ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси
в гірничо-металургійному виробництві»
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка

на тему «Модернізація АСУ електроприводом мостового крану в умовах цеху металовиробів металургійного комбінату»

Керівник роботи (Олексій РАЗЖИВІН)

Консультант від
бази практики (Артем ЛИТВИНОВ)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач (Артем АСТАФУРОВ)

Підсумкова оцінка за атестацію			

Голова ЕК (Андрій ЛЕОНОВ)

Запоріжжя 2025

metinvest polytechnic

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень	магістр
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
ОПП	Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант ОПП

_____ Олексій КОЙФМАН
27.11.2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

АСТАФУРОВА Артема Юрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи *Модернізація АСУ електроприводом мостового крану в умовах цеху металовиробів металургійного комбінату*
керівник роботи Разживін Олексій Валерійович, *доцент, канд. техн. наук*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від 14.10.2024 р. №238/14.10.2024
2. Термін подання роботи *03.02.2025 р.*
3. Вихідні дані до роботи *Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень тощо*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) *Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів (Основні задачі АСУТП, концепція роботи системи, обґрунтування та вибір технічних рішень). 3. Реалізація запропонованої системи (3.1. Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, 3.2. Вибір перетворювача частоти електроприводу підйому гаку мостового крану 3.3. Проектування АСУ електроприводом підйому гаку крану 3.4 Розробка блок-схем алгоритмів роботи крана в заданих режимах 3.5 Розробка імітаційної математичної моделі частотно-регульованого електроприводу підйому портального крану 3.6 Налаштування контурів регулювання АСУ асинхронним двигуном 3.7 Дослідження імітаційної моделі електропривода підйому портального крану). 4. Техніко-економічне обґрунтування. 5. Охорона праці та промислова безпека Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.*
5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схема функціональна автоматизації. 2.Взаємозв'язок функціональних

завдань. 3. Схема структурна комплексу технічних засобів. 4. Блок-схеми алгоритмів управління та програмного забезпечення. 5. Презентація магістерської роботи. *Плакати (за вибором): результати розрахунків, розрахунок економічного ефекту, графіки, екранні форми тощо.*

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Усі розділи	Разживін О.В., доцент кафедри АВЕРС

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проєкту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	31.12.2024	
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління	03.01.2025	
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	17.01.2025	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації	27.01.2025	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	31.01.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	03.02.2025	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.02.2025	
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	17.02.2025	

Здобувач (Артем АСТАФУРОВ)

Керівник роботи (Олексій РАЗЖИВІН)

АНОТАЦІЯ

Астафуров Артем Юрійович. «Модернізація АСУ електроприводом мостового крану в умовах цеху металовиробів металургійного комбінату». Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». ОПП «Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Мета роботи: Зниження енерговитрат при експлуатації мостового крану КМ-1635 шляхом модернізації АСУ електроприводом підйому підвіски гака.

Об'єктом дослідження є електропривід підвіски гака мостового металургійного мостового крана вантажопідйомністю 16 тон.

Предметом дослідження є зниження трудомісткості і енергоємності переміщення вантажів мостовим краном за рахунок модернізації системи управління електроприводом підйому підвіски гака.

У першому розділі проведено аналіз поточного стану електроприводу мостового крану в умовах цеху металовиробів металургійного комбінату. Надана загальна характеристика наявної системи управління електроприводу, визначені її недоліки та необхідність удосконалення існуючої системи. Модернізація системи управління з релейно-контакторної на частотно-регульовану, що підвищить ефективність роботи мостового крану.

У другому розділі розглянуто параметри об'єкту автоматизації, визначені задачі АСУ електроприводом підйому гака мостового крана, здійснено вибір технічних рішень з модернізації електроприводу та засобів контролю технологічних параметрів електроприводної системи, виконано проектування функціональної схеми автоматизації, обґрунтована запропонована структура системи управління.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технічних засобів та перетворювача частоти електроприводу підйому гаку мостового крану; спроектовано АСУ електроприводом підйому гаку крану; розроблено блок-схему алгоритмів роботи крана в заданих режимах та імітаційну математичну модель частотно-регульованого електроприводу підйому мостового крану; виконано дослідження імітаційної моделі.

У четвертому розділі обгрунтовано економічну доцільність впровадження запропонованої системи управління електроприводом підйому гака мостового крана.

У п'ятому розділі проаналізовані шкідливі та небезпечними виробничі факторами, які впливають на працівників при експлуатації мостового крану та наведені основні вимоги безпеки при обслуговуванні мостового крану.

Астафуров А.Ю., Разживін О.В. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education Volume 2. 2024 С.63-68. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-138

ЗМІСТ

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ 9
1.1 Опис механізму підйому мостового крана 9
1.2 Аналіз існуючої системи управління електроприводом мостового крану 12
1.3 Літературний огляд 15
1.4 Постановка задач на проектування 17
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ 19
2.1 Основні задачі АСУ електроприводом підйому гака мостового крана 19
2.2 Розробка функціональної схеми автоматизації 20
2.3 Обґрунтування та вибір технічних рішень з модернізації електроприводу 22
2.4 Вибір засобів контроля технологічних параметрів електроприводної системи 25
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАННОЇ СИСТЕМИ 31
3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації 31
3.2 Вибір перетворювача частоти електроприводу підйому гаку мостового крану 32
3.3 Проектування АСУ електроприводом підйому гаку крану 35
3.4 Розробка блок-схем алгоритмів роботи крана в заданих режимах . 39
3.5 Розробка імітаційної математичної моделі частотно-регульованого електроприводу підйому портального крану 41
3.6 Налаштування контурів регулювання АСУ асинхронним двигуном 46
3.7 Дослідження імітаційної моделі електропривода підйому портального крану 52
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ 55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА 59
ВИСНОВКИ 61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 63
ДОДАТОК А 65
ДОДАТОК Б 66

ДОДАТОК В.....67

ВСТУП

Вантажо-підйомні механізми, зокрема мостові крани, їх електрообладнання відіграє ключову роль у механізації різних секторів економіки, а саме - промисловість, будівництво, транспорт. Значна частина сучасних вантажопідйомних машин, оснащена електричними приводами для роботи основних механізмів. Саме від надійності та ефективності кранового електрообладнання залежить безперебійна робота цих машин, їх продуктивність і безпека експлуатації.

Вантажопідйомні машини застосовуються для різноманітних операцій, таких як завантаження та розвантаження матеріалів, транспортування вантажів у межах технологічного процесу на виробничих дільницях, а також для виконання операцій з забезпечення логістики складів металопрокату. Вони особливо корисні під час роботи з важкими і великогабаритними вантажами, які неможливо переміщувати вручну. Крім того, ці машини часто використовуються у складних умовах на робочих майданчиках, у портах та на промислових підприємствах, де потрібна висока точність і надійність операцій. Сучасні вантажопідйомні машини з електричними приводами мають широкий діапазон потужностей, що дозволяє адаптувати їх під конкретні завдання.

Електроприводи вантажопідйомних машин працюють в умовах короткочасних навантажень, що пов'язано з частими включеннями і вимиканням обладнання. Це вимагає від приводів не тільки високої надійності, але й здатності швидко реагувати на зміну умов роботи, зокрема при розгоні та гальмуванні механізмів. Часті перевантаження і зміни швидкості є типовими для такого обладнання, тому для вантажопідйомних машин розроблені спеціальні серії електродвигунів та апаратів, які можуть витримувати подібні експлуатаційні умови.

До складу кранового електрообладнання входять компоненти, які забезпечують безперебійну роботу механізмів. Це, зокрема, електродвигуни змінного та постійного струму, магнітні та силові контролери, командоконтролери для управління рухом кранів, кнопкові пости, кінцеві вимикачі, які забезпечують автоматичне зупинення крана в разі досягнення крайнього положення, гальмові електромагніти, електрогідравлічні штовхачі та пуско-гальмівні резистори. Усі ці елементи створюють єдину систему, яка дозволяє керувати вантажопідйомними машинами з високою точністю та надійністю.

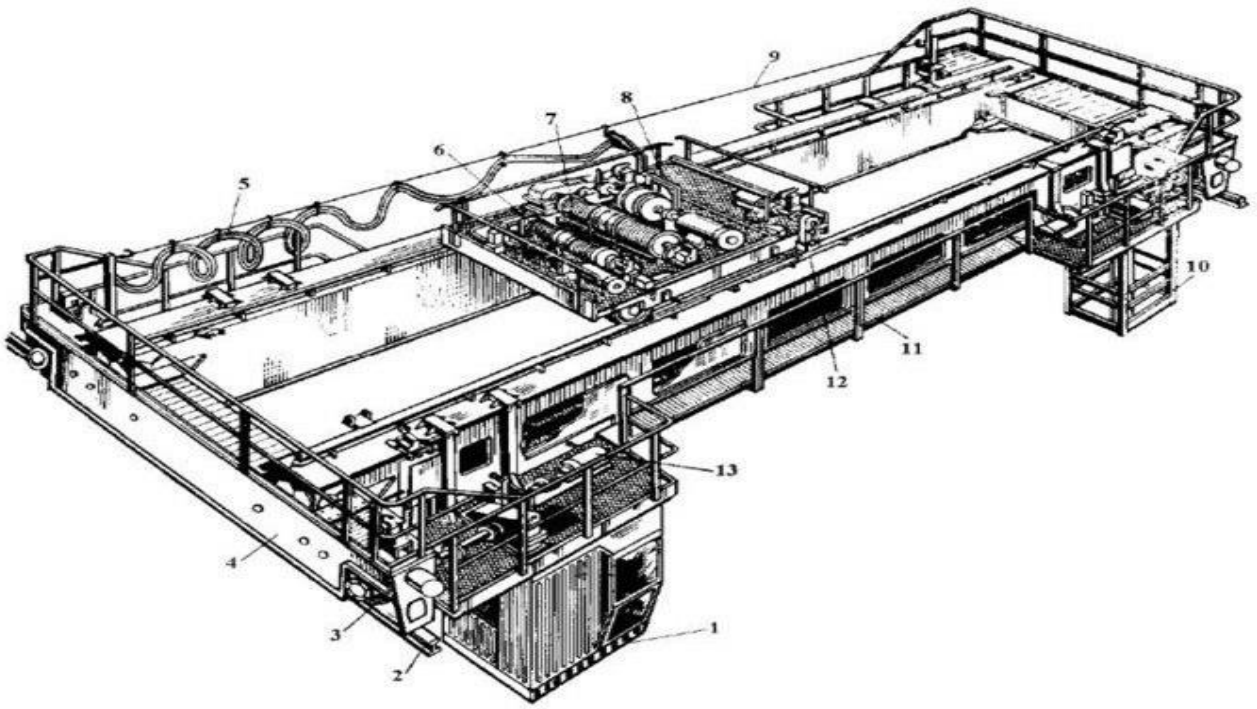
Загалом, кранове електрообладнання продовжує розвиватись та удосконалюватись відповідно до зростаючих вимог сучасної індустрії. Розробляються нові технології для підвищення енергоефективності, збільшення потужності та зниження впливу на навколишнє середовище. Такі інновації дозволяють вантажопідйомним машинам виконувати складніші завдання, зберігаючи при цьому високу надійність та тривалість експлуатації.

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1 Опис механізму підйому мостового крана

Мостові крани – це вантажопідйомні машини, призначені для підйому, транспортування та точного розміщення вантажів у виробничих, складських та будівельних умовах. Вони складаються з жорсткої металевої конструкції (моста), яка переміщається по кранових коліях, закріплених на підкранових балках. Основні механізми мостового крана включають підйомний механізм для вертикального переміщення вантажу, механізм пересування візка вздовж моста та ходові механізми для переміщення всього крана. Вони широко застосовуються у промисловості, логістиці та будівництві завдяки високій ефективності, надійності та можливості автоматизації. Управління може здійснюватися як вручну (з кабіни оператора), так і дистанційно за допомогою радіоуправління або програмованих систем.

У цій кваліфікаційній роботі розглядається мостовий кран КМ-1635, призначений для підйому та переміщення вантажів, що працює у горизонтальній та вертикальній площинах та використовується у приміщенні. Його основними функціональними складовими є міст, ходові механізми, підйомний механізм та система управління (рисунок 1.1). Живлення мостового крану - трифазний змінний струм, 380 В, 50 Гц.



1 - кабіна; 2 - підкранові колії; 3 - ходові колеса; 4 - кінцеві балки; 5 - гнучкий кабель; 6 - допоміжний механізм підйома; 7 - головний механізм підйома; 8 - крановий візок; 9 – дріт; 10 - майданчик обслуговування; 11 – міст; 12 - механізм переміщення візка; 13 - механізм переміщення крану

Рисунок 1.1 - Мостовий кран КМ-1635. Загальний вигляд

Мостовий кран КМ-1635 працює за допомогою трьох незалежних механізмів:

– горизонтальний рух моста по рейках;

– переміщення вантажного візка по мосту;

– підйомний механізм, що відповідає за вертикальне переміщення вантажу.

Конструктивні особливості мостового крана моделі КМ-1635:

– міст крана – основна несуча конструкція, виготовлена із сталевих балок. Оснащений ходовими колесами для пересування по кранових коліях;

– ходовий механізм – забезпечує пересування крана вздовж кранових колій. Містить ходові візки з колесами діаметром 800мм, що рівномірно розподіляють навантаження. Приводиться в дію електродвигунами через редукторну систему;

– механізм підйому – складається з електродвигуна, редуктора, барабана, сталевого каната та гака. Живлення здійснюється через струмопідвідні пристрої, підключені до кранових тролеїв;

– кранові колії та підкранові балки – міст встановлюється на колії, які укладаються на підкранові балки будівлі. Балки кріпляться до колон цеху, забезпечуючи міцність конструкції;

– система управління – кабіна кріпиться до моста крана та містить усі органи управління та системи безпеки;

– система живлення – кран підключається до трифазної мережі напругою 380 В. Живлення передається через тролейні лінії, а струмознімання здійснюється ковзними контактами.

Принцип роботи крана:

Переміщення крана вздовж колій – кран встановлюється на кранові рейки, які укладаються на підкранові балки, закріплені на колонах будівлі. На краю моста розташовані ходові візки, кожен з яких має два колеса (загалом чотири колеса діаметром 800 мм). Переміщення крана вздовж колій здійснюється ходовим механізмом, що складається з електродвигуна, редуктора та приводних коліс. Оператор керує рухом крана за допомогою приладів управління кабіни обираючи напрямок і швидкість. Гальмівна система забезпечує контрольовану зупинку крана у потрібному місці.

Робота вантажного візка:

По мосту рухається спеціальний вантажний візок, який містить механізм підйому. Візок пересувається завдяки окремому приводному механізму, що забезпечує горизонтальний рух. Переміщення візка дозволяє змінювати позицію вантажу без пересування всього крана.

Основні компоненти підйомного механізму:

- електродвигун – забезпечує рух механізму;
- редуктор – передає та регулює обертальний момент;
- барабан – навиває або розмотує сталевий канат;

- канатна система – включає блоки та сталеві троси, що підтримують вантаж;

- гаковий підвіс – пристрій для захоплення вантажу;

- гальмівний механізм – запобігає неконтрольованому опусканню вантажу.

Етапи роботи підйомного механізму:

– активація підйомного механізму (оператор подає команду на підйом або опускання вантажу. Електродвигун починає обертати вал редуктора, який знижує швидкість обертання та передає рух на барабан);

– рух барабана та канатної системи (барабан починає намотувати або розмотувати сталевий канат. Через блокову систему трос передає зусилля на гакову підвіску. Блоки допомагають рівномірно розподілити навантаження та зменшити силу, необхідну для підйому важких вантажів);

– підйом вантажу (гак або інший захоплювальний пристрій піднімає вантаж. Для важких вантажів використовується поліспастна система, яка зменшує навантаження на барабан та збільшує точність підйому. Швидкість підйому може змінюватися в залежності від ваги вантажу та робочого режиму);

– фіксація вантажу на висоті (після досягнення потрібної висоти гальмівний механізм зупиняє обертання барабана. Гальма працюють автоматично, щоб запобігти мимовільному опусканню вантажу у разі відключення електроенергії);

– переміщення вантажу по мосту крана (після підйому оператор керує переміщенням вантажного візка по мосту крана. Візок рухається завдяки окремому двигуну та ходовому механізму. Завдяки цьому вантаж може бути доставлений у потрібну точку без зміни позиції всього крана);

– опускання вантажу (для зниження вантажу оператор активує зворотний рух електродвигуна. Барабан починає розмотувати канат, і вантаж поступово опускається вниз. Гальма та обмежувачі контролюють швидкість опускання, щоб уникнути різких ударів).

Технічні характеристики мостового крану КМ-1635, що модернізується наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики мостового крана

Параметр	Значення
1	2
Вантажопідйомність головного гака	16 т
Швидкість підйому головного гака	0,16 м/с
Швидкість пересування крана	1,25 м/с
Швидкість пересування візка	0,63 м/с
Висота підйому головного гака	9,5 м

Продовження таблиці 1.1

1	2
Вага головного гака	0,3 тон
Діаметр барабана лебідки головного гака	409 мм
Вага візка	2,4 т
Довжина переміщення моста	60 м
Довжина переміщення візка	22 м
ККД головного підйому під навантаженням	0,98
ККД головного підйому при холостому ході	0,49
ККД моста	0,82
ККД візка	0,79
Довжина приміщення цеху	62 м
Ширина приміщення цеху	22,5 м
Висота приміщення цеху	10 м
Режим роботи крана середній	С
Тривалість включення крана %	50%

1.2 Аналіз існуючої системи управління електроприводом мостового крану

Механізм підйому мостового крана КМ-1635 оснащений трифазним асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю 37 кВт, що дозволяє регулювати швидкість та момент під час роботи. Такий двигун забезпечує плавний запуск та гальмування завдяки використанню додаткового реостата у роторному колі. Робота двигуна контролюється релейно-контактною схемою, яка керує включенням, відключенням та зміною режимів роботи електропривода та яка входить до механізму підйому мостового крану. Електроприводи на основі асинхронного двигуна з фазним ротором, які використовуються в мостових кранах, мають низку значних недоліків. Однією з основних проблем є високі енергетичні втрати, що виникають через низький коефіцієнт корисної дії (ККД) та низький коефіцієнт потужності. Крім того, часто зустрічаються проблеми з перекосами в електричних колах роторів, що можуть бути спричинені поганими контактами в системах управління, таких як контактори, прискорювачі або опори. Ці проблеми можуть призвести до несправностей приводних двигунів. Іншою важливою проблемою є різкі зміни крутного моменту двигунів та динамічні перевантаження механізмів крана, які виникають через поступове виведення опорів з роторних кіл. Також відсутність ефективних систем гальмування та низька зносостійкість релейно-контактної апаратури управління створюють додаткові труднощі в експлуатації. У якості приводів механізму підйому, переміщення візка, та крану використовуються електродвигуни змінного струму типу МТF, ДМТF кранові з фазним ротором. Використовується електродвигун МТF 412 – 8У2, блок резисторів Б6У2, командоконтролер ККП1121 АУ2. Для управління електродвигуном механізму підйому

використовується панель типу ТСА-161. Дана панель та контролери забезпечують ступінчасте регулювання швидкості за рахунок зміни значень опорів резисторів у роторному ланцюзі.

