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

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

на тему «Модернізація систем управління крана мостового електричного спеціального КМ 1664.00.000 мартенівського цеху»

Керівник роботи — Богдан ЦИМБАЛ

Консультант від бази практики — Максим БАБЕНКО

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

Здобувач — Іван Архіпов

Підсумкова оцінка за атестацію			

Голова ЕК — Андрій ГОЛОЯДОВ

Запоріжжя 2024

metinvest polytechnic

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
ОПП Комп'ютерне конструювання мехатронних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
«Комп'ютерне конструювання
мехатронних систем»

Світлана ГУРКОВСЬКА
(прізвище та ініціали) (підпис)
«12» липня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Архіпова Івана Івановича
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Модернізація систем управління крана мостового електричного спеціального КМ 1664.00.000 мартенівського цеху
керівник роботи (проєкту) Цимбал Богдан Михайлович, доктор наук з державного управління, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від *01.07.2024р 162/01.07.2024р*
2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01*.12.2024р*
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 розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області. 2. Характеристика мостового крану електричного спеціального КМ 1664.00.000 і режимів його роботи. 3. Вибір, обґрунтування та дослідження систем управління крана. 4. Розділ з економіки. Висновки. Додатки*
5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу:_____

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

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)

7. Дата видачі завдання *05 липня 2024*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проєкта)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	09.09.2024 – 03.11.2024	
2	Розділ 2. Характеристика мостового крану електричного спеціального КМ 1664.00.000 і режимів його роботи	04.11.2024 – 10.11.2024	
3	Розділ 3. Вибір, обґрунтування та дослідження систем управління крана	11.11.2024 – 17.11.2024	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін	18.11.2024 – 20.11.2024	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	21.11.2024 – 24.11.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	25.11.2024 – 27.11.2024	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	25.11.2024 – 27.11.2024	
8	Рецензування завершеної роботи.	28.11.2024 – 01.12.2024	
8	Захист	02.12.2024 – 07.12.2024	

Здобувач _____ (підпис) Іван АРХІПОВ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) Богдан ЦИМБАЛ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Архіпов Іван Іванович. Модернізація систем управління крана мостового електричного спеціального КМ 1664.00.000 мартенівського цеху. - Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». ОПП «Комп'ютерне конструювання мехатронних систем» - ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2024.

Метою цієї розробки є підвищення продуктивності роботи мартенівського цеху підприємства шляхом впровадження автоматизованої електромеханічної системи, яка компенсує коливання вантажу в підйомних кранах.

Для досягнення поставленої мети в магістерській дисертації вирішено такі завдання:

1) виконано аналітичний огляд завдань і методів підвищення надійності, безпеки та ефективності роботи кранового господарства;

2) проведено розрахунок, перевірку та вибір силової частини автоматизованої системи;

3) розроблено автоматизовану систему керування.

Об'єкт дослідження є процеси компенсації коливань вантажу під час поступального руху мостового крана. Предмет дослідження є система керування швидкістю електропривода візка мостового крана.

Методи дослідження. Для виконання завдань, поставлених у роботі, застосовано: класичні методи теорії автоматичного керування; теорію керування електроприводами змінного струму; методи математичного моделювання.

У першому розділі розглянуто важливість модернізації мостових кранів мартенівських цехів для підвищення ефективності роботи та безпеки. Описано основні проблеми: високе енергоспоживання, значні динамічні навантаження та небезпека коливання вантажу. Розглянуто переваги частотно-регульованих приводів, які знижують енергоспоживання до 60%, забезпечують плавність рухів і зменшують навантаження на механізми. Зазначено, що автоматизація дозволить мінімізувати ризики аварій та підвищити зручність управління обладнанням.

У другому розділі детально описано конструкцію мостового крана: типи балок (однобалкові, двобалкові), механізми пересування, вантажозахоплювальні пристрої (гаки, грейфери, магніти). Розглянуто особливості експлуатації кранів в різних умовах, у тому числі на відкритих майданчиках та в сейсмічних зонах. Проаналізовано існуючі системи управління, зокрема релейно-контакторні та сучасні мікропроцесорні з частотним регулюванням. Розглянуто переваги плавного регулювання швидкості та усунення динамічних навантажень. Описано кінематичні схеми підйомних механізмів, редукторів і систем передачі руху. Визначено

основні параметри роботи механізмів та вплив модернізації на їх надійність.

У третьому розділі вибрано обладнання для модернізації мостового крана, розроблено схеми автоматизації та запропоновано інноваційні рішення для інтеграції людиномашинного інтерфейсу. Проведено тестування систем компенсації коливань вантажу та розрахунок основних параметрів.

У четвертому розділі проаналізовано витрати на модернізацію крана, включаючи придбання обладнання, монтаж і налаштування. Розраховано економію, яку можна досягти за рахунок зменшення енергоспоживання та витрат на технічне обслуговування. Проведено аналіз періоду повернення інвестицій у модернізацію.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЧАСТОТНИЙ РЕГУЛЯТОР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МОСТОВИЙ КРАН, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, РЕДУКТОРИ, МОДЕРНІЗАЦІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ 10
1.1 Розвиток та конструктивна еволюція мостових кранів 10
1.2 Висновок до першого розділу 14
2 ХАРАКТЕРИСТИКА МОСТОВОГО КРАНУ ЕЛЕКТРИЧНОГО СПЕЦІАЛЬНОГО КМ 1664.00.000 І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ 16
2.1 Конструктивні особливості мостового крану і системи керування 16
2.1.1 Механізми пересування та їх характеристики 16
2.1.2 Конструкція електроприводу 18
2.2 Огляд параметрів системи автоматичного управління 21
2.2.1 Розгойдування вантажу 21
2.3 Визначення механічних параметрів модернізованої системи 23
2.3.1 Умови роботи та вимоги до електроприводу мостових кранів 25
2.3.2 Попередній вибір двигуна 26
2.3.3 Розрахунок навантажувальної діаграми 28
2.3.4 Перевірки двигуна з нагрівання та перевантажувальної здатності 36
2.3.5 Вибір та характеристика перетворювача частоти 37
2.3.6 Вибір та характеристика силового трансформатора 38
2.4 Висновок до другого розділу 39
3 ВИБІР, ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ КРАНА 41
3.1 Мета та методи експериментальних досліджень 41
3.2 Вибір обладнання для створення автоматизованої системи 41
3.2.1 Захист від перевантаження та коротких замикань 41
3.2.2 Захист від перенапруг 42
3.2.3 Контроль ізоляції 43
3.3 Розробка схемотехнічних рішень, алгоритмів автоматизації та людиномашинного інтерфейсу для системи керування мостового крану 50
3.4 Розрахунок системи управління 60
3.6 Моделювання мехатронної системи 66
3.7 Висновок за третім розділом 67
4 РОЗДІЛ З ЕКОНОМІКИ 68
4.1 Розрахунок витрат на модернізацію крану 68
4.1.1 Розрахунок капітальних витрат 68
4.1.2 Розрахунок експлуатаційних витрат 70
4.1.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань 70
4.1.4 Визначення річних витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт 71
4.1.5 Розрахунок вартості спожитої електроенергії 72
4.2 Розрахунок річного економічного ефекту 73
4.3 Розрахунок терміну окупності 73

ВИСНОВКИ 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 76
ДОДАТОК А ПІДКЛЮЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ 78
ДОДАТОК Б ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГАЛЬМА МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ 79
ДОДАТОК С ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГАЛЬМА ПЕРЕСУВАННЯ ВІЗКА 80
ДОДАТОК Д ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ 81

ВСТУП

У сучасному світі, де технічний прогрес розвивається з наростаючою інтенсивністю, продовжують залишатися актуальними завдання, спрямовані на всебічну механізацію та автоматизацію, які докорінно змінюють сучасні виробничі процеси в різних галузях економіки. Щороку з'являються нові моделі обладнання, що підвищують ефективність і надійність виробничих процесів, зокрема завдяки мостовим електричним кранам, які значно спрощують технологічні операції. Особливості технологічних процесів у різних галузях важкої промисловості безпосередньо впливають на конструктивні характеристики таких кранів.

Практично всі підприємства застосовують вантажопідйомні машини в різних сферах: від будівництва й автомобілебудування до ремонтних цехів. Мостові крани, поряд із виконанням основних завдань, забезпечують широкий спектр технологічних, навантажувально-розвантажувальних, монтажних та складських робіт. Вони представлені в багатому асортименті розмірів і вантажопідйомності, де найбільш поширеними є моделі з вантажопідйомністю від 5 до 320 тонн. Для їх приводу використовуються класичні асинхронні електродвигуни із фазним або короткозамкненим ротором, причому у схемі може бути задіяно до п'яти двигунів.

