аналізу шкідливих факторів доведено, що впровадження мікропроцесорного контролю знижує виробничі ризики до припустимого рівня. Оцінка умов праці підтвердила необхідність дотримання норм мікроклімату та віброзахисту для підтримки працездатності машиніста. В частині електробезпеки обґрунтовано використання системи TN-S та напруги 24 В для ланцюгів керування, що мінімізує ймовірність травматизму при налагодженні ПЛК. Розроблена стратегія пожежної профілактики поєднує технічні засоби захисту з аварійними алгоритмами зупинки. Запропоновані рішення повністю відповідають нормам НПАОП та ПУЕ, створюючи безпечне підґрунтя для практичного впровадження результатів щодо підвищення стійкості енергосистем на промислових об'єктах.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальне інженерне завдання з розробки сучасної системи електроприводу, автоматизації та електропостачання для баштового крана вантажопідйомністю 8 тонн. За результатами виконання роботи зроблено наступні висновки:

1. Електромеханічна частина: На основі кінематичних розрахунків механізму підйому обрано спеціалізований крановий асинхронний двигун 4МТКМ 250 М4 (55 кВт), що має достатній запас перевантажувальної здатності (3,09) для подолання динамічних навантажень.
2. Електропостачання: Спроектовано надійну мережу будівельного майданчика із сумарним навантаженням 305,78 кВА. Обрано силовий трансформатор ТМ-400/10/0.4, розраховано освітлення, перерізи кабельних ліній (ВВГнг) та підібрано автоматичні вимикачі з урахуванням струмів короткого замикання.
3. Моделювання процесів: Розроблено State-Space модель електроприводу та проведено імітаційне моделювання у MATLAB/Simulink. Доведено, що прямий пуск двигуна викликає сильні електромагнітні та механічні удари, що теоретично обґрунтовує необхідність застосування частотно-регульованого приводу.
4. Автоматизація керування: Розроблено апаратну базу системи векторного керування (FOC) з використанням 32-бітного мікроконтролера STM32F407VG та силового модуля інвертора Mitsubishi PM150CLA120. Це дозволить забезпечити плавний розгін, точне позиціонування вантажу та економію електроенергії.
5. Безпека експлуатації: Розроблено комплекс заходів з охорони праці, який включає застосування системи заземлення TN-S, апаратних блокувань ПЛК та засобів пожежної безпеки, що гарантує мінімізацію виробничих ризиків.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102

Запропоновані технічні рішення є сучасними, економічно та технічно обґрунтованими і можуть бути використані при модернізації або проектуванні нових систем керування будівельними підйомно-транспортними механізмами.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рябенко І. С., Мейта О. В. Основи електропостачання. Навчальний посібник для здобувачів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського.
2. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Електропостачання» / уклад.: О. О. Демиденко, Ю. М. Гринько. Харків : ХНУРЕ, 2021. 45 с.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-е вид. Київ : ДІНТЕР, 2018.
4. ДБН В.2.5-23:2010. Проєктування електроосвітлення. Київ : Мінрегіон України, 2010.
5. Каталог продукції АВВ. Автоматичні вимикачі, контактори та теплові реле. АВВ Ltd., 2020.
6. ДСТУ EN 60947-2:2017. Апаратура комутаційна та керування низьковольтна. Частина 2. Автоматичні вимикачі. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
7. Розрахунки КЗ і вибір апаратури : навч. посіб. / Л. Ф. Семенов, О. М. Золотарьов. Харків : НТУ «ХПІ», 2019.
8. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Теорія електропривода : підручник. Київ : Вища школа, 2007. 615 с.
9. Малащенко В. О., Гаврильченко О. В. Кранові механізми : навч. посібник. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 230 с.
10. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем : навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 248 с.
11. MATLAB and Simulink Documentation. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (дата звернення: 10.06.2024).
12. STM32F407VG Reference Manual (RM0090): STM32f405/415, STM32f407/417, STM32f427/437 and STM32f429/439 advanced ARM-based 32-bit MCUs. STMicroelectronics, 2021.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

13. PM150CLA120 Datasheet: Intelligent Power Modules Flat-base Type Insulated Package. Mitsubishi Electric, 2019.
14. HASS Series Current Transducers Datasheet. LEM International SA, 2020.
15. НПАОП 0.00-1.80-18. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв та відповідного обладнання. Київ : Форт, 2018.
16. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Основа, 1998.
17. ДСТУ EN 14439:2014. Крани вантажопідіймальні. Безпека. Крани баштові. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.
18. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
19. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.
20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Київ : МОЗ України, 1999.
21. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.

					ДП ОА21.05.000 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105