Релейно-контактна схема є традиційною системою управління електроприводами мостового крана. Вона заснована на використанні реле і контакторів, які керують електродвигунами механізмів підйому, пересування моста та вантажного візка. Така схема працює за допомогою електромагнітних реле і контакторів, які замикають і розмикають електричні ланцюги, подаючи або вимикаючи живлення на електродвигуни, забезпечуючи послідовність операцій підйому та опускання вантажу.

Основні елементи схеми:

– контролер (операторський пульт або педалі) – задає команди на включення або вимкнення механізмів.

– комутаційні пристрої – контактори та реле, що перемикають електричні ланцюги.

– електродвигуни – основні приводи крана (переміщення моста, підйомний механізм, рух візка).

– запобіжні пристрої – реле захисту, кінцеві вимикачі, теплові реле.

Алгоритм роботи релейно-контактної схеми:

– подання команди оператором (оператор натискає кнопку або перемикає важіль управління. Замикання контакту ініціює роботу схеми);

– активізація контактної системи (електричний струм проходить через котушку реле, що створює магнітне поле. Магнітне поле притягує контакти контактора, який закриває або відкриває силовий ланцюг);

– живлення електродвигуна (при замиканні контакторів електрична напруга подається на електродвигун. Двигун починає обертатися, приводячи в рух механізм підйому або пересування);

– робота захисних елементів (якщо виникає перевантаження або аварійна ситуація, теплові реле розмикають ланцюг, відключаючи двигун. Кінцеві вимикачі зупиняють механізми при досягненні граничних положень);

– зупинка роботи (при відпусканні кнопки або важеля контакти розмикаються, відключаючи живлення двигуна. Гальмівна система механізму підйому фіксує вантаж у заданому положенні).

Переваги релейно-контактної схеми:

– простота конструкції (Система не потребує складного програмування або цифрових контролерів. Всі елементи доступні для діагностики та заміни);

– надійність у важких умовах (Реле та контактори добре працюють у запиленому, вологому або агресивному середовищі. Відсутність складних електронних компонентів підвищує стійкість до перепадів напруги);

– легкість ремонту та обслуговування (Можливість заміни окремих реле або контакторів без необхідності зміни всієї системи.

Обслуговування можна виконати на місці без залучення спеціалізованого персоналу);

– можливість ручного управління (Якщо автоматика виходить з ладу, окремі контакти можуть бути замкнуті вручну для продовження роботи).

Проте існують і певні недоліки застосування релейно-контактної схеми, а саме:

– швидкий знос контактів (через постійне замикаюче і розмикаюче навантаження контакти можуть обгорати або механічно зношуватися. Потрібне регулярне технічне обслуговування);

– обмеженість у управлінні швидкістю (У релейно-контактній схемі немає можливості плавного регулювання швидкості електродвигунів. Швидкість може бути змінена лише ступінчасто шляхом використання кількох обмоток двигуна або резисторів);

– великі розміри та складність монтажу (Для потужних кранів потрібна значна кількість контакторів і реле. Це збільшує розміри шафи управління та ускладнює монтаж);

– підвищене енергоспоживання (Контактори та реле споживають енергію для підтримки своїх магнітних полів. Це підвищує витрати електроенергії у порівнянні з сучасними електронними системами).

З появою частотно-регульованих систем управління підйомним механізмом стало більш точним та енергоефективним. Частотний перетворювач дозволяє змінювати частоту живлення двигуна, що забезпечує плавний пуск, зупинку та регулювання швидкості підйому без використання релейно-контактної системи або додаткових резисторів у роторному колі. Частотне регулювання дозволяє точно налаштовувати механічні характеристики асинхронних двигунів, що є ефективним способом контролю кутової швидкості. Це особливо важливо для простих і відносно дешевих двигунів змінного струму.

Ці системи частотно-регульованого управління ґрунтуються на використанні частотних перетворювачів та високонадійних контролерів, які надають низку ключових переваг:

– оптимізація механічних характеристик – забезпечують точне налаштування параметрів крана відповідно до специфічних вимог виробництва;

– збільшення ККД та плавне регулювання – сучасні технології дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії та забезпечити плавну зміну швидкості електроприводів, що зменшує ризик ударних навантажень;

– зниження енергоспоживання – оптимізація електроспоживання сприяє скороченню експлуатаційних витрат;

– підвищена надійність і безпека – новітні технології покращують стабільність роботи обладнання, що критично важливо для промислового використання;

– захист електродвигунів – системи запобігають перевантаженням, коротким замиканням та іншим небезпечним ситуаціям, забезпечуючи довговічність електроприводу;

– зменшення витрат на обслуговування – підвищена надійність і знижене зношення деталей дозволяють скоротити витрати на ремонт механічного та електричного обладнання;

– мінімізація простоїв – зменшується кількість зупинок кранів через аварійні ситуації, що позитивно впливає на ефективність виробничих процесів. Завдяки цим перевагам, сучасні системи кранового електроприводу забезпечують ефективну і надійну експлуатацію кранів, підвищуючи загальну продуктивність і безпеку виробничих процесів.

Впровадження частотно-регульованих електроприводів не тільки підвищує ефективність роботи кранів, але й дозволяє мінімізувати енергетичні втрати, зменшити механічне зношування обладнання та забезпечити більш плавну роботу механізмів.

Проте, застосування частотно-регульованих приводів у мостових кранах вимагає додаткових досліджень і уточнення існуючих математичних моделей таких електроприводів. Це необхідно для того, щоб врахувати специфічні умови експлуатації кожного окремого крана та адаптувати його роботу до конкретних технологічних потреб. Окрім цього, потрібно вдосконалити методи аналізу та вибору оптимальної системи управління підйомним механізмом крана при використанні частотного регулювання. Важливо також приділити увагу деталізації умов, за яких система управління забезпечить найбільшу ефективність і надійність.

Впровадження частотних перетворювачів та програмованих логічних контролерів, які безпосередньо керують електроприводами без потреби у контакторах і реле, забезпечує плавне регулювання швидкості, підвищену енергоефективність і зменшення зносу електродвигунів. Такий підхід дозволяє модернізувати існуючі системи управління електроприводом мостового крану та повністю усунути механічні комутаційні елементи (релейно-контактну схему).

1.3 Літературний огляд

В літературному огляді проаналізовано наукову та технічну літературу, присвячену питанням управління електроприводом мостових кранів. На сьогодні існує значна кількість джерел, що розкривають теоретичні аспекти та практичні підходи до проектування, модернізації та оптимізації таких систем.

У сучасній промисловості використання енергоефективних систем є ключовим фактором для досягнення високих експлуатаційних показників. У системі електроприводу мостових кранів спостерігається чітка тенденція до ширшого застосування асинхронних двигунів як основного виконавчого механізму. Це пов'язано з можливістю регулювання параметрів роботи двигунів за допомогою частотних перетворювачів, які шляхом зміни частоти та напруги дозволяють реалізовувати різні режими роботи. До

переваг асинхронних приводів належать низька вартість, простота ремонту та обслуговування, а також висока функціональність при регулюванні.

Для мостових кранів особливо важливо враховувати вагові характеристики механізмів. Електродвигуни постійного струму, не дивлячись на свої специфічні переваги, мають значно більшу масу, що обмежує їх застосування. Доцільність застосування приводу постійного струму обумовлена спеціальними режимами роботи, коли необхідно забезпечити швидкість оберту вихідного валу електричної машини кратно-більшу за номінальну.

Сучасні системи електроприводу вимагають забезпечення компактності та економічності, що є основним завданням при розробці систем управління.

Джерелами для формування теоретичної бази стали класичні монографії та підручники, серед яких виділяються навчальний посібник «Електромеханічні системи управління та електроприводи» (Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б.) та підручник «Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин» (В.С. Бондарєв, О.І. Дубінець, М.П. Колісник), де детально розкриваються принципи побудови та функціонування систем управління електроприводом для промислового обладнання, включаючи мостові крани, розглядаються сучасні методи дослідження електромеханічних систем автоматичного управління, включаючи частотне, векторне, адаптивне та скалярне регулювання.

Також навчальний посібник Б.О. Баховця «Автоматизований електропривод» надає комплексний огляд методів автоматизації електроприводів, з акцентом на практичні аспекти їх реалізації.

Додатковий внесок даної проблематики описано у монографії Г.Г. Півняка «Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтноімпульсною модуляцією», яка фокусується на особливостях проектування сучасних систем управління для електроприводів кранового обладнання.

Науковий журнал «Електротехніка і Електромеханіка» та «Промислова автоматизація» є джерелами для аналізу сучасних технологічних рішень у галузі автоматизації електроприводу. У цих виданнях опубліковані статті, присвячені методам зниження енергоспоживання, застосуванню векторного управління та інших передових технологій для електроприводів мостових кранів.

Для ознайомлення з сучасними технічними рішеннями розглянута технічна документація провідних виробників електротехнічного обладнання, таких як Siemens та Schneider Electric. Серед продукції цих компаній особливо варті уваги серії Simatic S7 та Altivar (Schneider Electric), які широко використовуються для управління електроприводами кранового обладнання.

1.4 Постановка задач на проектування

Регулювання параметрів електроприводу мостових кранів є важливим аспектом для забезпечення ефективної та безпечної роботи цих механізмів. У сучасних умовах автоматизації та інтенсифікації виробничих процесів, вдосконалення електроприводів мостових кранів дозволяє підвищити продуктивність та надійність їх роботи.

Сучасне виробництво застосовує кранові двигуни асинхронного та постійного струмів. У промислових цехах електрообладнання піддається впливу таких факторів як вібрація, наведення напруги чи висока температура в верхній частині приміщень. Для зменшення негативних наслідків цих факторів була розроблена серія спеціалізованих електричних машин, основними особливостями яких є:

– виробництво таких електричних машин передбачає використання ізоляційних матеріалів підвищеного класу стійкості до високих температур;

– для забезпечення високої перевантажувальної здатності електроприводу використовується великий магнітний потік всередині електродвигунів;

– зменшення втрат електроенергії досягається завдяки низькій номінальній частоті обертання ротора машини. Максимальна робоча частота обертання вихідного валу електричної машини становить 2,5 номінальної для асинхронних кранових двигунів і 3,5 для електродвигунів постійного струму;

– більшість електродвигунів виготовляються за закритою схемою. Для забезпечення режиму роботи електричні машини цього типу відповідають підвищеним вимогам щодо короткочасних перевантажень.

У сучасній промисловості все частіше використовуються енергоефективні системи для досягнення високих експлуатаційних характеристик та загальної економічності. В електроприводах мостових кранів спостерігається тенденція до збільшення використання асинхронних двигунів як основних виконавчих механізмів. Асинхронні приводи відрізняються можливістю частотного регулювання, що дозволяє змінювати частоту та напругу для забезпечення різних режимів роботи. Їхня нижча вартість, простіший ремонт та обслуговування, а також легше регулювання є ключовими факторами при проектуванні систем управління. Для кранів важливою є вага механізму, і електродвигуни постійного струму є важчими, що обмежує їх застосування. Використання приводів постійного струму доцільне в спеціальних режимах роботи, коли необхідно забезпечити значно вищу швидкість обертання вихідного валу електричної машини порівняно з номінальною. Сучасні системи електроприводу повинні бути компактними та економічними, що є основним завданням при їх розробці.

Для управління системами електроприводів змінного струму застосовуються наступні схеми:

1) асинхронний двигун – імпульсний регулятор з рекуперацією енергії ковзання. Енергія ковзання повертається до системи живлення через конденсатори, що підвищує енергоефективність;

2) асинхронний двигун – перетворювач частоти. У такій системі перетворювач частоти приймає змінний струм з мережі, випрямляє його та перетворює на змінний струм потрібної частоти та напруги. Це дозволяє точно контролювати швидкість обертання валу двигуна та підвищує енергоефективність завдяки точному управлінню процесом;

3) асинхронний двигун – тиристорний перетворювач напруги. У такій системі тиристорний перетворювач регулює напругу та струм, зменшуючи механічний стрес і підвищуючи довговічність системи;

4) асинхронний двигун – тиристорний регулятор напруги. Регулятор забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, контролюючи частоту та величину вихідної напруги.

Метою даної роботи є обґрунтування та розробка системи частотно-регульованого електроприводу вантажопідйомного механізму мостового крану та уточнення методики її розрахунку відповідно до умов застосування.

Для досягнення поставленої мети сформульовані розв’язати такі задачі:

1) обґрунтувати необхідність застосування системи частотно-регульованого електроприводу вантажопідйомного механізму мостового крану;

2) обґрунтувати та розробити структурну схему системи частотно-регульованого електроприводу вантажопідйомного механізму мостового крану;

3) розробити блок-схему алгоритмів роботи крана в заданих режимах;

4. розробити функціональну схему управління електроприводом, розрахувати і вибрати елементи силового кола та кола управління;

5) розрахувати економічну ефективність впровадження частотно-регульованого електроприводу вантажопідйомного механізму мостового крану на підприємстві.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Основні задачі АСУ електроприводом підйому гака мостового крана

Задача управління електроприводом підйому підвіски гаку мостового крана полягає в забезпеченні плавного регулювання швидкості двигуна, реверсу, контролю за технологічним процесом і виконанні цих дій у чітко визначеній послідовності згідно з командами оператора (машиніста крана).

Одним із ключових завдань є забезпечення плавного запуску двигуна з попередньо заданою швидкістю, що допомагає уникнути або зменшити ударні навантаження. Для цього система застосовує аналогові та дискретні сигнали, які контролюють робочі параметри та безпеку виконання процесу.

Для коректної роботи система управління має отримувати сигнали від різних датчиків, перемикачів та оператора, а також відповідним чином регулювати технологічний процес. Крім того, система повинна забезпечувати своєчасну активацію сигналізації та блокувальних механізмів, щоб гарантувати безпеку обладнання.

Інформаційна модель складається з вхідних, проміжних і вихідних масивів даних, що дозволяє ефективно обробляти інформацію. Вхідні сигнали включають аналогові значення, що надходять від датчиків температури та тензодатчиків, а також дискретні сигнали від сенсорів швидкості, положення, індуктивних датчиків і пульта оператора. В системі передбачено резерв аналогових входів для майбутнього розширення технічної діагностики. Дискретні сигнали мають напругу 24В, тоді як аналогові сигнали вимірюються в діапазоні 0 - 20 мА.

Аналогові вхідні сигнали надходять від датчиків температури електродвигуна та задають швидкість переміщення підвіски.

Дискретні вхідні сигнали в себе включають:

– зворотний зв'язок за швидкістю з датчика швидкості, який фіксує значення швидкості приводу підйому підвіски;

– інформацію з безконтактних індуктивних датчиків про крайні положення гака для захисту від перепідйому чи переопускання;

– сигнали з пульта оператора для вибору режимів роботи;

– команду зупинки технологічного процесу.

Вихідні дискретні сигнали використовуються для завдання швидкості двигуна через перетворювач частоти по шині Profibus DP і для активації гальмівних систем.

Функції системи управління включають:

– обробку даних, що надходять від датчиків і перемикачів;

– обробку команд з пульта оператора;

– своєчасне виявлення аварійних ситуацій.

Вхідні сигнали формують проміжний масив даних про стан об'єкта, що дає змогу системі аналізувати інформацію, генерувати сигнали управління та порівнювати їх із допустимими значеннями. На основі цих даних формуються такі масиви: для індикації режимів роботи, для управління об’єктом і для сигналізації стану електроавтоматики.

Отримані дані надходять у центральний процесор (CPU) контролера, який виконує аналіз поточного стану об'єкта, порівнює його з еталонними параметрами, формує команди управління та відображає режими роботи на операторській панелі. Сигнали від CPU передаються через вихідні блоки для подальшого управління електротехнічним обладнанням.

2.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Проектування функціональної схеми автоматизації включає встановлення взаємодії між контролером та всіма елементами системи. Сигнали від датчиків швидкості та положення надходять до мікроконтролера, де вони обробляються для подальшого управління. Індуктивні датчики положення перетворюють дискретні сигнали у логічні, що використовуються контролером для точного регулювання підйому та опускання вантажу, запобігаючи неконтрольованим рухам.

Крім того, система враховує додаткові параметри, такі як перевантаження, температурні зміни та аварійні стани, що підвищує рівень безпеки. Отримані дані аналізуються у реальному часі, а управління здійснюється за допомогою алгоритмів, що забезпечують плавність рухів та мінімізацію ударних навантажень.

Таким чином, автоматизована система управління підйомом підвіски гака не лише підвищує ефективність роботи крана, а й значно зменшує зношення механізмів, забезпечуючи безпечну та стабільну експлуатацію обладнання.

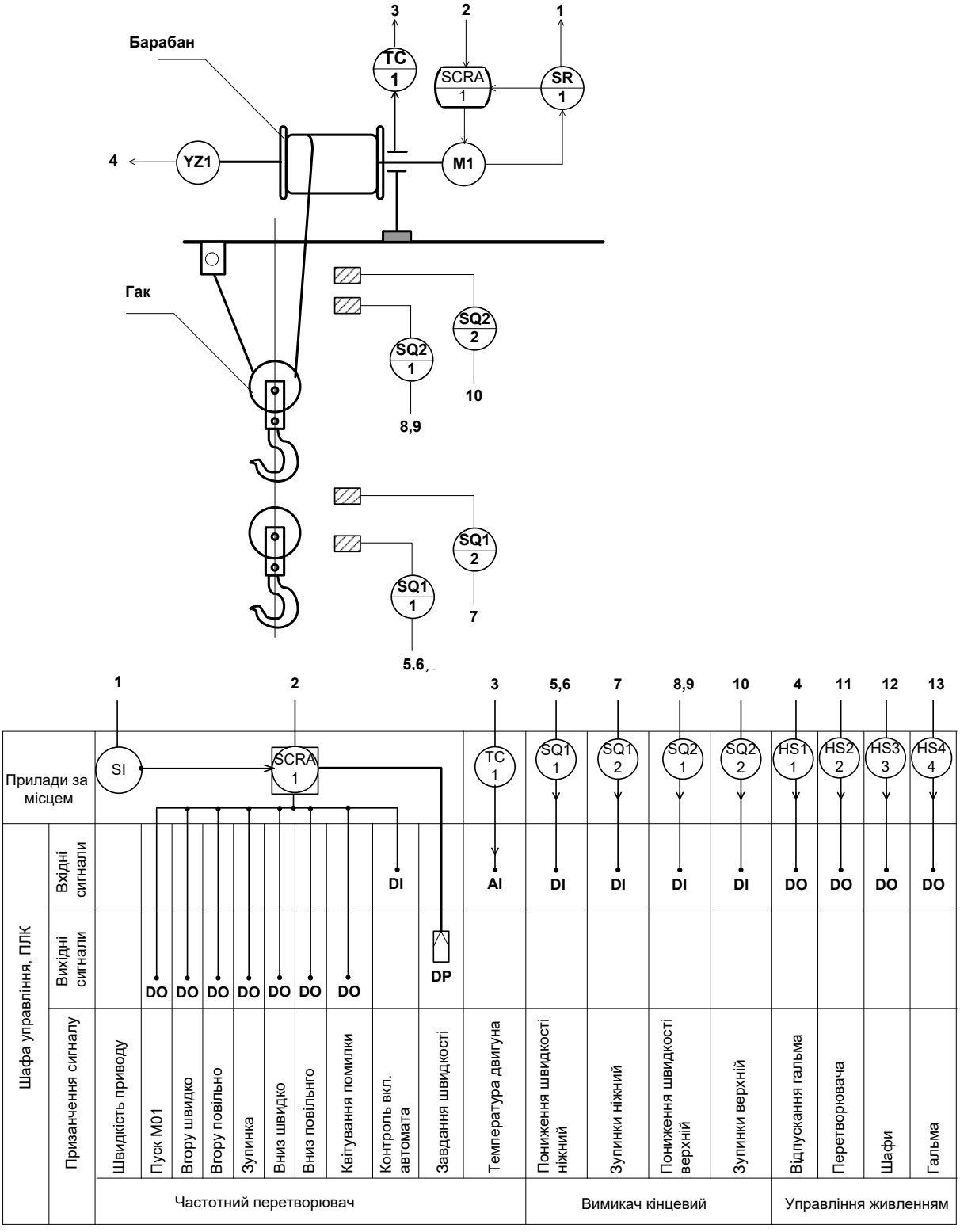


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автоматизації управління приводом підвіски гака мостового крана

Для забезпечення коректної роботи системи управління мостовим краном, на основі проведеного аналізу та розробленої схеми автоматизації, здійснюється детальне проектування периферійних компонентів станції. У цьому процесі проводиться аналіз інформаційних

та керуючих сигналів автоматизованої системи, результати якого будуть узагальнені та представлені у вигляді таблиці рисунку 2.2.