Відповідно до принципів стандартизації та уніфікації промислового обладнання, електрообладнання мостових кранів комплектується серійно виробленими складовими. Конструкція електричної частини враховує особливості використання кранів, що відображається у схемах керування. Серед загальних вимог до кранів особлива увага приділяється високій продуктивності, надійності, простоті експлуатації та безпеці. Водночас, із розвитком нових економічних підходів, першорядного значення набуває зниження енергоспоживання і витрат на експлуатацію.

Частотне регулювання приводів дозволяє зменшити енергоспоживання кранів майже наполовину. Крім того, цей метод сприяє більш плавним перехідним процесам, знижує динамічні навантаження на кінематику електроприводу, що позитивно позначається на надійності та довговічності обладнання.

Крани зазвичай застосовуються в умовах, де пріоритетними є продуктивність і безпека. Однак, однією з ключових проблем залишається розгойдування вантажу під час руху, яке значно впливає на ефективність роботи обладнання.

Одним із можливих рішень цієї проблеми є впровадження автоматизованої електромеханічної системи компенсації коливань вантажу. Реалізація такого підходу на одному з кранів дасть змогу зменшити ризик аварій, підвищити швидкість і надійність його роботи. Окрім цього, автоматизація забезпечить можливість безпечного управління краном персоналом із базовою підготовкою, що загалом сприятиме підвищенню продуктивності підприємства та забезпеченню безпеки його працівників.

Апробація результатів:

1. Цимбал Б. М., Архіпов І. І. Модернізація систем керування мостового крана мартенівського цеху. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «MININGMETALTECH 2024 – Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти», м. Запоріжжя, 28–29 листопада 2024 р. Запоріжжя, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-151

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Розвиток та конструктивна еволюція мостових кранів

Все це було досягнуто завдяки тому, що в процесі розвитку технологій інженери досягали вирішення всіх нових завдань, які ставилися перед ними.

Сучасний мостовий кран (інша подібна назва – балковий кран) – це універсальне вантажно-розвантажувальне обладнання, яке можна використовувати для різних цілей і в різних робочих середовищах, оскільки мостовий кран можна використовувати як у небезпечних умовах праці, так і в сейсмічних зонах. Свою зрозумілу назву кран отримав за виражену схожість конструкції з опорним мостом. За конструкцією балкові крани поділяються на два види: однобалочні та двобалочні.

Мостові крани – це металева конструкція, яка використовується для переміщення по ньому візка для підйому вантажу. У найпростішому випадку – з невеликими прольотами і вантажопідйомністю – міст складається з чотирьох сталевих балок: двох основних балок, по яких рухається каретка, і двох допоміжних балок, які кріплять головні балки. Всі чотири балки з'єднані між собою зварюванням або заклепками і утворюють жорсткий прямокутний каркас.

Для великих прольотів і несучої здатності замість одностінних балок необхідно використовувати ферми із сталі різного профілю. Металеві конструкції мосту виконані у вигляді гратчастої ферми та суцільної коробчатої зварної балки. Незважаючи на те, що мости з гратчастою (діагональною) конструкцією виготовляються зварюванням, вони вимагають великої ручної роботи. Перемички коробчатих конструкцій набагато практичніше і економічніше у виготовленні, так як використовується автоматичне електрозварювання і зменшується частка ручної роботи.

Коробчаті мости при однаковій несучій здатності мають меншу висоту, ніж мости розкосного типу. Ця обставина дозволяє зменшити висоту будівель, де працюють крани, тим самим здешевити будівельні роботи. З'єднувальні балки заклепками зараз використовуються рідко. Але в пристроях, де зварювання може викликати перекоси і неприпустимі деформації, використовуються заклепкові або болтові з'єднання. Кранові мости виготовляють, як правило, зі сталі відкритого вогню марки Ст3, а в окремих випадках використовують сталь вищої марки 09Г2С. Огорожі, профнастил, сходи та інші дрібні деталі виготовляються зі сталі марок Ст0, Ст1 і Ст2.

Міст крана рухається на ходових колесах, що приводяться в рух електродвигуном, встановленим на мосту. Рух до коліс передається через коробку передач і трансмісійний вал. Кількість натяжних опор на мосту залежить від вантажопідйомності крана і прольоту мосту. Крани вантажопідйомністю до 50 т зазвичай оснащуються чотирма натяжними

опорами. На крани вантажопідйомністю 75-125 т на будь-який проліт і на крани вантажопідйомністю 150 т з прольотом до 16 м встановлюються вісім направляючих, а на крани вантажопідйомністю 150 т з прольотом більше 16 м і кранами вантажопідйомністю 200 і 250 т – 16 коліс. При встановленні моста на більш ніж чотирьох ходових колесах його кінцеві балки встановлюють на балансирні візки.

Міст пересувається по підкранових коліях, прокладених по всій довжині цеху на виступах стін або сталевих колонах.

Рейки кранові та рядові залізничні, а також сталеві настили квадратного або прямокутного перетину із заокругленими верхніми краями. Траки змішувачів розташовані так, щоб змішувач не вдарявся об стіну. Для цього на кінцях підкранових колій встановлюють глухі упори, а перед ними пружинні, дерев'яні або гумові буфери, що забезпечує рівномірне зниження швидкості мосту. Міст також має дерев'яні балки або пружинні буфери. У кінці підкранових колій розташовані сталеві запірні планки (по одній на кожному кінці колії), які приводять у дію важільні обмежувачі ходу, встановлені на мосту. Коли направляюча зупиняється, спрацьовує обмежувач ходу або кінцевий вимикач і вимикає двигун моста. При цьому спрацьовує гальмо і рух моста припиняється.

Вплив моста на обмежувачі ходу пом'якшується за рахунок того, що двигун моста вимикається на відстань, що відповідає не менше половини гальмівного шляху. Ферми мостових кранів і візків обладнуються на випадок поломки коліс або їх осей опорними частинами, віддаленими від рейок, по яких рухається кран або візок, не більше ніж на 20 мм. Опорною частиною є сталева пластина, укріплена під сідлом крана або рамою візка на кожному колесі та призначена для витримування максимально можливого навантаження на них.

Крани визначаються як підйомні механізми циклічної дії, призначені для вертикального і горизонтального переміщення вантажів на великі відстані. За конструктивними особливостями, пов'язаними з їх призначенням і умовами експлуатації, крани поділяють на портальні, мостові, баштові, портальні та ін.

В мартенівських цехах найбільшого поширення набули мостові крани, які здійснюють опускання і підйом важких заготовок, вузлів і деталей машин, а також їх переміщення по цеху. Тип мостового крана в основному визначається специфікою цеху і його технологічним процесом, але багато механізмів кранового обладнання, наприклад механізми переміщення і підйому, однотипні для різних типів кранів. У кранах використовуються електродвигуни, регулювальні та пускові резистори, регулятори, гальмівні електромагніти, захист, баласт, блокована сигнальна та освітлювальна апаратура, кінцеві вимикачі, пантографи та ін.

У разі поломки осі або колеса удар моста або візка об рейки буде незначним, оскільки висота падіння не перевищує 20 мм.

На мосту встановлено кабіну управління. Розташовується зазвичай під мостом, на одному з кінців, зазвичай на протилежному боці від того, де проходять тролейбусні дроти. Іноді кабіна управління складається з візка як єдине ціле. У цьому випадку кабіна бере участь у двох рухах – разом з містком по цеху і разом з вагоном по цеху. Електродвигуни крана живляться за допомогою оголених проводів, які називаються тролейбусними або просто тролейбусними дротами.

На мосту закріплена табличка, на якій вказані технічні дані крана: реєстраційний номер; вантажопідйомність; наступна дата тестування. Написи повинні бути достатнього розміру, щоб їх було легко читати, перебуваючи на підлозі цеху або на поверхні землі (для кранів, що працюють на відкритих майданчиках). Робота мостового крана універсальна і багатофункціональна. Завдяки своїй роботі мостовий кран ефективно вирішує виробничі та транспортні завдання, що пояснює його популярність і широке застосування.

Експлуатація мостового крана здійснюється як у виробничих цехах і ангарах, так і на відкритих майданчиках Ще однією важливою перевагою даного типу підйомного пристрою є можливість синхронізації роботи двох кранів, тобто. При установці великого агрегату або агрегату з двома кранами одночасно можна керувати обома кранами синхронно. Серед інших переваг варто відзначити те, що мостовий кран або кран-балка має наступну функцію: міст крана встановлюється на рейки, по мосту рухається каретка мостового крана. Можливість кріплення грейфера або електромагніту замість гака дозволяє істотно розширити коло завдань, що вирішуються за допомогою мостового крана.

В даний час вантажопідйомність найбільших унікальних моделей мостових кранів досягає 800 тонн, але найбільш поширені крани вантажопідйомністю до 50 тонн і менше.

Живлення крана здійснюється або через тролейні провідники, які закріплені на будівельних конструкціях і пантографів, встановлених на крані, або за допомогою гнучкого шлангового кабелю.

Монтаж всього електрообладнання, електродвигунів, приладів і електропроводки кранів здійснюється в конструкції, що відповідає умовам і параметрам навколишнього середовища [1]. Для певного виду вантажів, що перевозяться мостовими кранами, застосовують різні вантажозахоплювальні пристрої: магніти, гаки, кліщі, грейфери тощо.

Для транспортування сталевих листів, стружки та інших феромагнітних матеріалів широко використовуються крани з гаковою підвіскою або з підйомним електромагнітом. Мостова арматура, залежно від призначення та характеру виконуваних робіт, оснащується різними підйомними механізмами: гаками, захватами, спеціальними захопленнями тощо. Мостовий кран дуже зручний у використанні, оскільки завдяки переміщенню по крановій колії, розташованій у верхній частині цеху, він не займає необхідну площу.

Електрична робота основного корпусу підйомних механізмів характеризується багаторазовим короткочасним режимом роботи з підвищеною частотою перемикань, широким діапазоном регулювання швидкості та значними перевантаженнями, що виникають при розгоні та гальмуванні пристроїв.

Особливі умови використання електроприводів у підйомних машинах стали основою для виробництва спеціальних серій електродвигунів і кранових агрегатів. В даний час кранове електрообладнання включає серію кранових електродвигунів змінного і постійного струму, серію силових і магнітних контролерів, командоконтролерів, кнопкових станцій, кінцевих вимикачів, гальмівних електромагнітів і електрогідравлічних штовхачів, пусково-гальмівних резисторів і ряд інших. пристроїв, пристроїв і різних електричних кранів

Сьогодні виробництво вантажопідйомних машин здійснюється значною кількістю підприємств. Ці машини знаходять застосування практично в усіх галузях народного господарства: металургії, будівництві, видобутку корисних копалин, машинобудуванні, транспорті та інших сферах. Основним напрямом розвитку народного господарства є становлення машинобудівної галузі, яка спеціалізується на виробництві вантажопідйомного обладнання.

Козлові крани мають конструкцію, що включає несучі елементи, які спираються безпосередньо на підкранову колію, і міст, що пересувається по рейках, прокладених на стінах або зовнішніх естакадах (рисунок 1.1).

Підкранові колії монтуються на балки, які, у свою чергу, спираються на виступи верхньої частини колон цеху. Механізм пересування крана розташований на мосту. Усі механізми керуються з кабіни, прикріпленої до мосту крана. Електродвигуни активуються за допомогою цехових візків, а живлення подається через висувні струмоприймачі, закріплені на металевих конструкціях крана.

У сучасних моделях мостових кранових систем для подачі струму використовуються еластичні кабелі. Ведучі колеса приводяться в рух електродвигуном через коробку передач і зубчастий вал.

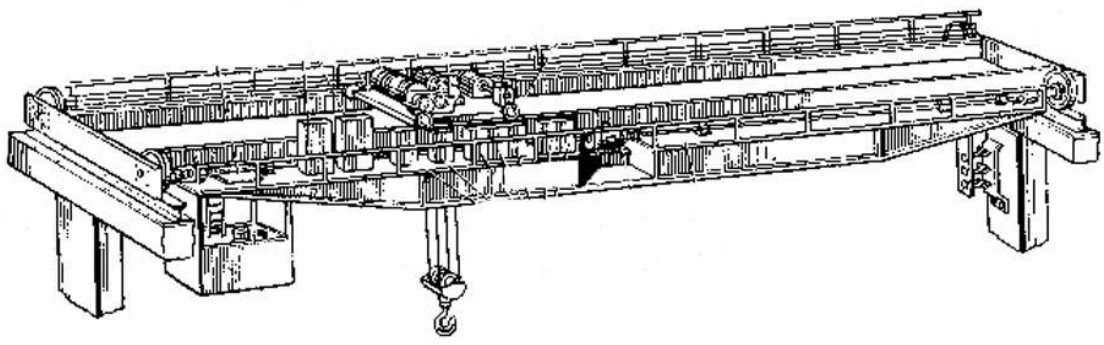

Рисунок 1.1 – Вид мостового крана

Будь-який прогресивний підйомний кран, відповідно до вимог безпеки, може мати наступні незалежні механізми будь-якого робочого руху в 3-х площинах: адаптація зростання - опускання багажу, адаптація маневру крана в горизонтальній площині та механізми блокування крана. робоча зона (маневр каретки).

Підйомні машини розроблені для різних критеріїв використання: відповідно до ступеня навантаження, часу роботи, інтенсивності роботи, рівня відповідальності за підйомні операції та погодних факторів для експлуатації.

Промислові підприємства, на яких використовуються крани, часто змінюють виробничі технології та асортимент продукції, проводять перепланування виробничих і складських приміщень. Крани, що керуються з кабіни, переходять на дистанційне керування з підлоги за допомогою радіоканалу тощо. Сучасним і найефективнішим способом модернізації електрообладнання кранів є встановлення частотно-керованого електроприводу.

Впровадження частотно-керованих електроприводів дає ряд суттєвих переваг:

- значне зниження енергоспоживання до 60%;
- підвищення точності й якості регулювання швидкості;
- плавність пуску та гальмування, що сприяє збільшенню терміну служби механічних компонентів, підвищенню зручності управління та збереженню вантажу;
- використання асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, які є економічнішими та надійнішими порівняно з двигунами із фазним ротором або двошвидкісними двигунами.

Перетворювач частоти має широкий функціонал і дозволяє виводити на графічний термінал інформацію про аварії та помилки. Функція управління гальмом забезпечує видачу сигналів на відкриття гальма після досягнення двигуном потрібного моменту, а також на накладення гальма при зниженні швидкості до мінімуму. Для адаптації струму зняття гальма залежно від маси вантажу можна застосовувати функцію ваговимірювання із зовнішнім датчиком.

Розгін і гальмування електроприводів із використанням частотного перетворювача відбувається за S-подібним законом, що забезпечує рівномірне наростання моментів і зусиль у всіх вузлах крана. Завдяки керованому гальмуванню, яке виконується електроприводом, гальмо використовується тільки для утримання механізму після зупинки, що значно зменшує розгойдування вантажу. Час пуску та гальмування можна коригувати зовнішнім сигналом або після досягнення певної вихідної частоти. Налаштування кривих дозволяє вибрати оптимальний закон керування швидкістю для конкретного механізму.

Перетворювач частоти також може підключатися до кінцевих вимикачів через логічні входи, що дозволяє знижувати швидкість або зупиняти роботу електроприводу. Обмеження моменту у векторному

режимі дозволяє формувати потрібну механічну характеристику для рухового та генераторного режимів індивідуально.

Енергія, яка генерується двигуном під час опускання вантажу або гальмування, зазвичай передається на гальмівні резистори та перетворюється в теплову енергію. Такий спосіб є поширеним, але має ряд недоліків, зокрема необхідність підключення окремого гальмівного резистора до кожного перетворювача частоти. Це підвищує вартість системи та погіршує її масогабаритні характеристики. Виділення теплової енергії на резисторі також є нераціональним використанням електроенергії.

Альтернативою є застосування рекуперацийних модулів, які замінюють гальмівні резистори. Вони дозволяють повертати гальмівну енергію в мережу живлення, що особливо ефективно для механізмів із тривалим генераторним режимом або великою гальмівною потужністю, таких як підйомні та інерційні механізми.

1.2 Висновок до першого розділу

Коливання можуть виникати з різних причин, серед яких основними є ті, що викликані зовнішніми впливами, та ті, що спричинені рухом вантажу. Для боротьби з такими коливаннями застосовують дві різні системи. Перша – це система замкнутого циклу, яка здатна ефективно гасити як маятникові коливання, спричинені переміщенням вантажу, так і коливання, викликані зовнішніми факторами, такими як вітрове навантаження. Друга – система з відкритим контуром, яка дозволяє запобігати або зменшувати коливання, що виникають через рух вантажу, проте не здатна компенсувати зовнішні впливи, оскільки відсутній зворотний зв'язок щодо фактичного положення вантажу.

У цій роботі буде розроблено автоматизовану систему з відкритим контуром, призначену для модернізації та інтеграції в існуючий мостовий кран підприємства.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА МОСТОВОГО КРАНУ ЕЛЕКТРИЧНОГО СПЕЦІАЛЬНОГО КМ 1664.00.000 І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

2.1 Конструктивні особливості мостового крану і системи керування

Мостовий кран складається з мосту, який переміщається по мостовій рейковій колії, і вантажного візка, що рухається вздовж мосту. У конструкції таких кранів розрізняють однобалочні та двобалочні моделі, які можуть мати ручний або електричний привід, бути обладнаними кабіною управління або керуватись із землі за допомогою пульта.