Позначення	Найменування	Тип сигналу
Кінцеві вимикачі		
SQ1-1	Зниження швидкості нижній	Інформаційний дискретний
SQ2-1	Зниження швидкості верхній	
SQ1-2	Нижній аварійний зупинки	
SQ2-2	Верхній аварійний зупинки	
Контроль включення автоматичних вимикачів		
HS1-1	Відпускання гальм	Інформаційний дискретний
HS2-2	Перетворювача	
HS3-3	Шафи	
HS4-4	Джерела живлення	
Сигнали		
TC1	Температура двигуна	Аналоговий
SC1	Швидкість барабана	Кодовий
Управління перетворювачем		
DIN1	Обертання двигуна вгору	Управляючий дискретний
DIN2	Обертання двигуна вниз	
DIN3	Обертання двигуна повільно	
DIN4	Обертання двигуна швидко	Управляючий дискретний
DIN5	Пуск	
DIN6	Зупинка	
DIN7	Квітування помилки	
A01 DP	Завдання швидкості	Аналоговий/Profibus DP

Рисунок 2.2 - Інформаційні та керуючі сигнали

На основі аналізу інформаційних та керуючих сигналів системи управління електроприводом для переміщення підвіски гака здійснюється вибір відповідних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів.

2.3 Обґрунтування та вибір технічних рішень з модернізації електроприводу

З метою проведення обґрунтування та впровадження технічних рішень з модернізації АСУ електроприводом підйому гака мостового крана проводиться розрахунок навантаженої здатності та вибір приводного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. Запровадження нового типу приводного двигуна пов’язано з тим, що для регулювання швидкості обертання валу двигуна буде застосовано

частотне скалярне регулювання. Встановлений в системі електроприводу крану асинхронний двигун з фазним ротором не може бути застосований для частотного регулювання швидкості.

Для розробки статичної навантажувальної діаграми, необхідно розрахувати статичні моменти навантаження на електродвигун, а також визначити потужність та тривалість перехідних процесів.

Розрахункова схема проектованого електроприводу наведена на рисунку 2.3.

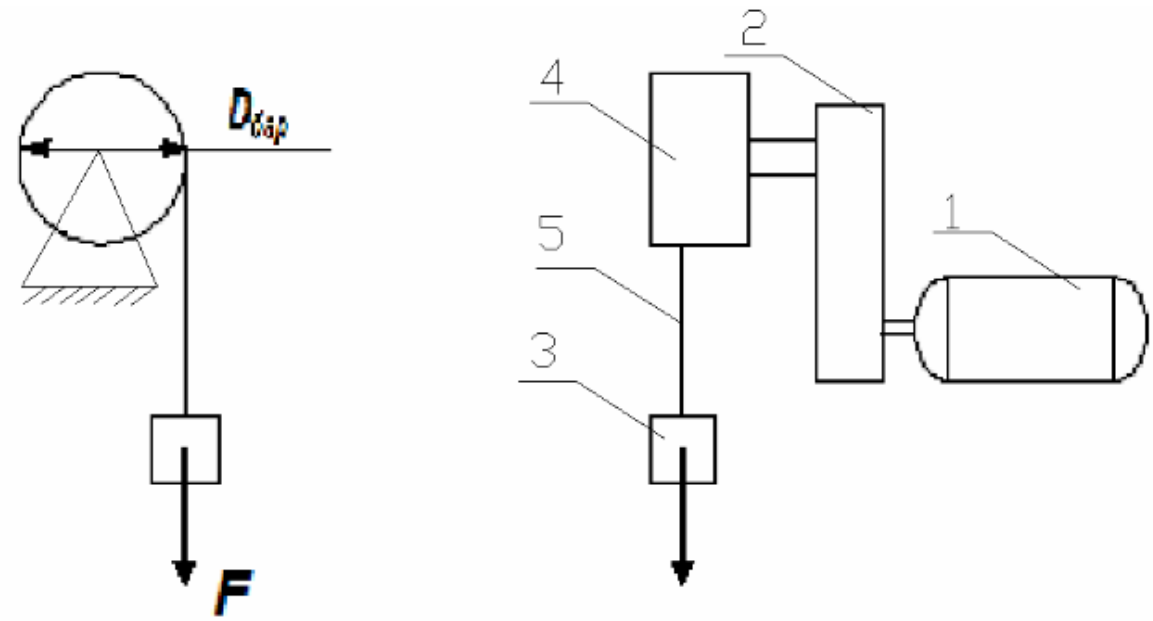


Рисунок 2.3 - Сили, що діють на кран
(1- електродвигун; 2-редуктор; 3- вантажозахватний пристрій; 4-барабан; 5-канат)

Визначаємо час підйому і опускання вантажу (підвіски гака):

$$t_{p1} = \frac{H}{v} = \frac{9{,}5}{0.16} = 59 \text{ с.} \quad (2.1)$$

Визначаємо $t_{p1} = t_{p2} = t_{p3} = t_{p4}$, а час простоїв t_0 рівним робочим часів.

Розраховуємо тривалість циклу:

$$t_{\text{ц}} = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4} + 4t_0 = 4 \cdot 59 + 4 \cdot 59 = 472 \text{ с.} \quad (2.2)$$

Тривалість включення механізму в статиці:

$$\text{ТВ} = \frac{t_{p1}+t_{p2}+t_{p3}+t_{p4}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 = \frac{4 \cdot 59}{472} \cdot 100 = 50\%. \quad (2.3)$$

Приймаємо стандартне значення ТВст=60%.

Визначаємо статичні моменти на валу електродвигуна при підйомі і опусканні вантажів (підвіски гака):

$$\mathrm{M}_{\text{сп1}} = \frac{1{,}2 \cdot Q_{\text{н}} D 9.8}{2u\eta k} = \frac{1.2 \cdot 9.8 \cdot 16000 \cdot 0.409}{2 \cdot 51 \cdot 0.98 \cdot 2} = 385 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

$$\mathrm{M}_{\text{сп3}} = \frac{0{,}2 \cdot Q_{\text{н}} D 9.8}{2u\eta k} = \frac{0.2 \cdot 9.8 \cdot 16000 \cdot 0.409}{2 \cdot 51 \cdot 0.98 \cdot 2} = 64{,}1 \text{ Нм} \quad (2.5)$$

$$\mathrm{M}_{\text{сп2}} = \frac{1{,}2 \cdot Q_{\text{н}} D 9.8\eta}{2uk} = \frac{1.2 \cdot 9.8 \cdot 16000 \cdot 0.409 \cdot 0.98}{2 \cdot 51 \cdot 2} = 370 \text{ Нм} \quad (2.6)$$

$$\mathrm{M}_{\text{сп4}} = \frac{0{,}2 \cdot Q_{\text{н}} D 9.8\eta}{2uk} = \frac{0.2 \cdot 9.8 \cdot 16000 \cdot 0.409 \cdot 0.98}{2 \cdot 51 \cdot 2} = 61{,}6 \text{ Нм} \quad (2.7)$$

Відповідно, статична діаграма буде складатися з таких ділянок: підйом вантажу (t_{p1}), зупинка механізму на час (t_{o1}), опускання вантажу (t_{p2}), зупинка на час розвантаження (t_{o2}), підйом підвіски гака (t_{p3}), зупинка механізму підйому на час переміщення підвіски гака до місця завантаження (t_{o3}), опускання підвіски гака (t_{p4}), зупинка механізму на час завантаження (t_{o4}). Діаграма відображена на рисунку 2.4.

Попередній вибір електродвигуна за потужністю і швидкістю. Потужність електродвигуна з найближчої стандартної тривалістю включення $ТВ_{СТ}$ вибираємо з умови підйому номінального вантажу по розрахункової потужності:

$$P_p = \frac{1.2 \cdot 9.8 Q_{\text{н}} \cdot v}{\eta} = \frac{1.2 \cdot 9.8 \cdot 16000 \cdot 0.16}{0.98} = 30720 \text{ Вт.} \quad (2.8)$$

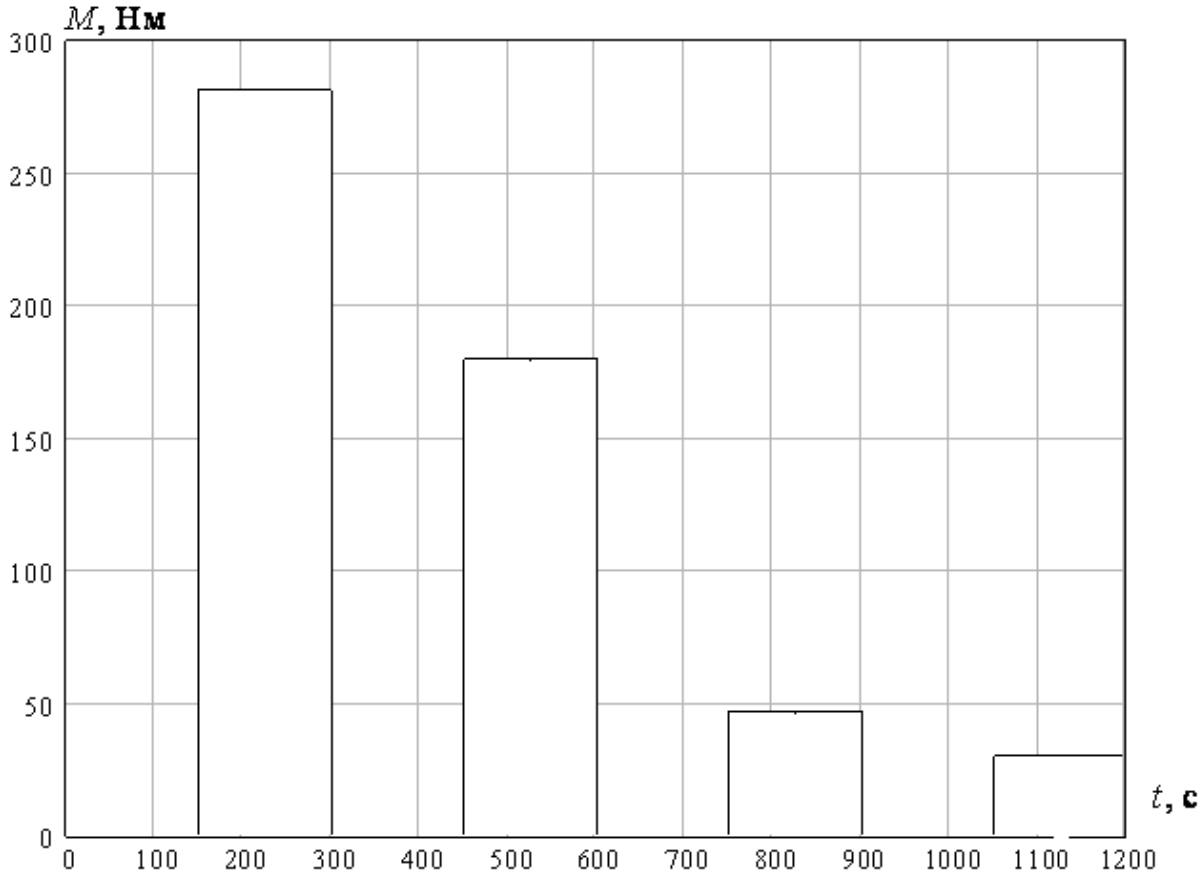


Рисунок 2.4 - Статична навантажувальна діаграма

Наведемо розрахункову величину потужності до стандартної тривалості включення

$$P_{рст} = \mathrm{P_р}\sqrt{\frac{\mathrm{ТВ}}{\mathrm{ТВ_{ст}}}} = 30720\sqrt{\frac{50}{60}} = 28043 \text{ Вт.} \qquad (2.9)$$

Номінальну частоту обертання двигуна визначимо з формули:

$$n_p = 60v\frac{u}{\pi D}\mathrm{a_п} = 60 \cdot 0.16\frac{51}{3.14 \cdot 0.409} \cdot 2 = 762{,}5 \text{ хв}^{-1}. \qquad (2.10)$$

2.4 Вибір засобів контроля технологічних параметрів електроприводної системи

Для здійснення контролю технологічного процесу та визначення ключових техніко-технологічних параметрів буде використовуватися обладнання, зокрема датчики та програмовані логічні контролери (ПЛК) від компанії Siemens. На сьогоднішній день Siemens є одним із лідерів у сфері електронно-вимірювальної техніки.

Основними перевагами цього обладнання є висока точність, надійність, стійкість до зовнішніх впливів, а також здатність реалізовувати складні алгоритми управління без потреби додаткового узгодження між

пристроями, що мінімізує втрату точності. Проте високий рівень якості та функціональності супроводжується значною вартістю, що є основним недоліком таких систем.

У рамках проектування виконаємо розрахунок і вибір датчика швидкості. Для забезпечення точного контролю руху необхідно обрати відповідний енкодер швидкості, який забезпечуватиме стабільний та достовірний зворотний зв'язок для системи управління.

Розрахуємо період дискретизації:

$$T_0 \leq \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_П}{a_{доп}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-3}}{0{,}6}} = 18 \text{ мс}; \qquad (2.11)$$

де ε_n - помилка з положення; $a_{доп}$ - допустиме прискорення двигуна

Датчик визначає швидкість двигуна, яка задається перетворювачем частоти. Час комутації тиристорів становить 3,3 мс. Для стійкості система період дискретності повинен бути T_0=4 мс.

Розрахунок діапазону регулювання швидкості:

$$D_C = \frac{\omega_{дв} \cdot T_O}{d} = \frac{76{,}3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0{,}001} = 305; \qquad (2.12)$$

де d – ціна дискрети. d=0,001, ω – куткова швидкість двигуна.

Розрахунок максимальної роздільної здатності датчика:

$$N_{ДС} \geq \frac{2\pi \cdot D_c}{T_0 \cdot \omega_{дв}} = \frac{2\pi \cdot 305}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 76{,}3} \approx 6275 \frac{\text{дискрет}}{\text{об}}. \qquad (2.13)$$

Визначення кількості розрядів для завдання коду положення:

$$n_П = log_2 N_{ДС} = log_2 6\,200 = 13 \text{ розрядів}. \qquad (2.14)$$

Обираємо датчик швидкості моделі 6FX2001-5JE22-3QA1 для моніторингу швидкості, який буде встановлений на барабані відповідно до технічних вимог.

Для контролю температури підшипників буде використовуватися температурний датчик CMSS 2310. Дані датчики монтуються на корпус кожного підшипника у радіальному напрямку, що забезпечує ефективний моніторинг робочої температури. Вбудована електроніка датчиків стійка до ударних навантажень та вібрацій, а герметичний корпус забезпечує безперервний моніторинг навіть у складних умовах експлуатації.

Сигнали від датчиків передаються на монітор, який налаштовується відповідно до встановлених граничних значень температури. На передній панелі монітора розташовані світлодіоди, що сигналізують про стан сигналу, несправності в мережі датчиків або перевантаження. Монітор генерує вихідний сигнал у діапазоні 0-12 В, пропорційний температурі, що

дозволяє передавати дані на програмований логічний контролер (ПЛК) системи управління. Для реалізації цієї системи обрано монітор CMSS672-CPHD-04, який забезпечує надійний контроль температурного режиму та сумісний із сучасними системами автоматизації.

Технічні характеристики датчика температури/вібрації CMSS 2310 є наступними:

– температурна межа 1,5 -120 ºС;
– вібраційний межа 70 g;
– частота 50 Гц;
– споживання потужності 3,5 Вт;
– напруга живлення 24В.
– вага 0,2 кг.

Технічні характеристики монітора CMSS672-CPHD-04:

– контрольована температура 0 - 70 ºС;
– вихідний сигнал по температурі 0 - 12 В;
– вихідний сигнал по вібрації 4 - 20 мА / 0-10 В;
– споживання потужності 5 Вт
– вага 11,3 кг.

На основі аналізу техніко-технологічних особливостей передбачено встановлення двох температурних датчиків: один датчик розміщується на статорі електродвигуна для контролю температурного режиму його обмоток, другий встановлюється на підшипнику барабана механізму підйому підвіски гака, що дозволяє відстежувати температуру підшипникового вузла та запобігати його перегріву.

Для генерування імпульсів у ключових точках руху гака мостового крана, а також для сигналізації початку уповільнення, дублюючого захисту від виходу за межі робочої зони, реалізації перемикань у системі управління пропонується використання індуктивних датчиків наближення BERO 3RG40 41-6KD00.

Ці датчики є твердотільними пристроями, що не містять механічних елементів із тертям, завдяки чому мають високу стійкість до агресивних середовищ та механічних впливів. Вони забезпечують високу точність виявлення, стабільність роботи та високу частоту перемикань, що робить їх ідеальними для використання в системах автоматизованого керування з підвищеними вимогами до надійності.

Кінцеві вимикачі BERO працюють на основі високочастотного магнітного поля, що використовується для виявлення перешкод. Фізичні розміри цього поля залежать від вимірювальної відстані (для моделі 3RG40 41-6KD00 номінальна дистанція спрацьовування становить 20 мм). При попаданні в зону дії магнітного поля матеріалу з високою електропровідністю або магнітними властивостями відбувається ослаблення поля, що призводить до активації вихідних ключів.

Датчики BERO підтримують підключення до програмованих логічних контролерів (ПЛК) та працюють у діапазоні напруг 5-24V DC за допомогою 2-провідної схеми підключення. Вибрані вимірювальні перетворювачі

забезпечать ефективний контроль роботи електроприводної системи та її елементів.

Застосування частотного управління швидкістю обертання валу електродвигуна дозволить: розширити діапазон і плавність регулювання швидкості, зменшити габарити системи управління, підвищити загальну надійність роботи електроприводу.

Проектування системи автоматичного регулювання для двигуна з фазним ротором із використанням ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500, перетворювачів частоти та апаратури управління через Profibus є високоефективним рішенням для автоматизованої системи управління електроприводом мостового крану.

Важливо врахувати кілька ключових аспектів – налаштування та зв'язок елементів системи, розробку логіки управління, інтеграцію обладнання, моніторинг та забезпечення захисту від аварійних ситуацій.