Як однобалочні, так і двобалочні крани бувають опорними або підвісними. Опорні крани пересуваються по рейках, укладених на металеві або залізобетонні підкранові балки. Підвісні моделі рухаються по нижніх полицях двотаврових балок, які встановлюються під нижніми поясами ферм. Існують також одно-, дво- і багатопролітні мостові крани.

Вантажозахоплювальні пристрої мостових кранів поділяються на кілька типів: гакові (з одним або кількома гачками), магнітні (з підйомним електромагнітом), грейферні, а також спеціальні пристрої (кліщі, кігті тощо). Вантаж може підвішуватись на канатах (гнучке підвішування) або мати жорстке кріплення. Металургійні крани зазвичай оснащуються жорстким підвішуванням і використовуються в технологічних процесах промислового виробництва, наприклад, для зачистки блоків (стрипери), роботи в колодязях, переміщення кульок, мульчування тощо. Вони мають жорстко з’єднані каретки, що рухаються по вертикальних напрямних.

Крани-штабелери, створені на базі мостових або козлових кранів, також мають жорстке підвішування вантажу. Однобалочні мостові крани складаються з двотаврової балки, кінці якої прикріплені до торцевих балок з натяжними колесами. Як вантажна каретка використовується ручна або електрична таль, що пересувається по нижньому поясу балки. Для великих прольотів основна балка зміцнюється фермами (вертикальними чи горизонтальними).

Двобалочні мостові крани, у своїй найпростішій формі, складаються з двох паралельних балок, прикріплених до торцевих поперечних балок. Каретка пересувається по рейках, розташованих на верхніх поясах основних балок. Для великих прольотів і значних навантажень конструкція мосту виконується у формі гратчастих ферм або коробчатих балок.

Мостовий кран першого типу включає дві основні вертикальні балки, які приймають на себе основне навантаження, дві допоміжні вертикальні балки та чотири горизонтальні балки. Дві горизонтальні балки розташовані у верхніх поясах основних балок, а дві – у площині нижніх хорд. Половина мосту, що складається з чотирьох ферм, кріпиться до торцевих двостінних балок.

Кран другого типу побудований із двох прогонових балок коробчатого перетину, з’єднаних торцевими балками того ж типу. Кінцеві

балки, виготовлені з листової сталі за допомогою ручного або автоматичного зварювання, мають високу жорсткість і стійкість. Для зручності транспортування кінцеві балки мають один або два з’єднання.

На верхніх поясах натяжних балок укладено рейки для переміщення візка. Ходові колеса розташовані на крайніх балках. Рух мостових кранів забезпечується електродвигунами, розташованими на одній із галерей мосту. Механізми пересування можуть мати центральний або окремий привід.

2.1.1 Механізми пересування та їх характеристики

Робота механізмів переміщення мостових кранів полягає в здійсненні рухів у обох напрямках моста з навантаженням і без нього. Ці механізми складаються з двох частин: приводної та непривідної. Приводна частина включає електродвигун, гальмо, приводне колесо та передавальний пристрій, а непривідна — натяжне колесо.

Залежно від конструкції, механізми переміщення можуть мати різні типи приводів. Одним із варіантів є механізм із центральним приводом, який може бути реалізований на тихохідному валу (рис. 2.1, а) або на швидкохідному валу (рис. 2.1, б). У таких системах використовуються двигун і коробка передач для передачі руху на приводні колеса.

Інший тип механізму переміщення — привід із роздільним приводом (рис. 2.1, в). Відмінністю цієї конструкції є те, що кожне ведуче колесо оснащено окремим електродвигуном із редуктором. Редуктор з’єднується з вхідним валом коробки передач через зубчасті муфти та карданний вал.

Попри те, що роздільний привід має вдвічі більше електродвигунів, коробок передач і гальм, він має свої переваги. Зокрема, така конструкція є легкою, а також зручною у виготовленні та монтажі, що робить її поширеним вибором у сучасному кранівництві.

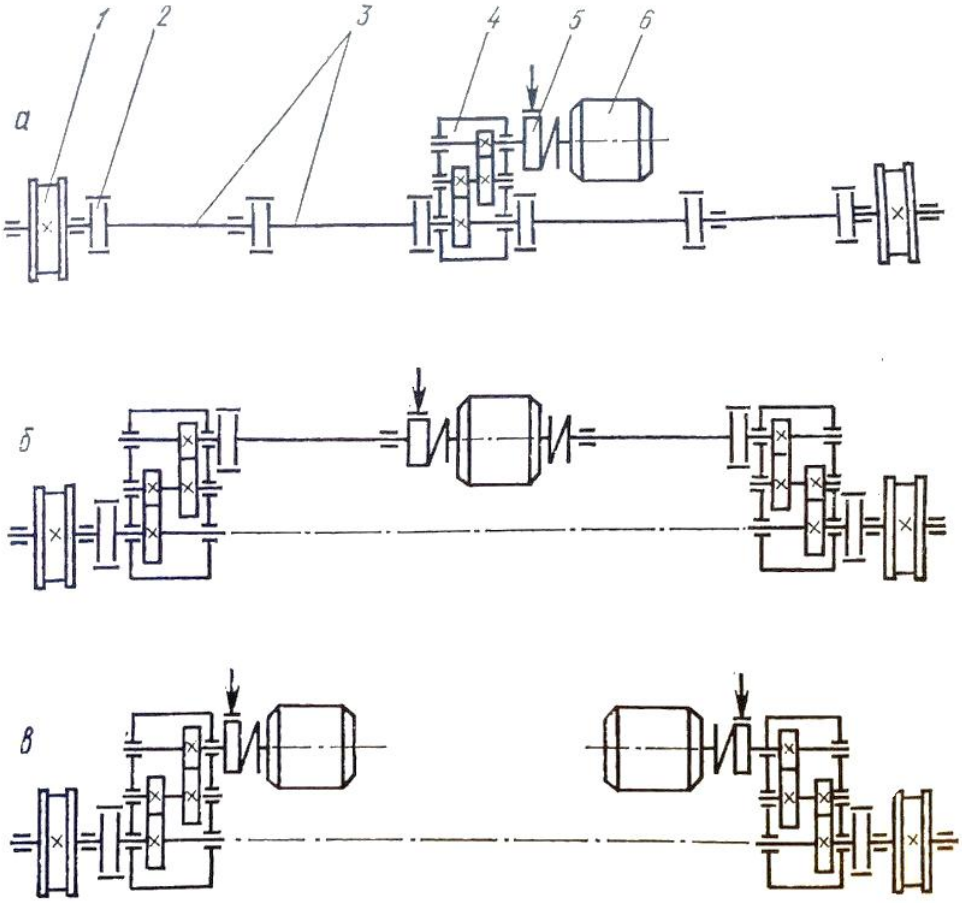

Рисунок 2.1 – Кінематичні схеми механізмів пересування мостових кранів з тихохідним валом передачі (а), швидкохідним валом передачі (б), з індивідуальним приводом (в): 1 - робоче колесо; 2 - муфта; 3 - проміжний вал; 5 - гальмо; 6 – електродвигун

Механізм руху з тихохідним передавальним валом (рисунок 2.1, а) включає електродвигун (6), колодкове гальмо (5) і редуктор (4), який через зубчасті муфти (2) передає обертання на передавальний вал (3), а далі — до робочих коліс (1). У цій конструкції частота обертання робочих коліс і вала шестерні є однаковою.

Механізм із швидкохідним валом передачі (рисунок 2.1, б) обладнаний електродвигуном з двома вихідними валами, які з’єднуються з трансмісійним валом за допомогою зубчастих муфт. На кінці трансмісійного вала встановлено гальмівний диск для забезпечення роботи гальма. Зубчасті муфти виконують функцію запобігання перекосу валів і захисту підшипників вала та двигуна від перевантажень, що можуть виникати через неточності у встановленні. Трансмісійний вал складається з окремих секцій, які з’єднані між собою компенсаційними шарнірами. Ці шарніри спираються на роликові підшипники, що забезпечує стабільну роботу механізму. Кінцеві секції швидкохідної трансмісії з'єднуються з годинниковими редукторами, розташованими на краях платформи крана. Через муфти ці редуктори передають обертання на осі робочих коліс, які

жорстко закріплені на валах. Останні встановлюються в сферичні дворядні самоустановлювальні підшипники, що розміщуються у спеціальних нішах торцевих балок, закріплених гайками і болтами. У механізмі з індивідуальним приводом (рисунок 2.1, в) кожне ведуче колесо приводиться в рух окремим електродвигуном через коробку передач і гальмується індивідуальним гальмом. Ця конструкція дозволяє виключити громіздкий трансмісійний вал із системою опор і тяг. При цьому навантаження розподіляється рівномірно між приводами, а сумарна потужність електродвигунів залишається такою ж, як у центральному приводі. Завдяки цьому зменшуються махові моменти роторів двигунів, спрощується пусковий режим, а електрична схема забезпечує синхронізацію роботи всіх двигунів.