Таблиця 2.1 – Складові системи автоматичного регулювання

САР
Структура системи
1. Програмований логічний контролер (PLC) SIMATIC S7-1500: основний елемент управління всією системою. Він приймає сигнали від датчиків, перетворювачів частоти і операторських панелей та видає команди для управління двигуном. 2. Перетворювач частоти (частотний перетворювач): відповідає за зміни частоти живлення двигуна, що дозволяє регулювати його швидкість обертання. Взаємодіє з контролером через шину. Двигун з фазним ротором: асинхронний двигун з можливістю регулювання швидкості та високим пусковим моментом. 3. Панелі оператора: апаратура управління в кабінах операторів, яка забезпечує моніторинг і контроль системи в режимі реального часу. 4. Шина Profibus: промислова шина для передачі даних між контролером, перетворювачем частоти та іншими компонентами
Функції системи
1. Контроль швидкості обертання двигуна: через частотний перетворювач контролер SIMATIC S7-1500 регулює частоту живлення двигуна, що дозволяє точно налаштовувати швидкість. 2. Автоматичне регулювання моменту: контролер може використовувати сигнали з датчиків моменту для підтримки стабільного моменту при різних навантаженнях на двигун. 3. Реалізація зворотного зв'язку: система отримує сигнали від датчиків (наприклад, датчики швидкості, положення або моменту), аналізує їх і відповідно регулює параметри живлення двигуна. 4. Моніторинг стану: панелі оператора дозволяють операторам отримувати інформацію про роботу двигуна в реальному часі, включаючи аварійні сигнали, діагностичні дані та параметри роботи системи.

Продовження таблиці 2.1

Етапи проектування системи
1. Розробка логіки управління. Налаштування зв'язку через Profibus. Конфігурація мережі Profibus: у середовищі TIA Portal необхідно налаштувати зв'язок між контролером SIMATIC S7-1500, перетворювачем частоти та панелями оператора. Для цього використовується стандартний протокол Profibus. 2. Обмін даними. Контролер обробляє вхідні сигнали з панелей оператора, частотного перетворювача та датчиків, а також надсилає команди на перетворювач для зміни параметрів роботи двигуна. 3. Впровадження системи моніторингу та управління. Панелі оператора: розробка інтерфейсу Human Machine Interface на базі панелей оператора (наприклад, TP270 або інші моделі Siemens), що підключені через Profibus. Оператори зможуть відслідковувати основні параметри роботи двигуна, здійснювати запуск та зупинку, а також керувати технологічними процесами. 4. Запуск і тестування системи: після завершення програмування і налаштування всіх компонентів, виконується пусконалагодження системи. Тестується робота двигуна з фазним ротором у різних режимах, а також перевіряється коректність обміну даними між контролером і частотним перетворювачем.
Захист і безпека системи
1. Аварійне вимкнення: програмна логіка повинна включати механізми аварійного вимкнення двигуна у випадку перевантаження, короткого замикання або інших несправностей. 2. Захист від перевантажень: інтеграція функцій захисту двигуна з фазним ротором від перевантаження через частотний перетворювач. 3. Сигналізація: система повинна повідомляти операторів про критичні ситуації через панелі оператора або інші засоби сигналізації.
Переваги системи
1. Точне управління: завдяки використанню частотного перетворювача та контролера S7-1500 забезпечується високоточне управління технологічним параметром двигуна з фазним ротором. 2. Гнучкість: система дозволяє легко змінювати параметри роботи двигуна залежно від умов процесу. 3. Надійність: використання технології Profibus і надійних компонентів Siemens гарантує стабільність і довговічність системи. 4. Можливість модернізації: система легко інтегрується з іншими компонентами і може бути модернізована для майбутніх потреб.

Проектування системи автоматичного регулювання двигуна з фазним ротором на базі SIMATIC S7-1500, перетворювачів частоти та шини Profibus є задачею, що потребує комплексної інтеграції апаратних і програмних компонентів. Така система забезпечує високу точність

управління завдяки гнучкому налаштуванню алгоритмів, надійність роботи завдяки використанню сучасних контролерів і стійких до зовнішніх впливів датчиків, гнучкість у налаштуванні для адаптації під конкретні виробничі потреби.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАННОЇ СИСТЕМИ

3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

При частотному регулюванні важливо впливати на двигун таким чином, щоб його механічні характеристики гарантували необхідну перевантажувальну здатність і стійкість у всіх режимах зміни швидкості обертання валу. Це дозволяє забезпечити стабільність роботи двигуна та розширити діапазон регулювання частоти обертання.

Застосування регульованих електроприводів дозволить:

– підвищити ефективність технологічного процесу завдяки скороченню часу на планове обслуговування та ремонт;

– підвищити продуктивність за рахунок скорочення часу, необхідного для технологічних операцій з переміщення вантажів;

– забезпечити рівномірність виконання та можливість автоматизації виробничих процесів;

– забезпечити безступінчасте регулювання швидкості відповідно до вимог технологічного процесу;

– покращити динаміку роботи електроприводу, що дозволить знизити знос механічних компонентів і подовжити термін служби устаткування.

При живленні двигуна через частотний перетворювач значно зменшуються пускові струми та струмові перевантаження, що сприяє більш плавному запуску та стабільній роботі обладнання.

Частотний перетворювач забезпечує основні види захисту, зокрема від:

– короткого замикання у силових ланцюгах.

– перевантаження двигуна та силових компонентів.

– підвищення напруги в ланцюзі постійного струму.

– зниження напруги у цьому ж ланцюзі.

– обриву фази живлення, що може спричинити нестабільну роботу електроприводу.

– перегріву радіаторів силових елементів, що запобігає їх виходу з ладу.

– перегріву електродвигуна, що подовжує його термін експлуатації.

– замикань на землю у силових колах, що забезпечує електробезпеку.

– збоїв у мікропроцесорній системі, що може впливати на керування електроприводом.

Завдяки цим функціям частотний перетворювач значно підвищує надійність, безпеку та ефективність роботи електроприводних механізмів.

Спрацювання будь-якого з захистів призводить до відключення електроприводу. Інформація про спрацювання захисту відображено на дисплеї панелі управління, що знаходиться на перетворювачі, а також на пульті дистанційного управління, що дозволяє швидко виявити і усунути

несправності.

Розглянемо систему регулювання швидкості і позиціонування підвіски гака мостового крана. Вхідним параметром цієї підсистеми є напруга, що відповідає заданій швидкості переміщення гака, а зворотний зв'язок забезпечується кодом з вимірювального перетворювача швидкості, який відповідає фактичній частоті обертання приводного колеса. Завдяки такій структурі система управління реалізує точний алгоритм регулювання швидкості переміщення гака, що забезпечує стабільність та високу точність позиціонування. Регулювання кутової швидкості електродвигуна виконується у широкому діапазоні за рахунок використання частотного перетворювача, що дозволяє адаптувати роботу крана до різних умов експлуатації.

З урахуванням потужності приводного електродвигуна, доцільно використовувати частотні перетворювачі від провідних виробників, зокрема:

– Siemens (Simatic S7);
– Schneider Electric (Altivar).

Ці рішення забезпечують надійність, точність керування та ефективну роботу електроприводу у промислових умовах.

3.2 Вибір перетворювача частоти електроприводу підйому гаку мостового крану

Застосування частотного перетворювача з метою регулювання швидкості обертання валу електродвигуна з короткозамкненим ротором за дозволяє отримати наступні переваги:

– зменшення пускового струму, що знижує навантаження на електромережу;
– скорочення споживання електроенергії, що підвищує енергоефективність;
– можливість плавного пуску без використання додаткових пускових пристроїв;
– збільшення продуктивності завдяки швидкому запуску та точному регулюванню швидкості;
– діапазон регулювання за швидкістю збільшується;
– знижуються витрати з обслуговування;
– керованість та надійність функціонування електроприводу підвищується;
– модернізація АСУ електроприводами здійснюється з мінімальними витратами завдяки її окупності.

Завдяки цим перевагам частотний перетворювач є ефективним рішенням для оптимізації роботи електроприводних механізмів.

Частотне регулювання дає можливість керувати механічними та електромеханічними характеристиками двигуна, забезпечуючи їх стабільність і жорсткість. Це дозволяє досягти необхідної

перевантажувальної здатності в усьому робочому діапазоні регулювання кутової швидкості обертання валу електродвигуна.

Такі переваги частотного регулювання куткової швидкості обертання валу дозволяють достигати стабільної швидкості при навантаженні електроприводу та збільшити діапазон регулювання.

Зниження енерговитратної складової електроприводу при використанні частотного перетворювача досягається за рахунок зниження пускових струмів короткозамкнених електродвигунів до значень (1,1... 1,5) $I_{ном}$.

Система регулювання швидкості електроприводу підйому гаку крана працює по завданню на переміщення вантажу з заданою швидкістю. На першому етапі при замкнених колодках електромагнітного гальма здійснюється набір моменту необхідного для підйому вантажу. Після цього подається живлення на електромагнітне гальмо з метою зняття гальма з шківу. На другому етапі здійснюється безпосередньо підйом або опускання вантажу. При підйому вантажу при робочому пуску електроприводом вибирається слабкість канату – режим малого навантаження та малих швидкостей, Після зняття слабкості канату здійснюється підйом вантажу. Завдання дозвіл та на швидкість переміщення подає ПЛК АСУ крана. Регулювання куткової швидкості обертання валу електродвигуна здійснює перетворювач частоти. При регулюванні швидкості використовується сигналу зворотного зв'язку з датчика швидкості.

Відмінною особливістю сучасного етапу розвитку кранових електроприводів є значне розширення застосування частотно-регульованого приводу, а саме:

– покращеним динамічним характеристикам за допомогою плавного пуску та зупинки механізмів;

– великого діапазону регулювання та високої точності підтримки швидкості шляхом адаптації до характеристик двигуна та досконалих алгоритмів векторного управління, що дозволяє реалізовувати як розімкнені, так і замкнуті системи регулювання швидкості кранових механізмів;

– збільшення терміну служби за допомогою зменшення динамічних навантажень на металоконструкцію та механізми підйомного крана та скорочення експлуатаційних витрат;

– істотного скорочення споживаної електроенергії через відсутність пускових кидків струму, виключення реостатів при регулюванні швидкості, зниження споживаної з мережі реактивної потужності і можливості повернення енергії в мережу живлення за допомогою рекуператорів;

– підвищенню надійності кранових приводів за допомогою виключення релейно-контакторної апаратури, що швидко зношується;

– збільшення продуктивності кранових механізмів за допомогою оптимізації циклограми роботи.

На даний час на крановому обладнанні для електроприводних

систем мають широке розповсюдження частотні перетворювачі фірми Schneider Electric типу ATV. Використання частотних перетворювачів даної компанії викликано їх надійністю та сбалансованим співвідношенням ціна-якість.

Використання перетворювачів типу ATV для кранових механізмів та їх вузлів дозволяє здійснити оснащення найрізноманітнішими сучасними засобами автоматизації та електроустаткування виробництва компанії «Schneider Electric», а саме:

– програмовані логічні контролери та засоби людино-машинного інтерфейсу;

– приводна техніка, пуско-захисна та комутаційна апаратура для управління двигунами змінного струму;

– командоконтролери, пульти управління, датчики та кінцеві вимикачі;

– щитове обладнання з пристроями вентиляції та кондиціювання.

У приводах кранів різних типів, в тому числі мостових, успішно використовуються перетворювачі частоти сімейства Altivar ATV900 – для двигунів потужністю від 15 до 630 кВт. Вони мають наступні функції для кранового застосування:

– управління гальмом, адаптоване для приводів переміщення та підйому, та контроль стану гальма;

– управління завершенням ходу кранової підвіски (кінцеві вимикачі);

– забезпечення високошвидкісної роботи з порожнім гаком або при невеликому навантаженні;

– вибір слабини/натягу вантажних канатів;

– вирівнювання навантаження, схема «ведучий-відомий», управління моментом;

– забезпечення контролю перевищення заданої швидкості, обертання у зворотному напрямку, перевантаження.

Частотний перетворювач ATV900, має універсальне застосування завдяки можливості розширення функціональності приводу за допомогою нарощування апаратних і програмних засобів, до яких відносяться карти розширення входів-виходів, карти інтерфейсів датчиків, комунікаційні карти та програмована карта вбудованого контролера.

Частотний перетворювач ATV900 має алгоритми векторного та скалярного управління, які забезпечують роботу однодвигуних та багатодвигуних приводів кранів зі стандартними та спеціальними двигунами як у розімкнутій, так і замкнутій системах регулювання швидкості. Завдяки даній властивості, присутня можливість проводити модернізацію також інших рухомих та обертових механізмів крану, де є необхідність частотного регулювання.

Частотний перетворювач ATV900, оснащений карткою контролера, легко вбудовується в архітектуру управління автоматизованими крановими системами. Це рішення є найдешевшим варіантом організації подібних систем. Карта контролера має вбудований інтерфейс, що

пов'язує її з іншими пристроями, і може використовуватися для розробки власних додатків або вже з реалізованими готовими прикладними алгоритмами.

Частотний перетворювач вибирається, виходячи з вимог потужності, режимів роботи, контролю швидкості.

$$\text{Рчп} = 1{,}35 \cdot \text{Рн} = 1{,}35 \cdot 30{,}7 = 41{,}45 \text{ кВт}. \quad (3.1)$$

Для приводу підйому обираємо перетворювач ATV900HD55N4 потужністю 55 кВт.

Обраний тип частотного перетворювача має ряд переваг:

– асинхронні короткозамкнені електродвигуни мають високий рівень захисту та експлуатаційної надійності, вимагають мінімальних витрат на обслуговування завдяки відсутності щіткового апарату;

– знижена кратність пускового струму (1,5$I_н$ замість 5,7 $I_н$, де $I_н$ — номінальний струм електродвигуна) за збереження номінального пускового моменту електродвигунів забезпечує сприятливі умови для роботи суднової електростанції. Широкий діапазон регулювання частоти обертання (1:100) дозволяє оперативне змінювати швидкість переміщення крана та підйому вантажу;

– розвинена система захисту та діагностики частотних перетворювачів забезпечує високу експлуатаційну надійність роботи приводів. Наявність вбудованих у частотні перетворювачі фільтрів забезпечує нормативний рівень електричних перешкод та гармонійних складових напруги мережі живлення;

– частотні перетворювачі добре поєднуються з джойстиками з аналоговим вихідним сигналом, що дозволяє організувати ефективний людино-машинний інтерфейс – ергономічний та комфортний для оператора пульт управління.

Для розгону та гальмування механізму підйому необхідно формування S-подібної характеристики, оскільки в порівнянні з лінійною вона дає більш плавні розгін і гальмування.

3.3 Проектування АСУ електроприводом підйому гаку крану

Система контролю крана та релейного захисту зазвичай виконується у двоканальному виконанні, що забезпечує надійність і безпеку роботи обладнання. При цьому релейний та програмний захист повинні функціонувати ідентично по всім робочим каналам.

З метою формування програмного каналу захисту та діагностики станів електроприводу крану проведемо аналіз кількості та типу інформаційних та керуючих сигналів ПЛК. ПЛК з модулями вводу/виводу інформації формує станцію до якої підключаються дублюючі контакти релейної автоматики пуску-захисту, а також вимірювальні перетворювачі контролю технологічних параметрів: швидкості, ваги та позиціонування вантажу, зближення.

Для визначення кількості дискретних сигналів у автоматизованій системі керування (АСУ) електроприводом підйому гака крана виконаємо побудову функціональної схеми автоматизації.

Взаємодія ПЛК із технічними засобами автоматизації

До технічних засобів автоматизації належать:

– датчик швидкості та положення. Використовується для вимірювання кутової швидкості та положення механізму. Підключається безпосередньо до вхідного модуля контролю кутової швидкості частотного перетворювача;

– індуктивні датчики положення. Використовуються для контролю критичних положень механізму. Підключаються безпосередньо до сигнального дискретного модуля станції ПЛК. Для підвищення рівня безпеки індуктивні датчики розподіляються на дві окремі групи, що дозволяє реалізувати резервування та дублюючий контроль.

На основі цієї взаємодії буде розрахована загальна кількість дискретних сигналів, необхідних для повноцінного керування електроприводом та забезпечення безпечної експлуатації крана.

Індуктивні датчики розподілені на дві групи відповідно до напрямку руху. Перша група активується під час підйому вантажу. Друга група працює при опусканні вантажу.

При спрацьовуванні першого датчика у групі електропривод переходить на знижену швидкість, забезпечуючи плавний рух. При активації останнього датчика, що відповідає крайньому верхньому або нижньому положенню, електропривод зупиняється. Паралельно формується внутрішній блокувальний сигнал, що забороняє рух у напрямку, у якому спрацював кінцевий вимикач, тим самим запобігаючи виходу вантажу за допустимі межі.

Такий підхід підвищує точність позиціонування та забезпечує безпечну експлуатацію крана.

Датчик температури двигуна. Підключення датчика температури типу PTC здійснюється безпосередньо на входи модуля контролю температури двигуна частотного перетворювача

Вибір мікроконтролера здійснюємо з категорії складності АСУ. Обираємо ПЛК фірми SIEMENS типу SIMATIC S7-1500.

Підключення діагностичних сигналів спрацювання комунікаційних реле та реле захисту виконаємо безпосередньо до сигнальних входів ПЛК.

Керування живленням комутаційних реле зняття гальм з електропривода підйому, а також подачі живлення на перетворювач частоти здійснимо з використанням сигнального модулю виводу дискретних сигналів SM522 16x120 / 230 VAC 6ES7 522-5FH00-0AB0. До модуля підключено шість каналів управління реле, останні десять каналів зарезервовані для інших приводів крану.

Для управління частотним перетворювачем в автоматичному режимі потрібно формування дискретних керуючих сигналів з напругою 24

VDC.

Для цього використовуємо дискретний сигнальний модуль виводу типу SM522 16x24 VDC 6ES7 522-1BH10-0AA0.

Вхідні сигнали з кінцевих вимикачів і дублюючих контактів під’єднаємо до дискретного вводу SM521 16x24 VDC 6ES7 521-1BH10-0AA0.

Безконтактний контроль положення гака при їх позиціонуванні підключимо до модулю вводу дискретних сигналів SM521 16x24 VDC 6ES7 521-1BH10-0AA0. Дані модулі спеціалізовані для обробки сигналів з індуктивних датчиків BERO. Підключення датчиків здійснюється по двохпровідній схемі.

Структурна схема АСУ електроприводом підвіски підйому гаку крану наведена на рисунку 3.1.