У конструкціях механізмів пересування кранів найчастіше використовують горизонтальні редуктори з циліндричними шестернями, хоча в деяких випадках застосовуються вертикальні редуктори. Передавальний пристрій в окремих приводах розташовують максимально близько до робочого колеса для підвищення ефективності. У механізмах пересування мостових кранів зазвичай застосовуються двофланцеві циліндричні робочі колеса. Коли з кожного боку моста кількість коліс перевищує два, їх об’єднують у візки, збалансовані за допомогою підвіски. Механізм переміщення каретки мостового крана конструктивно подібний до механізму руху моста з тихохідним валом передачі. Різновиди механізмів пересування кареток відрізняються переважно розташуванням редуктора: він може бути центральним (розташованим у межах проїжджої частини) або консольним (виходити за її межі). Крім того, варіюється спосіб з’єднання кінців вихідного вала редуктора з валом шестерні.

2.1.2 Конструкція електроприводу

Електропривод являє собою електромеханічну систему, призначену для приведення в дію механічних механізмів робочих машин і забезпечення їх участі в технологічних процесах. Його розробка є одним із ключових завдань експлуатації, незалежно від типу крана. Переміщення точок огляду, що пов'язане із виконанням ефективних операцій у різних сферах національної економіки – транспорті, виробництві та повсякденному житті, вимагає використання машин, які забезпечують значні переваги.

Мостові крани широко застосовуються для підйому, переміщення та монтажу вантажів, а також у процесах виготовлення й проведення ремонтно-монтажних робіт із великими конструкціями. Завдяки електроприводу мостові крани можуть працювати з надзвичайно широким діапазоном крутного моменту, що охоплює навантаження від 100 кВт до 1000 кВт.

До підйомних машин належать підйомні крани, крани-балки, підйомники та лебідки. Їх основними механізмами є механізми підйому та передачі (повороту). Крани визначаються як оглядові пристрої, що

забезпечують вертикальне й горизонтальне переміщення ковшів або вантажів на великих платформах. За конструктивними особливостями ці пристрої поділяються на мостові, козлові, портальні, баштові та інші види кранів.

Мартенівські цехи характеризуються найбільшою кількістю мостових кранів, які використовуються для підйому, опускання й переміщення важливих заготовок, деталей і вузлів машин. Такі крани виконують операції транспортування у вертикальному й горизонтальному напрямках по всій території цеху. Мостові крани класифікуються за вантажопідйомністю: малі (5-10 т), середні (10-25 т) і великі (понад 50 т). Їх великий крок забезпечує можливість ефективного механізування піднімання й опускання підйомних балок, а також їх переміщення, що є важливим для організації підйомно-транспортних та інших технологічних операцій у різноманітних галузях виробництва й будівництва.

Обсяг робочого простору, який можуть обслуговувати мостові крани, залежить від їхніх конструктивних параметрів, таких як висота підйомного пристрою і довжина робочого ходу крана та візка.

Обсяг простору, який здатні обслуговувати мостові крани, визначається їх конструктивними характеристиками, серед яких ключову роль відіграють висота підйомного механізму та максимальна довжина пересування крана й візка.

До основних механізмів мостових кранів належать системи підйому, пересування самого крана та роботи підйомного пристрою. Швидкість функціонування цих механізмів варіюється від 0,5 до 2 м/с, тому момент інерції електроприводу зазвичай визначається моментом інерції електродвигуна. Відповідно, для приводу механізмів мостових кранів використовують електродвигуни з низьким моментом інерції. Робочі цикли механізмів мостових кранів поділяються на дві основні категорії:

1) механізми підйому – включають чотири основні етапи роботи: піднімання та опускання вантажу, підйом і спуск незавантаженого захоплювального пристрою;

2) механізми пересування – охоплюють два режими: із використанням функції обертання та без неї.

Кранові механізми зазвичай функціонують у багаторазовому короткотривалому режимі з великою кількістю перемикань протягом року або навіть тижня, враховуючи роботу за складних атмосферних умов. З цієї причини використовуються спеціалізовані кранові й металургійні електродвигуни, які забезпечують підвищену ефективність, високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та змінений момент інерції.

Переваги електроприводів для кранових механізмів передбачають такі особливості:

1) забезпечення змінності крутного моменту двигуна в заданому діапазоні під час підйому чи опускання вантажу;

2) можливість регулювання швидкості в межах передбаченого діапазону, зокрема від номінальної швидкості механізму до зниженої

швидкості для точних монтажних операцій. Цей діапазон може досягати співвідношення (40...50):1;

3) плавність регулювання швидкості, яка дозволяє знизити ударні навантаження на механізми під час завершення підйому чи спуску;

4) висока жорсткість механічних властивостей, важлива для механізмів підйому, які зазнають значних змін статичного моменту;

5) оптимізація динамічних сил у елементах силового агрегату (прискорення, гальмування) для зменшення перенапружень під час запуску й зупинки.

На електричному обладнанні кранів, включаючи електродвигуни, пускові пристрої, керуючу апаратуру, демпфери й системи безпеки, забезпечується надійність навіть за умов складної експлуатації. Температура експлуатації кранів варіюється в межах від -40 до +400 °C, вологість середовища може досягати 95% при температурі +20 °C. Також забезпечується відповідність нормам повітряного середовища за вмістом пилу й вуглекислого газу.

Електроприводи для підйомних машин працюють у короткотривалому режимі з високою частотою перемикань і широким діапазоном регулювання швидкості. Особливості таких систем стали основою для створення спеціалізованих серій електродвигунів і обладнання для мостових кранів.

2.2 Огляд параметрів системи автоматичного управління

Схеми керування крановими механізмами повинні бути забезпечені:

- реверсивне керування;
- регулювання швидкості в заданих межах;
- електромеханічна гальванія для зубів;
- електрооцинковка при опусканні точки огляду;
- підйом лебідки вгору і відведення в сторони;
- нульове та електричне блокування;
- захист від короткочасного миготіння автоматичних сигналів і пошуку додаткового реле.

Механізми обертаються на кінці приводу, який оточує плечі підйомної конструкції. Електричні опори захищені реле максимального струму, захист від теплових реле не передається. Схема винна в блокуванні материнського нуля. Всі механізми крана підлягають електромеханічному цинкуванню, а їх неплаваючі частини з'єднані з металевим каркасом крана.

На даний момент електрокранове обладнання на складі включає серію електродвигунів крана зі змінним і стаціонарним потоком, серію силових і 10 магнітних контролерів, командні контролери, кнопкові станції, хімікати, гальванічні електромагніти і електрогідравлічні маніпулятори, пускові гальванічні резистори і безліч інших пристроїв, які доповнюють різні електричні змішувачі.

Електростанції крана почали страждати від масових відмов різних систем тиристорного регулювання і дистанційного керування по радіоканалу або стрілці.

На сьогоднішній день ключовим елементом автоматизованих систем управління кранами виступає комп'ютер, яким може бути мікроконтролер, промисловий ПК або персональна ЕОМ. Такі системи виконують не лише базові функції монтажу та налаштування, але й забезпечують широкий спектр додаткових сервісів, серед яких: збирання, зберігання й обробка даних про об'єкт управління, а також передача інформації між різними рівнями системи управління.

У невеликих технологічних агрегатах агропромислового сектору також спостерігається гостра необхідність у впровадженні високорозвинених систем управління. Це дозволяє підвищити рівень автоматизації, сприяє економії енергії та забезпечує більшу надійність, зберігаючи при цьому гнучкість в управлінні.

Сучасні мікропроцесорні логічні модулі, такі як Zelio Logic, Logo1, Easy, FAB та інші, є надзвичайно зручними в експлуатації. Вони надійні, стабільні, не піддаються вібраціям, а їх програмування є доступним навіть для користувачів без спеціальних знань у цій сфері.

Двигуни постійного струму продовжують використовуватися у важкій металургії, зокрема в мартенівських цехах. Проте в сучасному кранобудуванні вони поступово виходять з обігу, поступаючись місцем асинхронним електродвигунам з короткозамкненим ротором, які широко застосовуються як у модернізації, так і у виробництві нових підйомних кранів.

Існує значна кількість систем управління двигунами з обмотаним ротором, де регулювання швидкості та моменту здійснюється через включення додаткових електричних компонентів у роторний контур. Для цього використовуються реостатні системи, газові схеми без регулювання швидкості та газові системи з тиристорними регуляторами. Комутаційні пристрої для таких систем можуть включати силові контактори, пускачі, реверсори, тиристорні ключі, транзистори IGBT або гібридні системи.

Однак подібні рішення вже морально застаріли, оскільки в порівнянні із сучасними мікропроцесорними системами керування зарубіжних виробників, що використовують частотне регулювання, вони відрізняються підвищеним енергоспоживанням. Очевидним недоліком цих систем є явище "надлишкового динамічного моменту", що виникає при запуску електродвигуна. Це спричиняє ударні навантаження, прискорює знос компонентів, створює люфти в приводних механізмах, знижує точність позиціонування і якість роботи обладнання, а також негативно впливає на комфорт оператора.

Навіть регулярні ремонти не вирішують цю проблему: через кілька місяців елементи трансмісії знову потребують заміни. Проблема полягає у специфіці підбору резисторів для першого ступеня запуску, що створює значні ударні навантаження. У релейних контакторних системах зі

ступінчастим регулюванням уникнути цього явища неможливо через технологічні особливості: перший ступінь резисторів налаштовується так, щоб момент запуску двигуна відповідав критичному для запобігання перекиданню. Це призводить до різкого створення максимального крутного моменту, що викликає небажані навантаження.

У радянський період асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором рідко використовувалися на кранах через труднощі з регулюванням швидкості. Їх застосовували лише для легких підйомників та інших малопотужних механізмів. Ситуація змінилася з появою та здешевленням частотних перетворювачів, що відкрило нові можливості для управління.

Починаючи з 2000-х років, частотні перетворювачі набули широкого застосування в кранобудуванні. Вони дозволяють плавно регулювати швидкість і момент електродвигуна, зберігаючи номінальні параметри в широкому діапазоні. Застосування таких систем забезпечує точне, безударне регулювання, економію енергії до 20%, рівномірне розподілення навантажень у механізмах крана та ефективну інтеграцію програмованих логічних контролерів для розв’язання складних завдань.

2.2.1 Розгойдування вантажу

Кожен рух крана із підвішеним вантажем викликає його коливання, тому кранівник має постійно враховувати цей фактор і коригувати свої дії. Досвідчений і уважний оператор здатний оперативно мінімізувати коливання, застосовуючи відповідні контрзаходи. Водночас недосвідченість або втрата концентрації через втому можуть призводити до затримок, підвищення ризику зіткнень чи навіть нещасних випадків, навіть під час виконання найпростіших операцій.

Системи зменшення коливань вантажу (антихитальні системи) звільняють оператора від необхідності контролювати коливання, дозволяючи йому зосередитися на керуванні краном, підйомі вантажу, його переміщенні та точному розміщенні у потрібній точці. Ці системи допомагають зменшити вібрацію, що виникає через прискорення механізмів під час роботи крана. Їх ефективність забезпечується завдяки оптимізації процесів розгону та гальмування. Вони можуть бути інтегровані як у нові системи керування, так і доповнювати існуючі, забезпечуючи точність позиціонування вантажу, зниження ризиків аварійних ситуацій і збільшення швидкості виконання операцій.

Антихитальні системи здатні одночасно мінімізувати вібрації при русі мосту, каретки та обертанні крана. Існує два основних види таких систем:

1) системи з прямим зворотним зв'язком, які використовують камеру та відбивач. Ці елементи забезпечують точну інформацію про відхилення вантажу в реальному часі;

2) системи на основі математичної моделі, що прогнозують коливання вантажу, розраховуючи його кут відхилення на основі фізико-математичних закономірностей руху.

Замкнуті системи зазвичай використовують високоточні камери, які фіксують відхилення гака чи вантажопідйомного пристрою. Для цього на механізм встановлюють відбивач, що може бути пасивним (наприклад, квадрат із маркуванням) або активним, оснащеним світлодіодами для забезпечення точності у складних умовах, таких як яскраве світло чи сніг. Для роботи на відкритому повітрі доцільним є використання інфрачервоних відбивачів разом із камерами, оснащеними інфрачервоними фільтрами. Точність таких систем дозволяє вимірювати вібрації з похибкою до 5 мм на відстані 10 м, а похибка визначення відстані між камерою та відбивачем становить лише 1%.

Застосування антихитальних систем також ефективне за умов сильного бічного вітру. У будь-якому випадку їх використання сприяє скороченню часу виконання операцій, підвищенню точності розміщення вантажу, зниженню втоми оператора та мінімізації ризику аварійних ситуацій.

2.3 Визначення механічних параметрів модернізованої системи

Роботу основних пристроїв крана оцінюють за допомогою кінематичних схем. Оскільки кутова швидкість двигунів зазвичай значно перевищує швидкість підйомного барабана або ходових коліс моста або візка, рух передається робочим органам кранових пристроїв через редуктори. Для вирощувальних пристроїв найбільше застосування знайшли системи зі шківним підйомом П (рисунок 2.2), за допомогою яких рух від барабана В передається на гачок.

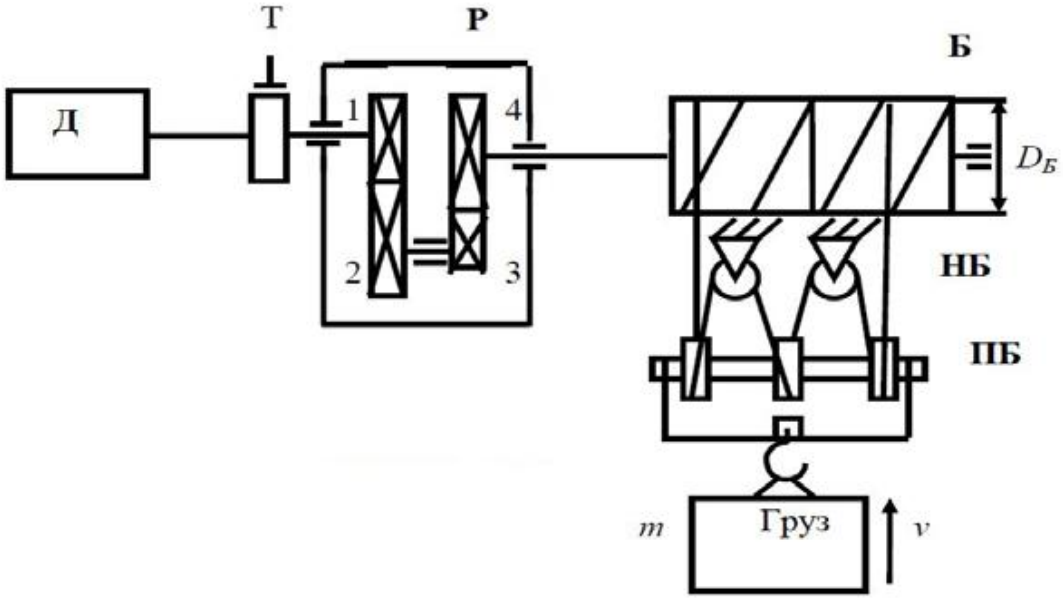

Рисунок 2.2 - Кінематична схема підйомного механізму

Двигун Д через редуктор Р обертає барабан лебідки, на який канат намотується в міру зростання і розмотується при опусканні багажу m. Вантажозавантажувальний механізм підвішений на рухомих блоках ПБ, які утворюють ланцюговий підйомник з нерухомими блоками НБ до

лебідки. 11 Двигун починає працювати після викидання багажу, потім слабина троса усувається.

Тоді розгін здійснюється з прискоренням не вище дозволеного для робочої швидкості, і зростання багажу підтримується. Коли ця висота досягнута, двигун гальмується, і гальмо Т прикладається до валу двигуна. Багаж утримується на гальмі. При опусканні багажу прискорення не тримається вище можливого, двигун переходить в режим гальмування. При розкладці багажу в місці розвантаження швидкість спуску зменшується, а вантаж рівномірно встановлюється на майданчик. Натяг мотузок для звільнення багажу знімається, гак відчіплюється, і робочий цикл повторюється [20].

2.3.1 Умови роботи та вимоги до електроприводу мостових кранів

Підвищена небезпека випадків при транспортуванні підйомних вантажів вимагає дотримання обов'язкових вказівок з пристосування та експлуатації підйомно-транспортних засобів при розрахунку та експлуатації. На механізми зростання і маневри правила адаптації та експлуатації враховують установку обмежувачів ходу, які діють на електронну схему управління.