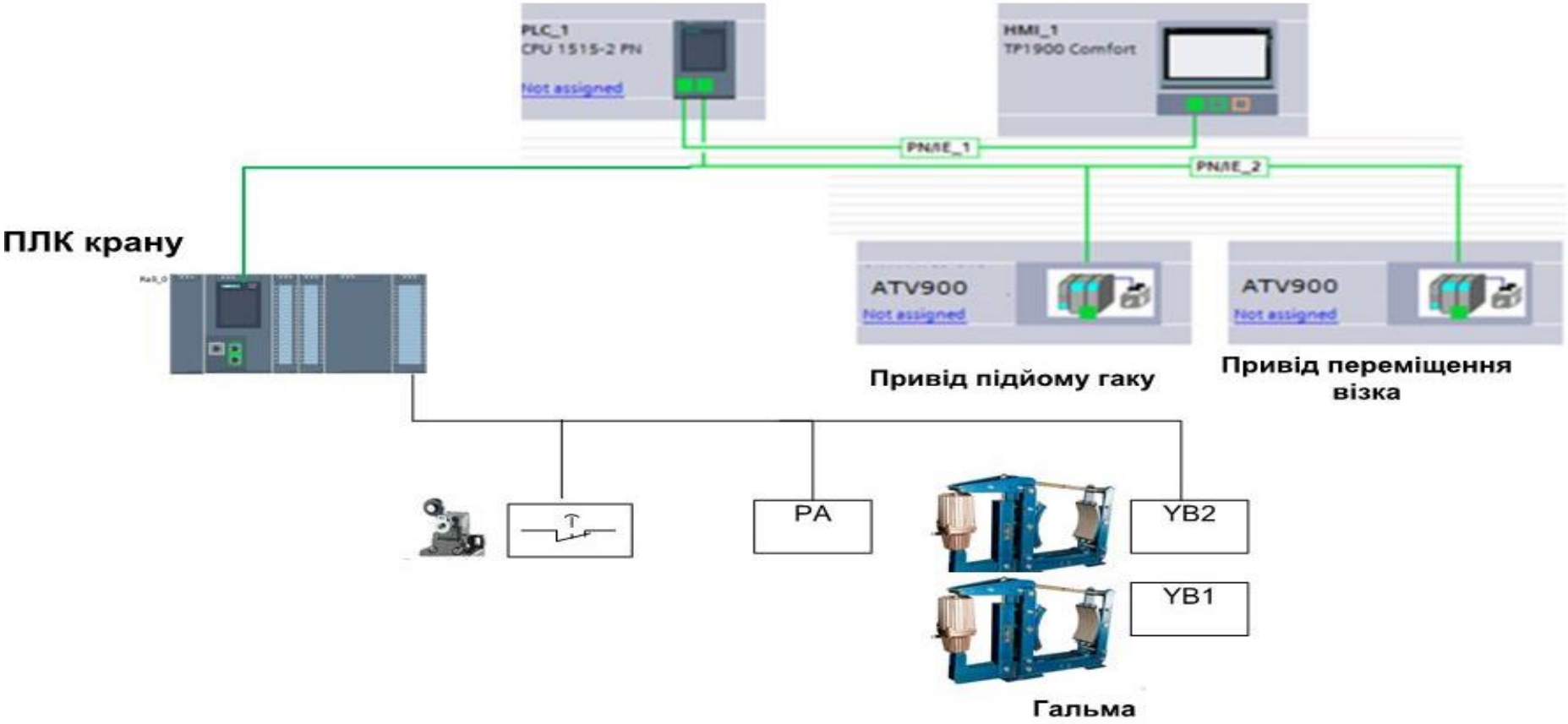


Рисунок 3.1 Структурна схема АСУ електроприводом підвіски підйому гаку крану

Після вибору модулів станції ПЛК АСУ електроприводом підйому гаку крану проведемо конфігурування центральної стійкі Для конфігурування центральної стійкі використовуються спеціалізоване ПЗ TIA Portal. Результати конфігурування наведені на рисунку 3.2.

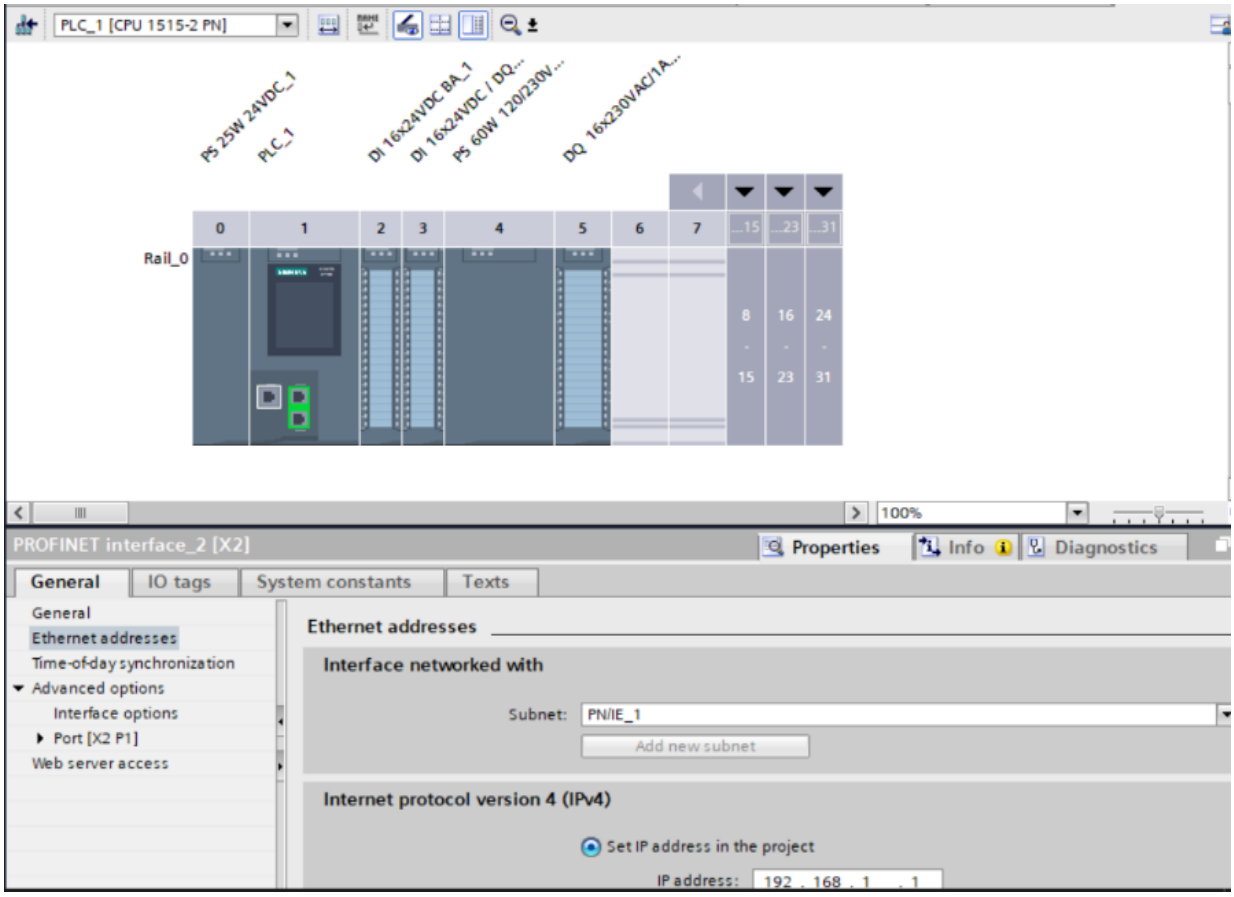


Рисунок 3.2 Конфігурація центральної стійки

3.4 Розробка блок-схем алгоритмів роботи крана в заданих режимах

Система управління крана забезпечує два режими роботи: режим "дистанційний", режим ручного управління.

У режимі "дистанційного управління" система обмежує максимальну швидкість руху підйомна підвіски гака до величини 0,08 м/с. В режимі ручного управління швидкість відповідає максимальній для даної установки, але управління здійснює оператор з панелі управління.

Виходячи з опису роботи крана, розробимо блок-схему алгоритму функціонування системи управління електроприводом підвіски гака мостового крана яка представлена на рисунку 3.3

Розробка блок-схеми алгоритму роботи в режимі «дистанційного управління». Даний режим необхідний для проведення робіт в важко доступних місцях видимості. Для підготовки крана до роботи в цьому режимі перемикач режимів роботи на панелі оператора (ПО) встановлюється в положення «дистанційного управління».

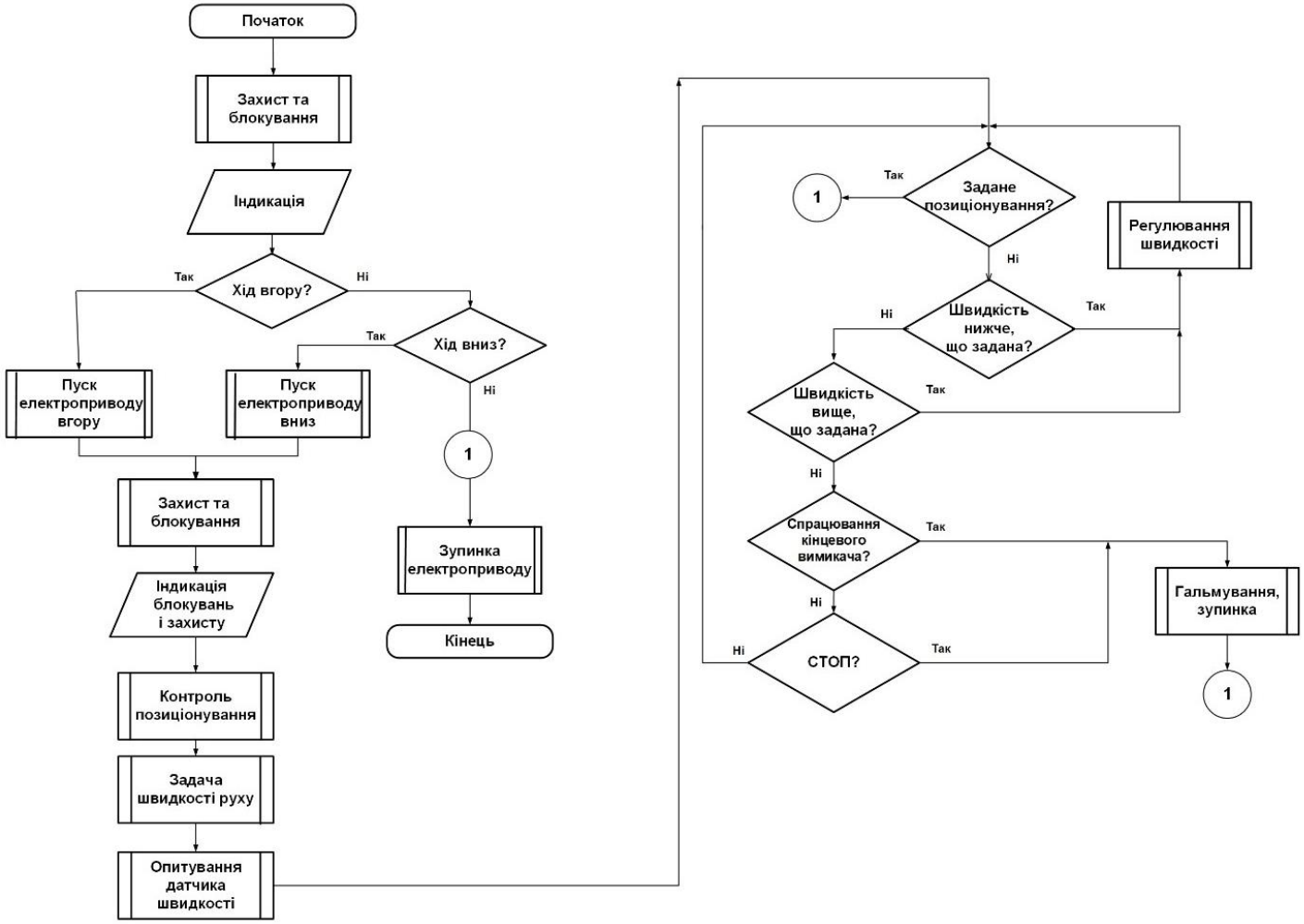


Рисунок 3.3 – Блок схема алгоритму функціонування системи управління електроприводом підвіски гака мостового крана

У процесі керування електроприводом підвіски гака мостового крана сигнальний модуль програмованого логічного контролера отримує сигнал, що відповідає вибраному режиму роботи. Далі ця інформація передається на дисплей панелі оператора, де вона відображається у вигляді буквено-цифрового коду, що забезпечує наочність і зручність контролю за станом системи.

Оскільки система управління побудована за двоканальним принципом, контролер формує керуючі сигнали окремо для кожного каналу. Ці сигнали надходять на провідний контролер, де вони порівнюються між собою для перевірки ідентичності. У разі збігу система приймає рішення про подальші дії, що гарантує високу надійність і безпеку експлуатації крана.

Оператор задає напрямок руху підвіски гака за допомогою пульта керування, після чого відповідні команди надходять у програмований логічний контролер. Контролер обробляє введені параметри та передає керуючі сигнали на модуль управління перетворювача частоти, який регулює швидкість обертання двигуна відповідно до заданих режимів. Значення швидкості, необхідної для виконання конкретного робочого процесу, визначається на етапі програмування контролера, що дозволяє забезпечити точність і плавність руху підвіски.

Під час роботи системи датчик швидкості постійно відстежує реальну швидкість переміщення підвіски гака та передає отримані дані у програмований логічний контролер. Одночасно ця інформація відображається на дисплеї панелі оператора, що дозволяє візуально контролювати робочі параметри та оперативно реагувати на зміни в процесі керування.

3.5 Розробка імітаційної математичної моделі частотно-регульованого електроприводу підйому портального крану

На рисунку 3.4 представлено реалізацію імітаційної моделі слідкуючого асинхронного електроприводу з векторним управлінням, що враховує процеси квантування сигналів зворотного зв’язку за рівнем, а також дискретизацію сигналів управління в часі. Ця модель дозволяє дослідити динамічні характеристики електроприводу, оцінити його реакцію на зовнішні впливи та перевірити ефективність регулювання параметрівІмітаційна модель асинхронного електроприводу з векторним управлінням складається з наступних функціональних елементів:

- джерело трифазного змінного струму необмеженої потужності;
- реактор на стороні мережі живлення;
- некерований діодний випрямляч;
- конденсатор у ланці постійного струму;
- інвертор напруги на транзисторах IGBT;
- моделі асинхронного двигуна;
- ланцюг розряду конденсатора, що складається з гальмівного резистора і транзисторного ключа.

Система управління електроприводу реалізована як багатоконтурна система регулювання і включає моделі:

– контур регулювання струму I_{1q} з ПІ-регулятором;

– контур регулювання швидкості (рисунок 3.5) двигуна $\omega_{дв}$ з ПІ-регулятором;

– контур регулювання потокозчеплення ротора (рисунок 3.6) Ψ_{2d} з ПІ-регулятором;

– перетворювачів координат керуючих напруг;

– формувача регульованих координат приводу в загальному випадку з датчиками струмів, потоків та швидкості двигуна.

У даному випадку прийнята модель двофазного асинхронного двигуна в системі координат d, q, що обертається. Передбачається, що струми I_{1d}, I_{1q} і потокозчеплення ротора Ψ_{2d} вимірюються аналоговими датчиками, потім аналоговий сигнал оцифровується за допомогою АЦП. Швидкість обертання двигуна може вимірюватися за допомогою аналогового датчика швидкості, встановленого на валу двигуна, а положення виконавчого органу механізму імпульсним датчиком, встановленим на вихідному валу механізму.

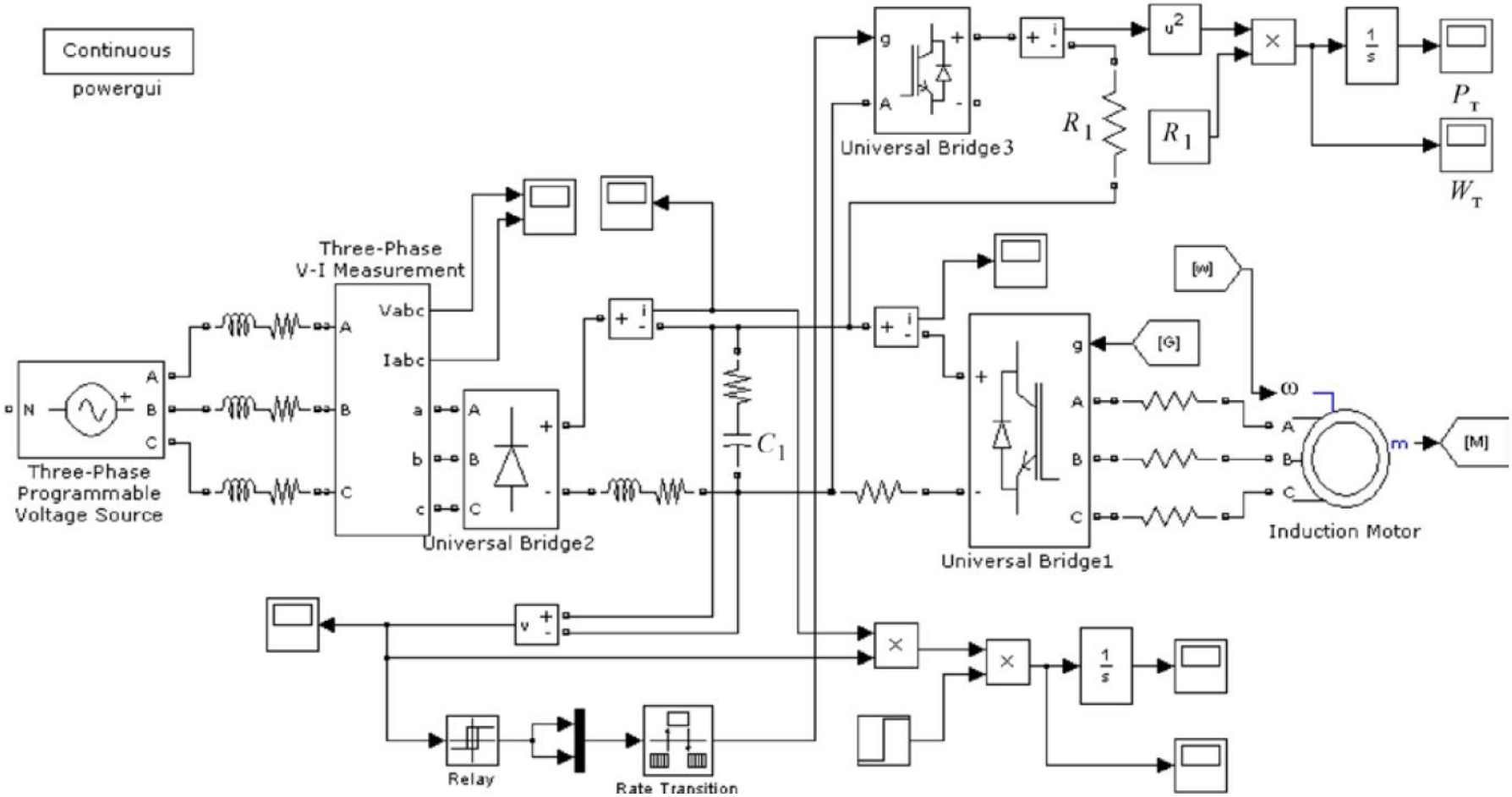


Рисунок 3.4 – Імітаційна математична модель електричної частини силового каналу системи перетворювач частоти - асинхронний електродвигун