Останні електроперемикачі виростового пристрою обмежують рух вантажозахватного механізму вгору, а електроперемикачі мостового і кареткового маневрів обмежують рух пристроїв в обох напрямках. Крім іншого, розглядається встановлення кінцевих вимикачів, які запобігають зіткненню з механізмами при роботі двох і більше кранів на мосту. Виняток становлять установки зі швидкістю руху до 30 м/хв. Кранові механізми повинні бути обладнані замкнутою гальмівною системою, що спрацьовує при знятій напрузі.

На кранових установках допускається використовувати робочу напругу до 500 В, тому кранові механізми постачаються з електрообладнанням на напругу змінного струму 220, 380, 500 В і постійного струму 220, 440 В. Схема управління забезпечує найвищий захист, відключаючи двигун при перевантаженні і невеликому короткому замиканні. Відсутність захисту виключає самозапуск двигунів при подачі напруги після збою живлення. Для безпечної профілактики електрообладнання, що знаходиться на містку, встановити блокуючі контакти на люк і двері кабіни. При відкритті люка або дверей відбувається зняття напруги з електрообладнання.

Для якісного виконання операцій з підйому, опускання та переміщення вантажів електропривод кранових механізмів повинен відповідати низці ключових вимог:

1) Регулювання кутової швидкості двигуна у широкому діапазоні, що є важливим для точних переміщень. Наприклад, для важких вантажів потрібна мінімальна швидкість, тоді як порожній гак або ненавантажений

візок повинні рухатися на більшій швидкості, щоб підвищити продуктивність крана;

2) Знижені швидкості необхідні для забезпечення плавної зупинки вантажу, що зменшує удари під час його висадки, а також спрощує роботу оператора;

3) Обмеження прискорень до допустимих меж із мінімальною тривалістю перехідних процесів.

Перша вимога пов'язана із зменшенням ударних навантажень у механічних передачах під час усунення зазорів, запобіганням ковзанню ходових коліс мостів і вагонеток, а також мінімізацією розгойдування вантажу на канатах під час інтенсивного розгону чи різкого гальмування. Друга вимога спрямована на забезпечення максимальної продуктивності крана.

Дотримання цих умов дозволяє підвищити ефективність роботи крана, забезпечити плавність переміщення вантажів і знизити знос механізмів, що, у свою чергу, позитивно впливає на термін служби обладнання та комфорт оператора під час виконання завдань.

2.3.2 Попередній вибір двигуна

Для початку розрахуємо момент інерції приводу, наведений до валу двигуна під час підйому вантажу [2]:

$$J_1 = 2 \cdot \left(J_{двигуна} + J_{кін.сх.}\right) + \frac{(m_T + m_Г) \cdot R^2}{\iota} \qquad (2.1)$$

де $J_{двигуна}$- момент інерції двигуна, кг м2;

$J_{кін.сх.}$-Момент інерції елементів кінетичної схеми, кг*м2;

mт і mг – маса траверси та вантажу, кг;

R – радіус канатного барабана, м;

ι - Передавальне число механізму підйому.

$$J_1 = 2 \cdot (7{,}3 + 9{,}2) + \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 0{,}45^2}{592} = 118{,}5 \text{ кг} \cdot \text{м2}.$$

Далі переходимо до розрахунку моменту інерції приводу, що приведений до валу двигуна при опусканні вантажу:

$$J_2 = 2 \cdot \left(J_{\text{двигуна}} + J_{\text{кін.сх.}}\right) + \frac{(m_\text{т} + m_K) \cdot R^2}{\iota} \qquad (2.2)$$

де $J_{\text{двигуна}}$- момент інерції двигуна, кг м2;

$J_{\text{кін.сх.}}$-Момент інерції елементів кінетичної схеми, кг*м2;

$m_т$ и $m_к$ – маса траверси та ковша, кг;

R – радіус канатного барабана, м;

ι - Передавальне число механізму підйому.

$$J_2 = 2 \cdot (7{,}3 + 9{,}2) + \frac{(50 + 25) \cdot 10^3 \cdot 0{,}45^2}{592} = 58{,}65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Після переходимо на момент інерції приводу, приведеного до валу двигуна при підйомі/опусканні траверси:

$$J_3 = 2 \cdot \left(J_{\text{двигуна}} + J_{\text{кін.сх.}}\right) + \frac{m_{\text{Т}} \cdot R^2}{\iota} \qquad (2.3)$$

де $J_{\text{двигуна}}$ - момент інерції двигуна, кг м2;
$J_{\text{кі.сх.}}$-Момент інерції елементів кінетичної схеми, кг*м2;
mт - маса траверси, кг;
R – радіус канатного барабана, м;
ι - Передавальне число механізму підйому.

$$J_3 = 2 \cdot (7{,}3 + 9{,}2) + \frac{25 \cdot 10^3 \cdot 0{,}45^2}{592} = 41{,}55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначимо потужність двигуна наступним виразом :

$$P_H \geq (1{,}2 \div 1{,}4) \cdot \frac{M_{\text{cmax}}}{\lambda} \cdot \omega_H; \qquad (2.4)$$

де $M_{\text{cmax}} = 3312$- максимальний момент, наведений до валу двигуна, Н·м;

λ- перевантажувальна здатність наміченого до встановлення двигуна;

ω_H- номінальна швидкість двигуна, яка повинна дорівнювати або трохи більше необхідної, 1/с.

$$P_H \geq 1{,}4 \cdot \frac{3312}{2} \cdot 105$$

$$P_H \geq 208656 \text{ Вт}.$$

Вибираємо двигун фірми SIEMENS модель 1MA8-317-6BD з номінальними параметрами, наведеними у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1–Номінальні параметри попередньо вибраного двигуна

Назва	SIEMENS 1MA8-317-6BD
Потужність, кВт	215
Швидкість, об/хв	990
ККД, %	96
Струм, А	380

Момент, Н·м	2070
Напруга,	380
cosφ	0.88
Момент інерції, кг·м2	7.3

2.3.3 Розрахунок навантажувальної діаграми

Для побудови навантажувальної діаграми необхідно розрахувати статичні та динамічні моменти, також моменти пуску і гальмування [9].

Пусковий момент визначається виразом:

$$M_{П1} = 1{,}6 \cdot M_H = 1{,}6 \cdot 2070 = 3312 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.5)$$

де M_H-номінальний момент двигуна, Нм.

Значення динамічного під час підйому вантажу моменту перебуває за формулою:

$$M_{дин1} = M_{П1} - M_{С(Г.Д)} = 3312 - 2024 = 1288 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.6)$$

Гальмівний момент визначається:

$$M_{Т1} = M_{С(Г.Д)} - M_{дин1} = 2024 - 1288 = 736 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7)$$

Час пуску та гальмування під час підйому вантажу:

$$t_{П,Т1} = \frac{J_1 \cdot \omega_C}{M_{дин1}} \quad (2.8)$$

де ω_C- значення швидкості швидкості двигуна, що відповідає МС, 1/с.

$$t_{П,Т1} = \frac{118{,}5 \cdot 104}{1288} = 9{,}54 \text{ с}.$$

Пусковий момент при опусканні вантажу визначається за такою формулою:

$$M_{П2} = M_H = 2070 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Значення динамічного моменту в генераторному режимі можна визначити так:

$$M_{дин2} = M_{П2} - M_{С2} = 2070 - 514 = 1556 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

Значення гальмівного моменту в генераторному режимі знаходиться за формулою:

$$M_{Т2} = M_{С2} - M_{дин2} = 514 - 1556 = -1042 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

Час пуску та гальмування в генераторному режимі:

$$t_{\text{П,Т2}} = \frac{J_2 \cdot \omega_C}{M_{\text{дин2}}}, \quad (2.11)$$

де ω_C- значення швидкості швидкості двигуна, що відповідає МС, 1/с.

$$t_{\text{П,Т2}} = \frac{58{,}65 \cdot 103{,}67}{1556} = 3.91 \text{ с.}$$

Пусковий момент при підйомі/опусканні траверси дорівнює:

$$M_{\text{ПЗ}} = 0.8 \cdot M_H = 0.8 \cdot 2070 = 1656 \text{ Нм.} \quad (2.12)$$

Значення динамічного моменту під час підйому траверси можна визначити:

$$M_{\text{динЗ}} = M_{\text{ПЗ}} - M_{C3} = 1656 - 202{,}43 = 1453{,}57 \text{ Нм.} \quad (2.13)$$

Значення гальмівного моменту під час підйому траверси визначається за такою формулою:

$$M_{T3} = M_{C3} - M_{\text{динЗ}} = 202{,}43 - 1453{,}57 = -1251{,}14 \text{ Нм.} \quad (2.14)$$

Час пуску та гальмування під час підйому траверси визначається виразом:

$$t_{\text{П,ТЗ}} = \frac{J_3 \cdot \omega_C}{M_{\text{динЗ}}} \quad (2.15)$$

$$t_{\text{П,ТЗ}} = \frac{41{,}55 \cdot 103{,}67}{1453{,}57} = 2{,}96 \text{ с.}$$