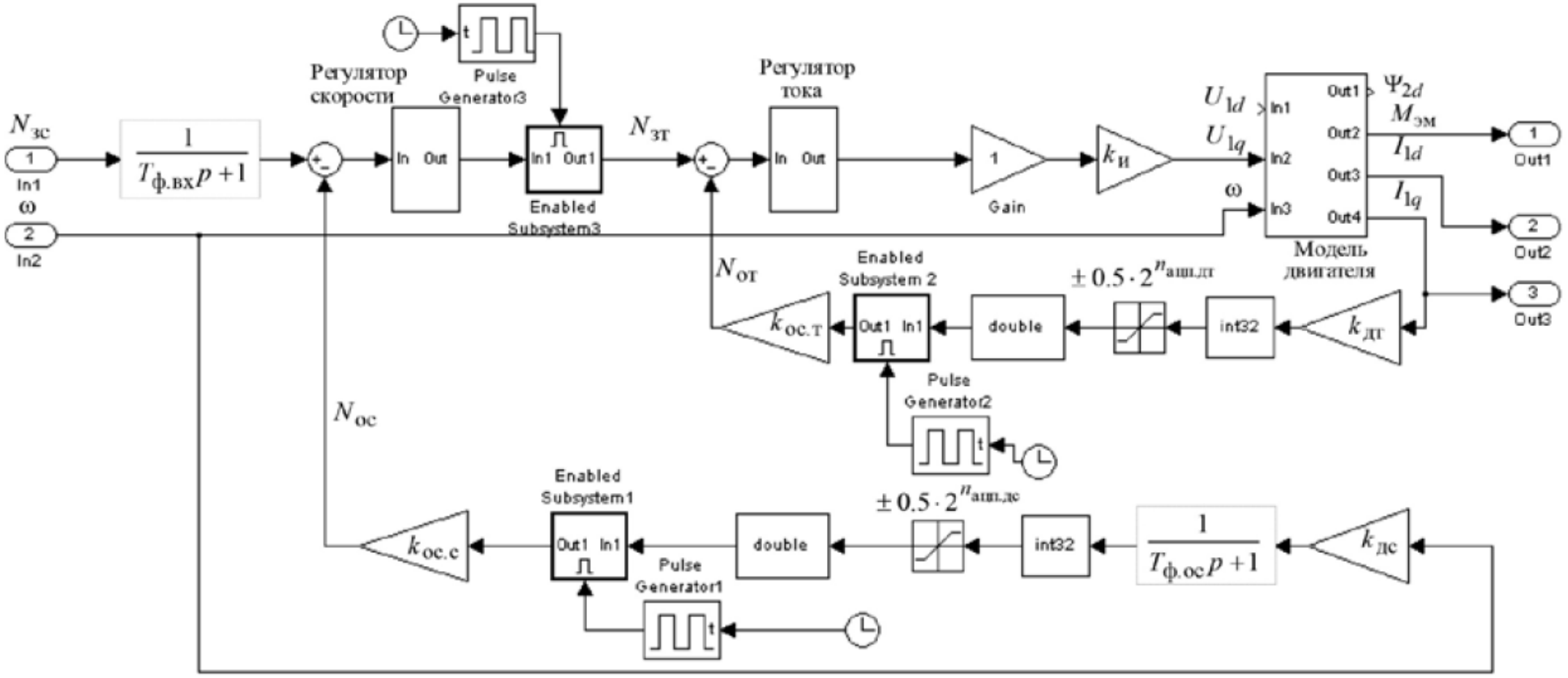


Рисунок 3.5 – Імітаційна математична модель контуру швидкості з аналоговим датчиком і внутрішнім контуром I_{1q}

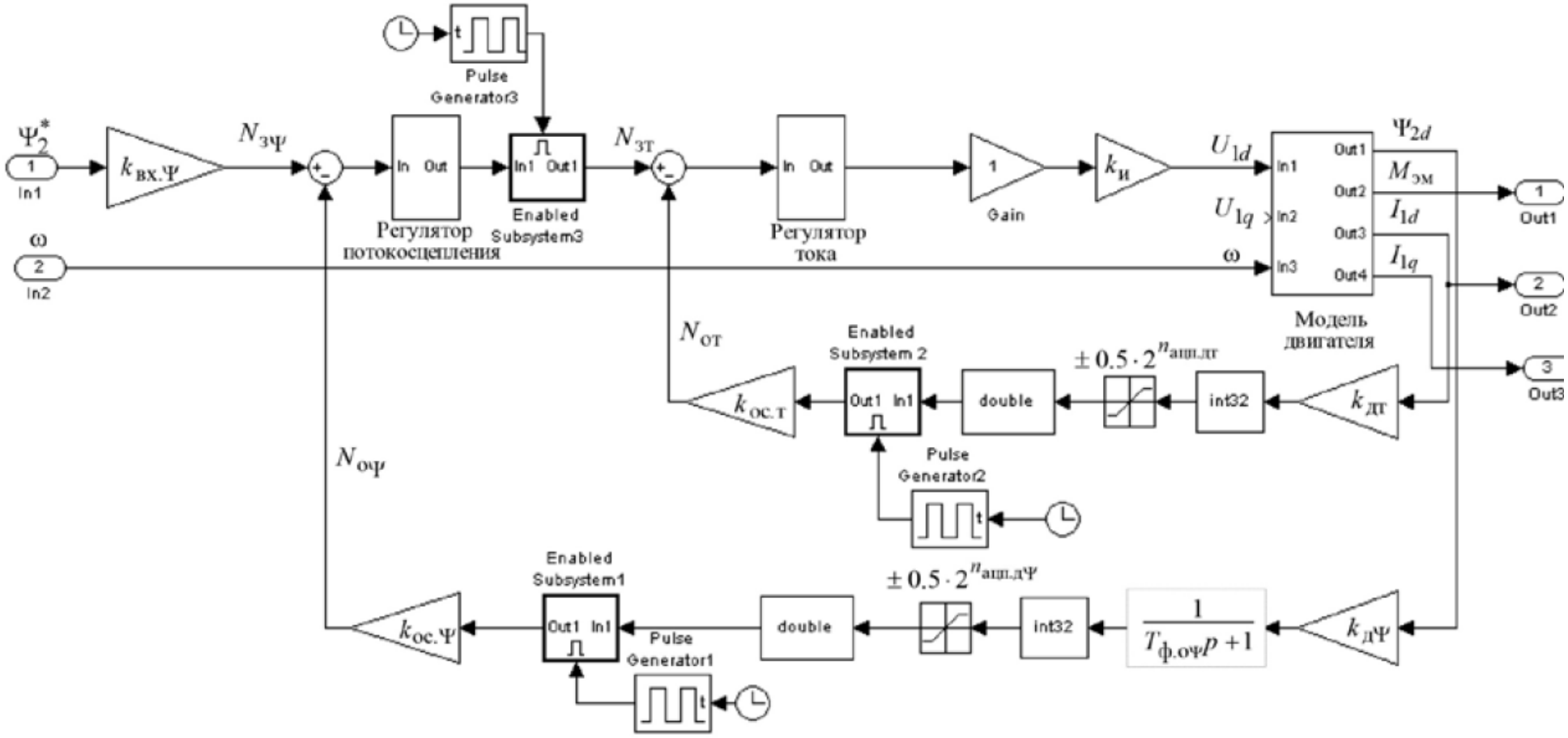


Рисунок 3.6 – Імітаційна математична модель контуру потокозчеплення з аналоговим датчиком і внутрішнім контуром I_{1d}

3.6 Налаштування контурів регулювання АСУ асинхронним двигуном

Структурна схема контуру струму наведена на рисунку 3.7. контури струмів I_{1d} та I_{1q} реалізовані по однаковий схемі и мають однакові параметри.

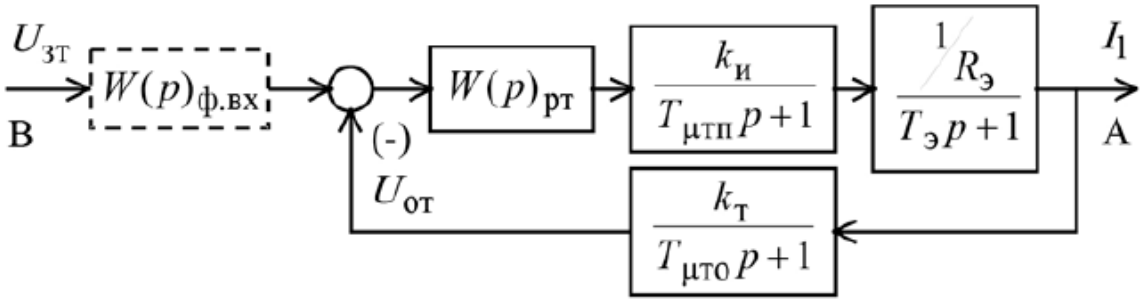


Рисунок 3.7 – Структурна схема контуру струму

Оптимізуємо даний контур по модулю

$$W_{\text{разI}}(p) = W_{\text{рс}}(p)\frac{K_{\text{тп}}}{\text{T}_{\text{тп}}\text{p}+1}\frac{1/R_e}{\text{T}_{1e}\text{p}+1}\frac{K_{\text{дт}}}{\text{T}_{\text{дт}}\text{p}+1}. \quad (3.2)$$

Постійні часу $T_{тп}$ та $T_{дт}$ завдяки значно менше, чім T_e, тому відносимо їх до малих постійних чачу що не компенсуються. Тому можлива понизити порядок системи:

$$W_{\text{разI}}(p) = W_{\text{рс}}(p)\frac{K_{\text{тп}}K_{\text{дт}}}{\text{T}_{\mu 1}\text{p}+1}\frac{1/R_e}{\text{T}_{1e}\text{p}+1}. \quad (3.3)$$

де $\text{T}_{\mu 1}$ -еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру струму, *с*.

Для налаштування на оптимум по модулю необхідно ПІ-регулютор

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{K_{\text{тп}}(\text{T}_{\text{рс}}\text{p}+1)}{\text{T}_{\text{рс}}\text{p}}. \quad (3.4)$$

де $T_{рс}$ – постійна часу регулятора струму, приймаємо $T_{рс} = T_{1e} =$ 0,2476 с; $к_{рс}$ – коефіцієнт регулятора струму:

$$\text{K}_{\text{рс}} = \frac{\text{T}_1 R_e}{2\text{T}_{\mu 1}K_{\text{тп}}K_{\text{дт}}}. \quad (3.5)$$

Тоді передаточна функція розімкненого контуру струму відповідає налаштуванню на оптимум по модулю:

$$W_{\text{разI}}(p) = \frac{1}{2\text{T}_{\mu 1}\text{p}(\text{T}_{\mu 1}\text{p}+1)}. \quad (3.6)$$

Передаточна функція замкненого контуру струму

$$W_{\text{I}}(p) = W_{\text{розI}}(p)\frac{1}{1 + W_{\text{роз1}}(\text{p})}\frac{\text{T}_{\text{дт}}\text{p} + 1}{\text{K}_{\text{дт}}} \tag{3.7}$$

$$W_{\text{I}}(p) = \frac{1}{1 + 2\text{T}_{\mu 1}\text{p}\left(\text{T}_{\mu 1}\text{p} + 1\right)}\frac{\text{T}_{\text{дт}}\text{p} + 1}{\text{K}_{\text{дт}}}. \tag{3.8}$$

Нехтуючи в знаменники членом другого порядку малості, а в чисельнику постійною часу $\text{T}_{\text{дт}} \approx 0$, передаточна функція контуру струму набуде вигляд

$$W_{\text{I}}(p) = \frac{{}^{1}/_{\text{K}_{\text{дт}}}}{2\text{T}_{\mu 1}\text{p} + 1}. \tag{3.9}$$

Визначаємо коефіцієнт передачі та постійну часу контуру струму.
Передаточний коефіцієнт датчика струму

$$\text{K}_{\text{дт}} = \frac{0{,}5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}}{\sqrt{2}\sigma_{\text{c}} I_{\text{еп.макс}}} = \frac{0{,}5 \cdot 2^{10}}{\sqrt{2} \cdot 1{,}2 \cdot 21{,}12} = 14{,}285. \tag{3.10}$$

де $\sigma_c \geq 1{,}2$ – коефіцієнт, що враховує імовірне перегулювання струму.
Значення максимального завдання на вході контуру струму $N_{\text{зсюмакс}}$:

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{c}}} = \frac{1}{1{,}2} = 0{,}833. \tag{3.11}$$

Визначаємо коефіцієнт передачі контуру струму та зворотного зв'язку

$$\text{K}_{\text{c}} = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{\text{c}} I_{1\text{н}}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 1{,}2 \cdot 15{,}013} = 0{,}039. \tag{3.12}$$

$$\text{K}_{\text{зз.с}} = \frac{1}{\text{K}_{\text{c}}} = \frac{1}{0{,}039} = 0{,}07. \tag{3.13}$$

Інтервали квантування сигналів в ланки зворотного зв'язку контуру струму

$$\text{T}_{\text{зз.с}} = \text{T}_{\text{пк.с}} = \text{T}_{\text{зу.і}} = \text{T}_{\text{шім}} = 1 \cdot 10^{-4}\text{с}. \tag{3.14}$$

Постійна часу аналогового фільтру в ланки вимірювання струму

$$\mathrm{T}_{\text{ф.ос}} = 0.$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичної ланки для електроприводів загальнопромислового призначення n_c=3.

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру струму

$$\mathrm{T}_{\mu 1} = \frac{\mathrm{T}_{\text{зз.с}}}{n_c} + \mathrm{T}_{\text{зу.і}} + \mathrm{T}_{\text{ф.от}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{3} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1{,}333 \cdot 10^{-4}\text{с} \ . \quad (3.15)$$

Коефіцієнт типового налаштування контуру струму a_c=2. Коефіцієнт підсилення регулятора струму

$$\mathrm{K}_{\text{рс}} = \frac{\mathrm{T}_{1\text{e}} R_{1e}}{K_i K_T a_T T_{\mu 1}} = \frac{2{,}476 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}707}{311{,}127 \cdot 0{,}039 \cdot 2 \cdot 1{,}333 \cdot 10^{-3}} = 0{,}039. \quad (3.16)$$

Еквівалентна постійна часу замкненого контуру струму

$$\mathrm{T}_{\text{с}} = \ \mathrm{a}_{\mathrm{T}} \mathrm{T}_{\mu 1} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4}\text{с} \ . \quad (3.17)$$

Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором наведена на рисунку 3.8.

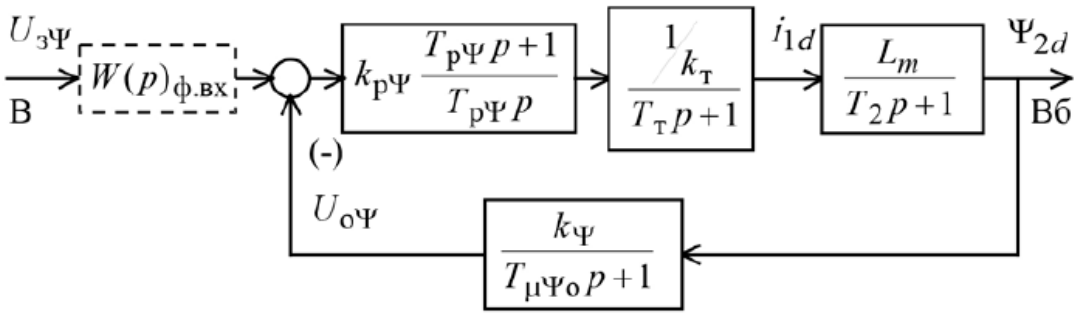


Рисунок 3.8 – Структурна схема потокозчеплення з ПІ-регулятором

При оптимізації контуру потокозчеплення внутрішній оптимізований замкнений контур струму представлений усіченою передатною функцією 1-го порядку (3.18).

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру по потокозчепленню

$$K_\Psi = \frac{U_{з\Psi макс}}{\Psi_{2н}}. \quad (3.18)$$

Передаточна функція ПІ регулятора потокозчеплення

$$W_{\text{рΨ}}(p) = \frac{K_{\text{рΨ}}\left(\text{T}_{\text{рΨ}}\text{p} + 1\right)}{\text{T}_{\text{рΨ}}\text{p}}. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт підсилення та постійна часу регулятора потокозчеплення

$$K_{\Psi} = \frac{\text{T}_2\text{K}_\text{T}}{L_m\text{K}_{\Psi}} \cdot \frac{1}{a_{\Psi}T_{\mu\Psi_e}}. \quad (3.20)$$

де $T_{\mu\Psi_e}$ - еквівалентна мала постійна часу контуру потокозчеплення, с.

Контур потокозчеплення з ПІ-регулятором має наступні передаточні функції

- розімкненого контуру

$$W_{\Psi\text{роз}}(p) = \frac{1}{a_{\Psi}\text{T}_T\text{T}_{\mu\Psi_0}\text{T}_{\mu\Psi_e}\text{p}^3 + a_{\Psi}T_{\mu\Psi_e}^2 p^2 + a_{\Psi}\text{T}_{\mu\Psi_e}\text{p}}. \quad (3.21)$$

- замкненого контуру по управлінню

$$W_{\Psi\text{зам}}(p) = \frac{\frac{1}{\text{K}_{\Psi}}\left(\text{T}_{\mu\Psi_0}\text{p} + 1\right)}{a_{\Psi}\text{T}_T\text{T}_{\mu\Psi_0}\text{T}_{\mu\Psi_e}\text{p}^3 + a_{\Psi}T_{\mu\Psi_e}^2 p^2 + a_{\Psi}\text{T}_{\mu\Psi_e}\text{p} + 1}$$

$$\approx \frac{\frac{1}{\text{K}_{\Psi}}\left(\text{T}_{\mu\Psi_0}\text{p} + 1\right)}{a_{\Psi}T_{\mu\Psi_e}^2 p^2 + a_{\Psi}\text{T}_{\mu\Psi_e}\text{p} + 1}. \quad (3.22)$$

Налаштування контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором близько до налаштування на МО системи 2-го порядку.

Коефіцієнт датчика потокозчеплення

$$K_{\Psi} = \frac{1}{\sigma_{\Psi}\Psi_{2\text{н}}} = \frac{1}{1{,}2 \cdot 0{,}88} = 0{,}947, \quad (3.23)$$

де σ_{Ψ}≥1,2 – коефіцієнт, що враховує імовірне перегулювання потокозчеплення.

Значення максимального завдання на вході контуру струму $N_{\text{зсюмакс}}$:

$$N_{\text{зΨ.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\Psi}} = \frac{1}{1{,}2} = 0{,}833. \quad (3.24)$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичної ланки для електроприводів загальнопромислового призначення n_{Ψ}=2.

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру потокозчеплення $\mathrm{T}_{\mu\Psi} = 1{,}1 \cdot 10^{-4}\mathrm{c}$.

Коефіцієнт типового налаштування контуру потокозчеплення a_Ψ=2.

Еквівалентна постійна часу замкненого контуру потокозчеплення $\mathrm{T}_2 = \mathrm{T}_{\mathrm{p}\Psi} = 0{,}298\ \mathrm{c}$.

Коефіцієнт підсилення регулятору потокозчеплення

$$\mathrm{K}_{\mathrm{p}\Psi} = \frac{\mathrm{T}_2 \mathrm{K}_\mathrm{T}}{L_m K_{\mathrm{д}\Psi} a_\Psi T_{\mu\Psi}} = \frac{0{,}0979 \cdot 0{,}039}{0{,}40072 \cdot 0{,}947 \cdot 2 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3}} = 14{,}01. \quad (3.25)$$

Структурна схема контуру швидкості з ПІ-регулятором приведена на рисунку 3.9.

При оптимізації контуру потокозчеплення внутрішній контур оптимізований замкнений контур струму уявлено передаточною функцією 1-го порядку, згідно (3.25).

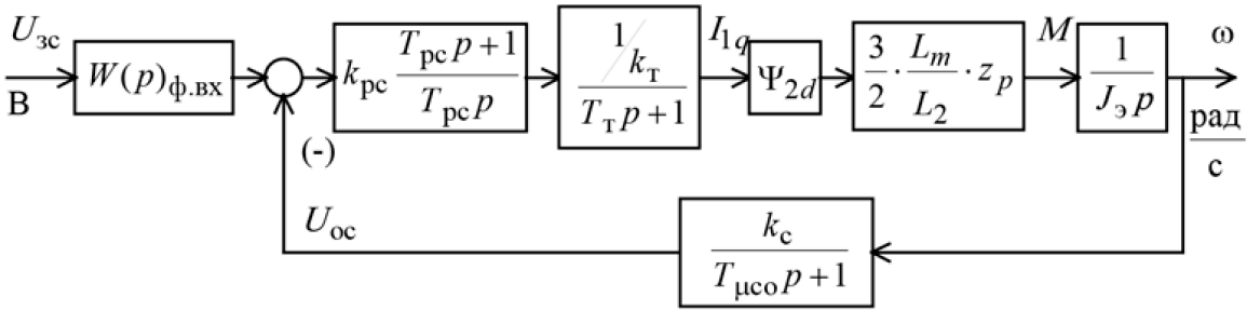


Рисунок 3.9 – Структурна схема контуру швидкості з ПІ-регулятором

Передаточна функція ПІ-регулятора швидкості

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{K_{\text{рш}}\left(\mathrm{T}_{\text{рш}}\mathrm{p} + 1\right)}{\mathrm{T}_{\text{рш}}\mathrm{p}}. \quad (3.30)$$

Коефіцієнт підсилення та постійна часу регулятора швидкості

$$K_\text{ш} = \frac{J_e \mathrm{K}_\mathrm{T}}{\Psi_{2\text{н}} \mathrm{K}_{\text{дв}} \mathrm{K}_\text{с}} \cdot \frac{1}{a_\text{с} T_{\mu\text{с}_e}}, \quad (3.31)$$

$$T_{\text{рш}} = b_\text{ш} a_\text{ш} T_{\mu\text{с}_e}, \quad (3.32)$$

де $T_{\mu\text{с}_e}$ - еквівалентна мала постійна часу контуру швидкості, с.

Контур швидкості з ПІ-регулятором має наступні передаточні функції

- розімкненого контуру

$$W_{\text{шроз}}(p) = \frac{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\mu c_e} p + 1}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^2 \text{T}_T \text{T}_{\mu ш_0} \text{T}_{\mu ш_e}^2 \text{p}^4 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^3 p^3 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^2 \text{p}^2}. \quad (3.33)$$

- замкненого контуру по управлінню

$$W_{\text{шзам}}(p) = \frac{\frac{1}{\text{K}_{\text{ш}}} \left(\text{a}_{\text{ш}} b_{\text{ш}} \text{T}_{\mu ш_e} \text{p} + 1\right)\left(\text{T}_{\mu ш_0} \text{p} + 1\right)}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^2 \text{T}_T \text{T}_{\mu ш_0} \text{T}_{\mu ш_e}^2 \text{p}^4 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^3 p^3 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^2 \text{p}^2 + \text{a}_{\text{ш}} b_{\text{ш}} \text{T}_{\mu ш_e} + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{\text{K}_{\text{ш}}} \left(\text{a}_{\text{ш}} b_{\text{ш}} \text{T}_{\mu ш_e} \text{p} + 1\right)\left(\text{T}_{\mu ш_0} \text{p} + 1\right)}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\mu c_e}^2 \text{p}^2 + \text{a}_{\text{ш}} b_{\text{ш}} \text{T}_{\mu ш_e} + 1}. \quad (3.34)$$

Налаштування контуру швидкості з ПІ-регулятором близько до налаштування на МО системи 2-го порядку.

Коефіцієнт датчика швидкості

$$K_{\text{дω}} = \frac{1}{\sigma_\omega \omega_{\text{н}}} = \frac{1}{1{,}2 \cdot 94{,}248} = 8{,}842 \cdot 10^{-3}, \quad (3.35)$$

де $\sigma_\omega \geq 1{,}2$ – коефіцієнт, що враховує імовірне перегулювання швидкості.

Значення максимального завдання на вході контуру швидкості $N_{\text{зсюмакс}}$:

$$N_{\text{зω.макс}} = \frac{1}{\sigma_\omega} = \frac{1}{1{,}2} = 0{,}833. \quad (3.36)$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичної ланки для електроприводів загальнопромислового призначення n_ω=2.

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру швидкості $\text{T}_{\mu\omega} = 1{,}9 \cdot 10^{-4}\text{c}$.

Коефіцієнт типового налаштування контуру швидкості a_ω=2.

Еквівалентна постійна часу замкненого контуру швидкості

$$\text{T}_{\text{p}\omega} = 4\text{T}_{\mu\omega} = 4 \cdot 1{,}9 \cdot 10^{-3} = 7{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{с}. \quad (3.37)$$

Коефіцієнт підсилення регулятору швидкості

$$\text{K}_{\text{рш}} = \frac{J_e \text{K}_\text{T}}{\Psi_{2\text{н}} \text{K}_{\text{дв}} \text{K}_\text{c}} \cdot \frac{1}{a_\text{c} T_{\mu c_e}} = \frac{0{,}264 \cdot 0{,}039}{0{,}88 \cdot 4{,}457 \cdot 8{,}842 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 1{,}9 \cdot 10^{-3}} = 0{,}039. \quad (3.38)$$

При налаштуванні системи управління електроприводом використовується ПІ-регулятор для кожного з контурів.

3.7 Дослідження імітаційної моделі електропривода підйому портального крану

На рисунку 3.10 наведено пуск асинхронного двигуна без навантаження на номінальну швидкість $\omega = 94{,}25\ \text{с}^{-1}$, а потім скидання навантаження в момент часу $\text{t} = 0{,}5\ c, \text{М}_{\text{навн}} = 108\ \text{Нм}$. Аналіз графіка перехідного процесу показав наступні параметри:

- пускові параметри двигуна $\text{М}_{\text{еп.макс}} = 149{,}5\ \text{Нм}$, $I_{\text{еп.макс}} = 29{,}3\ \text{А}$;
- при роботі без навантаження на завданої швидкості $\omega_{\text{з}} = 101{,}5\ \text{с}^{-1}$; при $I_{\text{еп.макс}} = 10\ \text{А}$;
- при навантаженні (момент накидання навантаження – вибірка слабкості канату) куткова швидкість незначно зменшується, но потім вона достигає завданого значення $\omega_{\text{з}} = 101{,}5\ \text{с}^{-1}$ при цьому значення струму електродвигуна $I_{\text{ф.ном}} = 23{,}3\ \text{А}$.

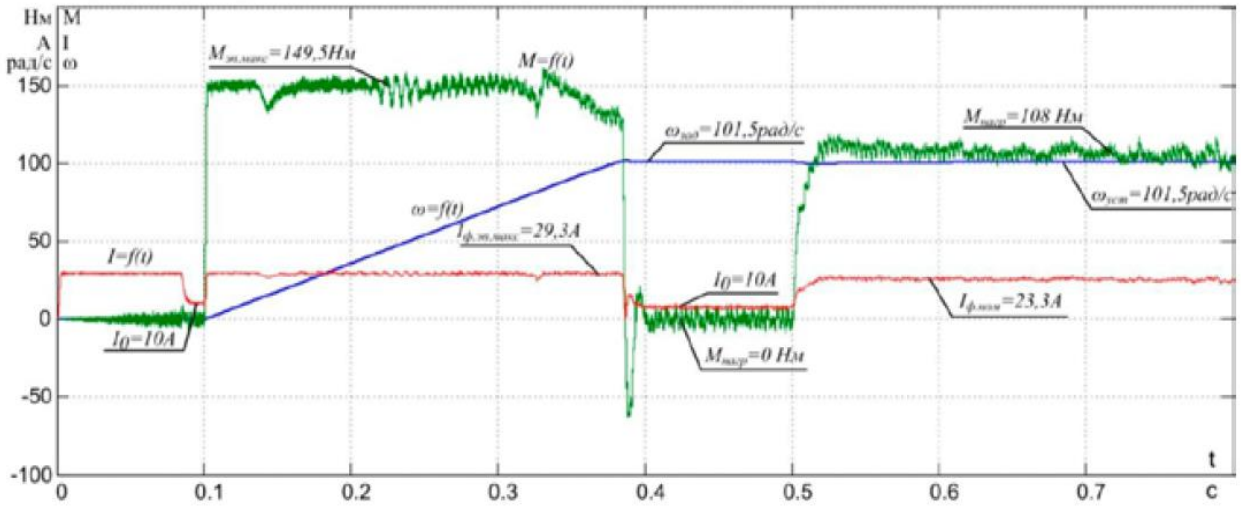


Рисунок 3.10 – Графіки перехідного процесу електромагнітного моменту $\text{М}_{\text{ем}}(t)$, куткової швидкості $\omega(t)$ і фазного струму $i_{\text{ф}}(t)$ двигуна

На рисунку 3.11 наведена математична модель електропривода підйому портального крану в середовище MatLab Simulink.

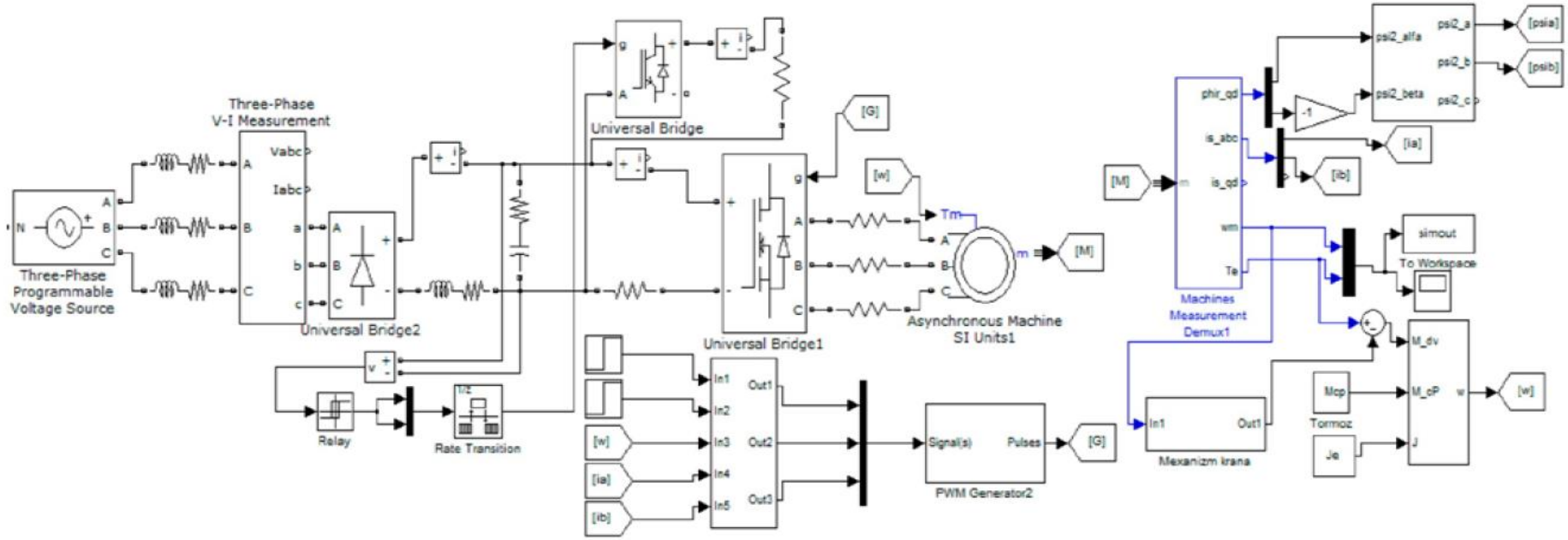


Рисунок 3.11 - Математична модель електропривода підйому портального крану в середовище MatLab Simulink

На рисунку 3.12 наведені графіки перехідного процесу по кутковій швидкості ротора $\omega(t)$ двигуна при завданні на швидкість $\omega_{з1} = 101{,}5\ \text{с}^{-1}$ та $\omega_{з2} = 1{,}01\ \text{с}^{-1}$.

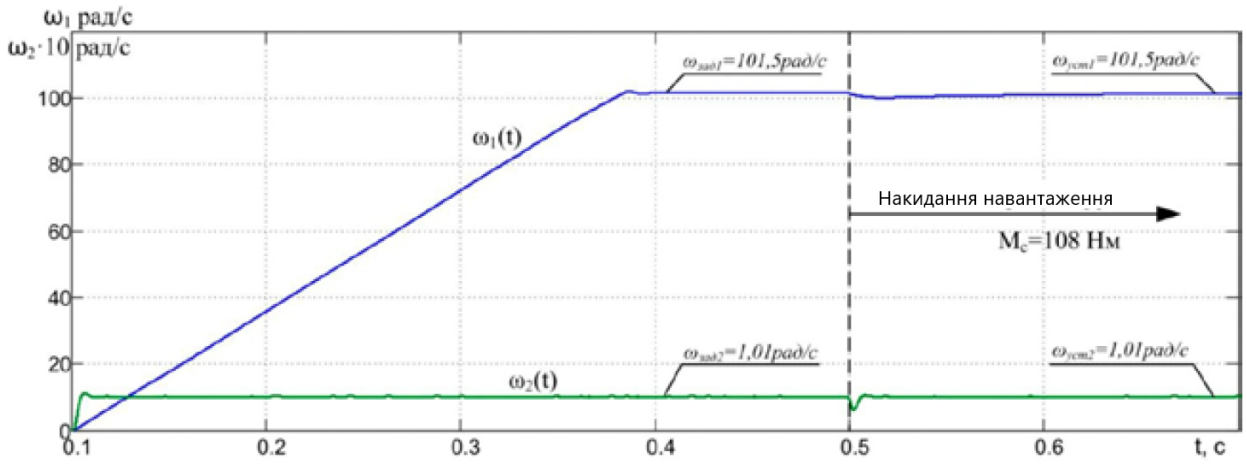


Рисунок 3.12 – Графіки перехідного процесу по швидкості обертання ротора $\omega(t)$ двигуна при різних завдання швидкості

З графіка перехідного процесу наведеного на рисунку 3.12, розрахуємо діапазон регулювання швидкості:

$$D = \frac{\omega_{з1}}{\omega_{з2}} = \frac{101{,}5}{1{,}01} = 100{,}5. \qquad (3.39)$$

Діапазон регулювання відповідає технічному завданню.

Отримані графікі перехідних процесів $\omega = f(t)$, M= $f(t)$ та $I = f(t)$, в результати математичного моделювання, дозволяють стверджувати, що всі три контуру розраховані і налаштовані вірно, так як на графіках не спостерігається перерегулювання, які перевищують допустимі значення, виконується точне відпрацювання впливів, що задаються, а також всіх значень швидкостей, струмів та моментів співпадають з розрахованими.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

В результаті модернізації системи управління електроприводу переміщення підвіски гака мостового крана очікується зниження собівартості переміщення вантажів. Зниження собівартості досягається за рахунок

– підвищення продуктивності;
– зниження трудомісткості праці оператора крана;
– підвищення точності позиціонування гака мостового крана з вантажем;
– зниження енергоємності електроприводів мостового крана.

Впровадження системи управління електроприводом підвіски гака мостового крана потребує комплексного підходу до оцінки її ефективності. Для цього здійснюється розрахунок економічного ефекту, що дозволяє визначити фінансові переваги та перспективи використання даної модернизації з релейно-контакторної системи управління на частотно-регульовану. Основним аспектом цього аналізу є оцінка змін у споживанні електроенергії, оскільки сучасні системи управління здатні суттєво зменшувати енергетичні витрати за рахунок точнішого регулювання швидкості та моменту.

Додатково розглядається зниження витрат на технічне обслуговування, що досягається завдяки впровадженню більш надійних та зносостійких компонентів, які потребують менш частих ремонтів і замін. Підвищення продуктивності є ще одним ключовим фактором, адже автоматизоване управління дозволяє зменшити час виконання операцій, підвищити точність переміщення вантажів та знизити вплив людського фактору на технологічний процес.

Також аналізуються техніко-економічні показники, які включають рівень енергоефективності, строки окупності інвестицій, зменшення експлуатаційних витрат. Це дозволяє оцінити загальну економічну доцільність впровадження.

Розглядаються переваги в порівнянні з традиційними системами керування підвіскою гака. Важливим є врахування довговічності компонентів, стійкості до навантажень, впливу зовнішніх факторів та можливості інтеграції з іншими системами автоматизації.

Таким чином, аналіз економічних показників дає змогу не лише оцінити ефективність модернізації, а й сформувати оптимальну стратегію впровадження системи управління електроприводом, що забезпечить максимальний економічний і технологічний ефект.

Економічне обґрунтування передбачає порівняння запропонованих варіантів за критерієм приведених витрат.

Капітальні затрати для впровадження частотно-регульованої системи управління електроприводом підвіски гаку мостового крану:

$$К = Д + СК \tag{4.1}$$

де Д - вартість приводного двигуна (Д = 274500 грн.);
СК - вартість системи управління (СК = 443735 грн.),
Підставивши значення, отримаємо:
К = 274500 + 443735 = 718235 (грн.).
Річні капітальні витрати:

$$К_{річні} = Е_н \cdot К \quad (4.2)$$

де $Е_н$- нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень (приймається 0,15);
Підставивши значення, отримаємо:

$$К_{річні} = 0{,}15 \cdot 718235 = 107735{,}25\ (грн/рік) \quad (4.3)$$

Загальні додаткові відрахування:

$$С = С_А + С_Р + С_Д + С_О \quad (4.4)$$

де $С_А$- амортизаційні відрахування, грн/рік;
$С_Р$ - відрахування на ремонт, грн/рік;
$С_Д$- додаткові відрахування, грн/рік;
$С_О$- відрахування на оплату праці персоналу, грн/рік.
Величина амортизаційних відрахувань в середньому береться 20% від капітальних вкладень:

$$С_А = 0{,}2 \cdot К \quad (4.5)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$С_А = 0{,}2 \cdot 718235 = 143647\ (грн/рік) \quad (4.6)$$

Відрахування на ремонт електрообладнання беруться в розрахунку 4 % від капітальних вкладень:

$$С_Р = 0{,}04 \cdot К \quad (4.7)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$С_Р = 0{,}04 \cdot 718235 = 28729{,}28\ (грн/рік) \quad (4.8)$$

Додаткові відрахування, які враховують втрати енергії в електроприводі за рік:

$$С_Д = С_{Д1} + С_{Д2} \quad (4.9)$$

де $С_{Д1}$ - додаткові відрахування, які враховують втрати енергії в двигуні, грн/рік;

$С_{Д2}$ - додаткові відрахування, які враховують втрати енергії в системі управління, грн/рік.

Приблизний розрахунок додаткових відрахувань $С_Д$ становить 1116307,5 грн/рік (має пряму залежність від вартості електроенергії, тому розрахунок приблизний).

Відрахування на оплату праці персоналу становить 1824788,2 грн/рік.

Загальні додаткові відрахування:

$$С = 143647 + 28729{,}28 + 1116307{,}5 + 1824788{,}2 = \\ = 3113472\ (\text{грн/рік}) \qquad (4.10)$$

Таблиця 4.1 – Показники, що впливають на собівартість циклу роботи крану

Показники	До модернізації	Після модернізації	Зміна показників Δ
Кількість циклів у рік, цикл	9000,0	9665,0	665,0
Витрати на амортизацію АСУ, грн.	117375,0	143647,0	26272,0
Витрати на ремонт АСУ, грн.	23475,0	28729,4	5254,4
Витрати на електроенергію, грн.	1285200,0	1116307,5	-168892,5
Витрати на оплату праці персоналу, грн.	2018914,6	1824788,2	-194126,4
Загальні витрати, грн.	3444964,6	3113472,1	331492,5
Собівартість циклу роботи крану, грн.	382,8	322,1	-60,6

Таблиця 4.2 – Попередня оцінка економічної ефективності впровадження АСУ електроприводом

Найменування показника	Позначення	Значення
Капітальні витрати на модернізацію, грн.	$K_{АВТ}$	107735,25
Зниження собівартості: а) абсолютна, грн, б) відносне,%.	 $\Delta C_{АБС}$ $\Delta C\%$	 60,6 15,8
Додатковий прибуток, грн.	$\Delta П$	40299
Термін окупності витрат, лет.	$T_{ОК}$	2,7
Річний економічний ефект, грн.	$E_{Ф}$	45385,6

Модернізація системи управління електроприводом переміщення підвіски гака мостового крана є економічно доцільною та технічно виправданою. Вона дозволить підвищити ефективність роботи крана, знизити енерговитрати та покращити безпеку праці, що позитивно вплине на виробничі процеси підприємства.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Основними шкідливими і небезпечними виробничими факторами, які впливають на працівників при експлуатації мостового крану є:

– рухомі машини і механізми; рухомі частини виробничого обладнання;
– пересувні вироби, заготовки, матеріали;
– підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
– підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
– підвищений рівень шуму на робочому місці;
– підвищений рівень вібрації;
– підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
– підвищений рівень статичної електрики;
– підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
– підвищена напруженість магнітного поля;
– відсутність або нестача природного світла;
– прямий і відбитий блискіт;
– недостатня освітленість робочої зони;
– гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання;
– розташування робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі (підлоги).

Кожен працівник, який експлуатує мостовий кран зобов’язаний мати загальні поняття про будову, стійкість вантажопідіймальних кранів і машин, а також призначення приладів і пристроїв безпеки, вимоги, що пред'являються до знімних вантажозахоплювальних пристроїв та тари, знакову сигналізацію, безпечні методи обв'язки, стропування і зачіплювання вантажів, норми бракування канатів та ланцюгів, порядок виконання робіт вантажопідіймальними кранами і машинами, технологічну карту на вантажно-розвантажувальні роботи та складування вантажів вантажопідйомними кранами і машинами на ділянці проведення робіт.

До огляду, технічного обслуговування і ремонту вантажопідіймальних кранів і машин крім посадових працівників, за якими ці вантажопідіймальні крани закріплені для їх технічного обслуговування і ремонту, може допускатися обслуговуючий вантажопідіймальні крани і машини персонал (слюсарі - ремонтники, електромонтери, наладчики, електрозварники і т.д.) після їх навчання та атестації за спеціальними програмами на право обслуговування і ремонту вантажопідіймальних кранів, затверджених в установленому порядку, згідно вимог нормативно правових актів з охорони праці та промислової безпеки.

При переміщенні вантажів за допомогою вантажопідйомних механізмів, а саме мостового крану, необхідно дотримуватися вимог нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки. На підприємстві розроблені інструкції з охорони праці та технологічні карти

для технологічного та обслуговуючого персоналу, в яких регламентується вимоги безпеки перед початком робіт, під час їх виконання, та після завершення робіт. Основні вимоги безпеки при обслуговуванні крану мостового типу перед початком роботи:

– пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці по професії та виду виконуваних робіт;

– одягнути необхідні засоби індивідуального захисту згідно з нормами видачі;

– ознайомитись зі змінним завданням;

– оглянути і прийняти робоче місце від змінника;

– переконатися у справності обладнання, інструменту, сигналізації.

Основні вимоги безпеки при обслуговуванні крану мостового типу у процесі виконання робіт:

– додержуватися вимог нормативно-правових актів з охорони праці;

– виконувати тільки ті роботи і тільки в тому обсязі, які визначені завданням керівника;

– використовувати засоби індивідуального захисту, інструмент і пристрої, отримані в структурному підрозділі. Застосування засобів індивідуального захисту, інструменту та пристроїв «кустарного» виробництва – не дозволяється;

– при виникненні небезпечної ситуації, яка може спричинити аварію або травмування людей необхідно негайно припинити роботу.

Після закінчення виконання робіт необхідно:

– прибрати робоче місце від сторонніх предметів, відходів виробництва, матеріалів, виробничого сміття.

– доповісти керівнику і зробити запис в журналі приймання-здачі зміни про завершення робіт, а також про всі недоліки, які виникали під час виконання робіт.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи удосконалена система управління електроприводом підвіски гака мостового крана із заданими параметрами. Зроблено розрахунок основних параметрів і здійснено вибір основних елементів частотно-регульованої системи управління. Система будується на базі частотного перетворювача Schnneider electric Altivar ATV900, програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500.

Внаслідок модернізації системи управління електроприводом переміщення підвіски гака мостового крана очікується зниження собівартості переміщення вантажів, що є одним із ключових показників KPI підприємства. Запроваджена система дозволить забезпечити економію електроенергії, підвищити продуктивність в частині переміщення вантажів, знизити трудомісткість праці машиніста крана, підвищити точність позиціонування гака мостового крана з вантажем, знизити енергоємність електроприводів мостового крана.

У процесі виконання роботи вирішено поставлені завдання, що дозволило комплексно оцінити доцільність впровадження системи частотно-регульованого електроприводу для вантажопідйомного механізму мостового крана, а також розроблені необхідні технічні рішення.

Обґрунтовано необхідність використання частотно-регульованого електроприводу. Завдяки можливості плавного регулювання швидкості знижується механічне навантаження на конструктивні елементи крана, що сприяє збільшенню ресурсу роботи обладнання та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

На основі аналізу функціональних вимог розроблено структурну та функціональну схеми системи управління частотно-регульованого електроприводу. Структурна схема забезпечує ефективну взаємодію між елементами системи, дозволяючи досягти високої точності регулювання руху вантажопідйомного механізму. Обґрунтовано параметри силової частини, такі як потужність двигуна, вибір частотного перетворювача, силових модулів, а також елементів системи захисту та керування. Проведені розрахунки дозволили визначити оптимальні характеристики електроприводу, що забезпечують високу продуктивність і надійність роботи механізму.

Розроблено блок-схему алгоритмів роботи крана, що описує логіку функціонування системи в різних режимах експлуатації. Це дозволило деталізувати процеси управління, врахувати особливості запуску, гальмування, зміни швидкості та режимів роботи електроприводу відповідно до вимог продуктивності та охорони праці.

Проведений розрахунок економічної ефективності підтвердив доцільність впровадження частотно-регульованого електроприводу на підприємстві. Аналіз показав зниження споживання електроенергії, скорочення витрат на технічне обслуговування, зменшення втрат через

зношування механічних елементів і підвищення загальної продуктивності крана. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат і забезпечує окупність інвестицій у модернізацію вантажопідйомного обладнання. Системи електроприводу з релейно-контактними системами управління є морально застарілими і мало використовуються у сучасному електроприводі через складність виготовлення та невисоку надійність схемних рішень.

Отже, розроблена система частотно-регульованого електроприводу вантажопідйомного механізму мостового крана повністю відповідає вимогам ефективності, надійності та безпеки, а її впровадження є економічно доцільним і перспективним для підприємства.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабко В.В. Електропривод підприємств АПК: навч. Посіб. / В.В. Грабко, С.М. Левицький. – Вінниця, ВНТУ, 2012. – 198 с.
2. Електропривод: Навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Ю. М. Хондола, І. П. Ільїчов; За ред.. О. Ю. Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с.
3. Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синівський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; За ред.. Ю.М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.
4. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним корегуванням: Навчальний посібник. – Львів, Видавництво НУ „Львівська політехніка”, 2004. – 312 с.
5. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни "Електропривід" для студентів спеціальності "Енергетика сільськогосподарського виробництва" / Укл. І.З.Щур, І.М.Дробот. – Львів, 2003. – 53 с.
6. Моделювання електромеханічних систем : підручник / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й., Сисук Г.Ю., Садовой О.В]. – Кременчук, 2001. – 410 с.
7. Півняк Г.Г. Сучасні частотно – регульовані асинхронні електроприводи з широтно – імпульсною модуляцією : монографія / Г.Г. Півняк,О.В. Волков.- Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.
8. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин: Підручник /В.С. Бондарєв, О. І. Дубінець, М. П. Колісник та ін. – К.: Вища школа, 2009. – 734 с
9. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини: Навчальний посібник для електротехн. спец. ВНЗів / В.П. Метельський; наук. ред. А.М. Кравченко. – 2-е вид, доповнене й перероблене. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.
10. Півняк Г.Г. та ін. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2003. – 327 с.
11. Проєктування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.
12. Видмиш, А. А.; Ярошенко, Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. навч. посіб.-Вінниця: ВНАУ, 2020.-387 с.
13. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
14. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
15. Толочко О.І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Д.М. Мірошник // Вісник

Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199-202.

16. Потапський П.В. Навчально-методичні матеріали до виконання курсової роботи з курсу “Основи електроприводу” для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня освіти / П.В. Потапський, І.Д. Гарасимчук, М.В. Вусатий. (За загальною редакцією Потапського П.В.) – ПДАТУ, 2020. – 73с.

17. Потапський П.В. Методичні вказівки до лабораторних робіт по курсу «Основи електроприводу» / П.В. Потапський, І.Д. Гарасимчук, Л.М. Михайлова. – Каменець-Подільський: ПДАТУ, 2018. – 150 с

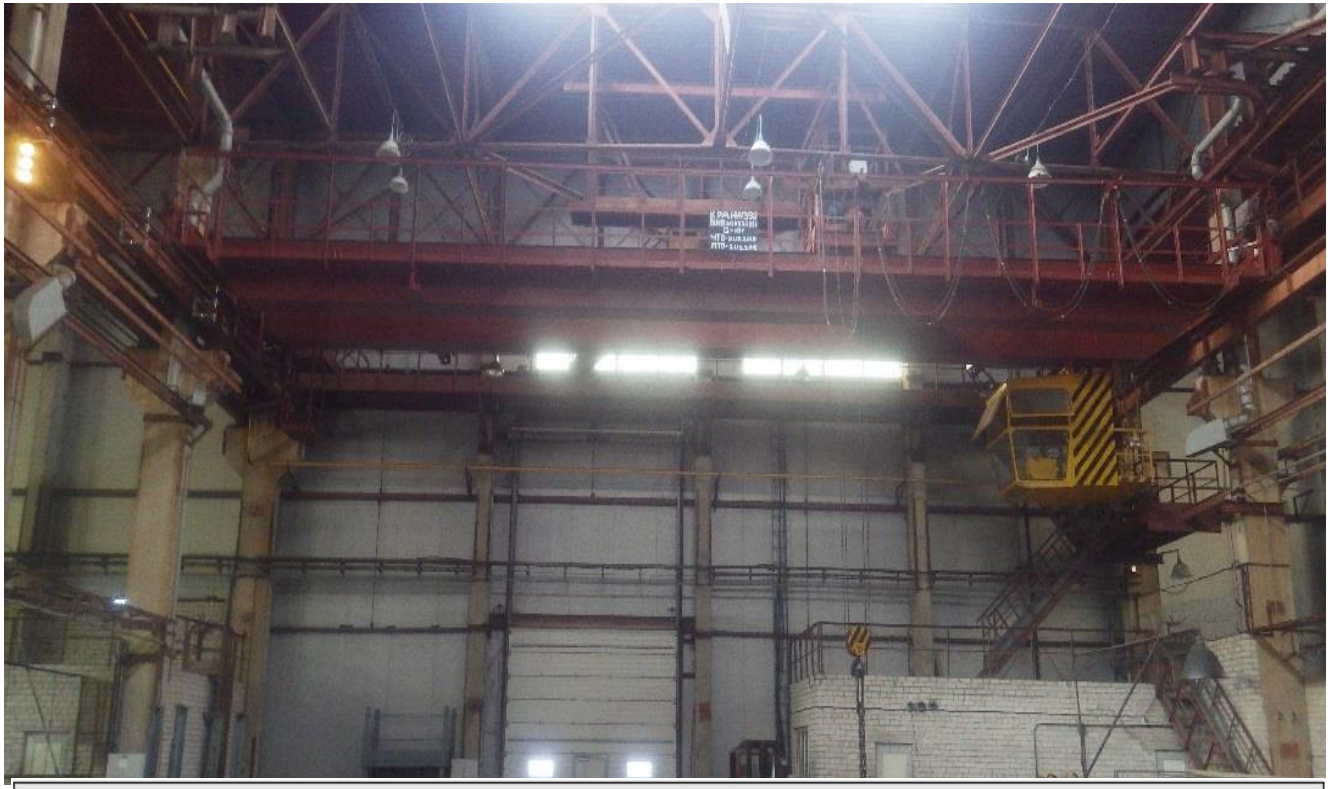
18. Білухін Д.С. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Розрахунок тягового широтно-імпульсного перетворювача» з дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка». – Дніпро, 2002, -56 с

19. Підйомно-транспортні машини. Навчально-методичний посібник. Навчально-методичний комплекс / І. М. Бендера, О. Я. Стрельчук, В. В. Підлісний, Г. О. Іванов. – Камянець-Подільський, ФОП Сисин О.В., Абетка, 2014. – 368 с.

20. Енкодери та їх підбір по параметрам двигуна URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/AV02-1046EN.pdf (дата звернення 05.06.2024).

21. Основи електроприводу: Підручник/ Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко. К.: 2010.

ДОДАТОК А
МОСТОВИЙ КРАН КМ-1635. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Технічні характеристики												
Максимальна вантажопідйомність головний/доп.	Макс. Висота головного підйому	Макс. висота доп. Підйому	Проліт	База	Колія	Швидкість підйому (опускання) головний/доп.	Швидкість переміщення крана	Швидкість переміщення візка	Маса	Потужність двигуна головного підйому	Потужність двигуна доп. Підйому	Потужність двигуна переміщення крана
16/5 т	12,5 м	14 м	22,5 м	5,1 м	2,5 м	0,13/0,33 м/с	1,33 м/с	0,66 м/с	33,3 т	37 кВт	15 кВт	11 кВт

Рисунок А.1 – Загальний вигляд мостового крану КМ-1635. Технічні характеристики крану

ДОДАТОК Б
РОЗТАШУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА У ЦЕХУ. ВИРОБНИЧА ДІЛЬНИЦЯ ЦЕХА

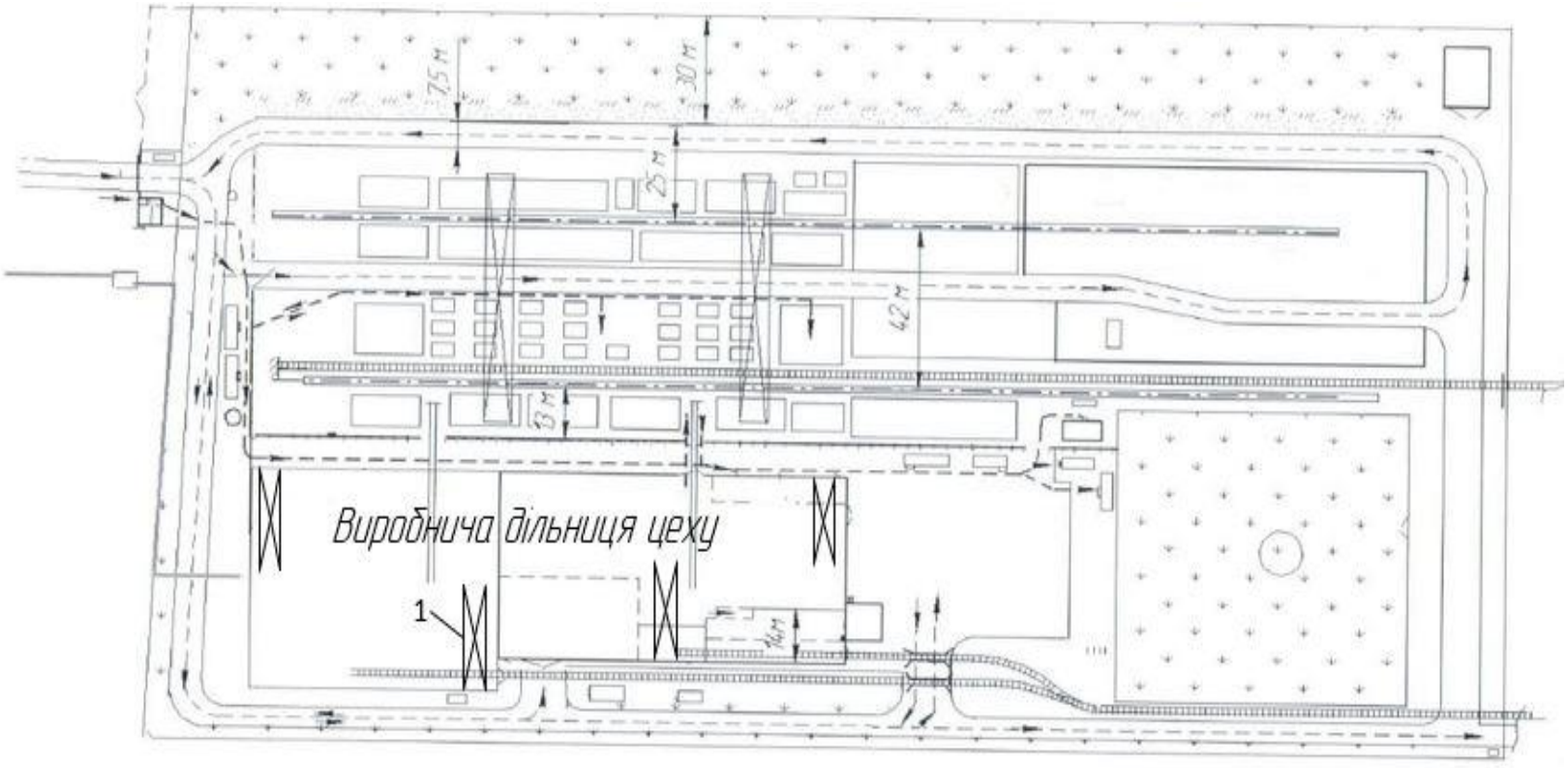


Рисунок Б.1 – Прокатний цех металургійного комбінату. Розташування мостового крану КМ-1635 :
1 - мостовий кран КМ-1635

ДОДАТОК В
ВАНТАЖНИЙ ВІЗОК ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ МОСТОВОГО КРАНУ КМ-1635

Рисунок В.1 – Вантажний візок та електрообладнання мостового крану КМ-1635