Значення динамічного моменту опускання траверси знайдемо за такою формулою:

$$M_{\text{дин4}} = M_{\text{ПЗ}} - M_{C4} = 1656 - 171{,}33 = 1484{,}67 \text{ Нм.} \quad (2.16)$$

Значення гальмівного моменту при опусканні траверси знайдемо за виразом:

$$M_{T4} = M_{C4} - M_{\text{дин4}} = 171{,}33 - 1484{,}67 = -1313{,}34 \text{ Нм.} \quad (2.17)$$

Час пуску та гальмування (в генераторному режимі при опусканні траверси):

$$t_{\text{П,Т4}} = \frac{J_З \cdot \omega_C}{M_{\text{дин4}}} \quad (2.18)$$

$$t_{\text{П,Т4}} = \frac{41{,}55 \cdot 103{,}67}{1484{,}67} = 2{,}9 \text{ с.}$$

Після визначення моментів перейдемо до визначення довжин і часу. Довжина спуску траверси під час пуску визначається формулою:

$$l_{\text{с}} = \frac{\omega_C \cdot R \cdot t_{\text{П,Т4}}}{2 \cdot i} = \frac{103{,}67 \cdot 0{,}45 \cdot 2{,}9}{2 \cdot 592} = 0{,}114 \text{ м.} \quad (2.19)$$

Довжина спуску траверси при гальмуванні:

$$l_{\text{ст}} = \frac{\omega_C \cdot R \cdot t_{\text{П,Т3}}}{2 \cdot i} = \frac{103{,}67 \cdot 0{,}45 \cdot 2{,}96}{2 \cdot 592} = 0{,}117 \text{ м.} \quad (2.20)$$

Час спуску траверси при постійній швидкості:

$$t_{\text{СП}} = \frac{l - 2 \cdot l_{\text{с}}}{\omega_C \cdot R} i = \frac{15 - 2 * 0{,}114}{103{,}67 \cdot 0{,}45} 592 = 187{,}5 \, c. \quad (2.21)$$

Час підйому вантажу за постійної швидкості:

$$t_{\text{п}} = \frac{l \cdot i}{\omega_C \cdot R} - t_{\text{П,Т1}} = \frac{15 \cdot 592}{0{,}45 \cdot 103{,}67} - 9{,}54 = 180{,}8 \, c. \quad (2.22)$$

Час опускання вантажу за постійної швидкості:

$$t_{\text{с}} = \frac{l \cdot i}{\omega_C \cdot R} - t_{\text{П,Т2}} = \frac{15 \cdot 592}{0{,}45 \cdot 103{,}67} - 3{,}91 = 186{,}4 \, c. \quad (2.23)$$

Час підйому траверси при постійній швидкості:

$$t_{\text{С(Т.Д)}} = \frac{l - 2 \cdot l_{\text{ст}}}{\omega_C \cdot R} i = \frac{15 - 2 * 0{,}117}{103{,}67 \cdot 0{,}45} 592 = 187{,}4 \, c. \quad (2.24)$$

Поєднана тахограма та навантажувальна діаграма двигуна представлені на рисунку 2.3.

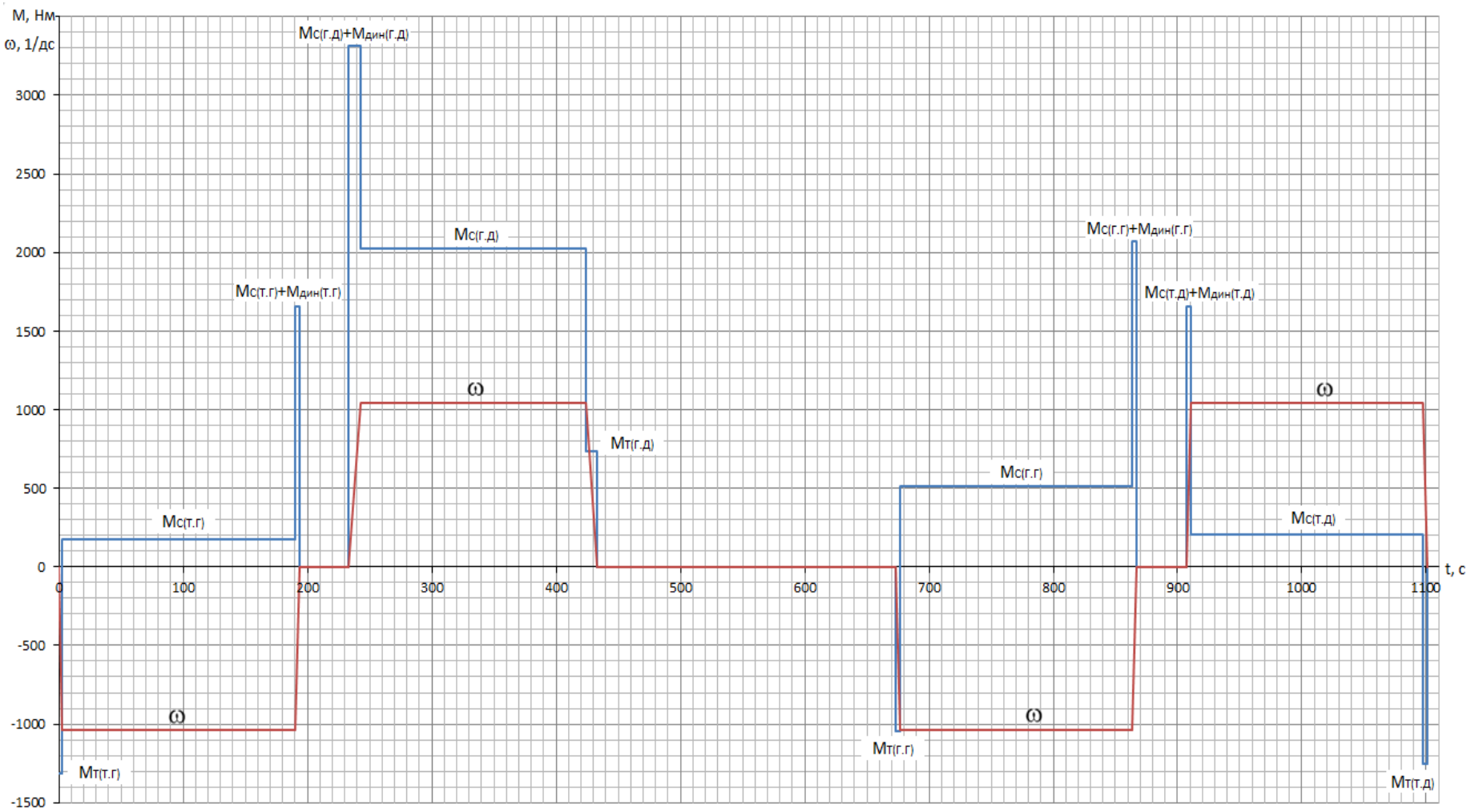

Рисунок 2.3– Навантажувальна діаграма та тахограма двигуна

2.3.4 Перевірки двигуна з нагрівання та перевантажувальної здатності

Проведемо перевірку двигуна за фактичним еквівалентним моментом:

$$M_{\text{ЕФ}} = \sqrt{\frac{M^2_{\text{П}} \cdot t_{\text{П}} + M^2_{\text{С}} \cdot t_{\text{УСТ}} + M^2_{\text{Т}} \cdot t_{\text{Т}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{УСТ}} + t_{\text{Т}}}}, \quad (2.25)$$

де $M_П$– пусковий момент електроприводу, Н·м;
$t_П$- Час пуску електроприводу, с;
$M_С$– статичний момент електроприводу, Н·м;
$t_{УСТ}$- Час на ділянці тахограми, що встановилася, с;
$M_Т$– гальмівний момент електроприводу, Н·м;
$t_Т$- Час гальмування електроприводу, с.

Підставивши всі значення і вирішивши вираз, отримаємо фактичний еквівалентний момент, рівний:

$$M_{\text{ЕФ}} = 1109 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Далі визначимо фактичну тривалість включення:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{\sum t_{\text{п}} + \sum t_{\text{уст}} + \sum t_{\text{Т}}}{\alpha \cdot (\sum t_{\text{п}} + \sum t_{\text{Т}}) + \sum t_{\text{уст}} + \beta \cdot \sum t_0} = \frac{780{,}7}{38{,}62 \cdot 0{,}75 + 742{,}1 + 0{,}5 \cdot 320} = 0{,}84 \quad (2.26)$$

де $t_П$- Час пуску, с;
t_0- Час пауз, с;
$t_Т$- Час гальмування, с;
$t_{УСТ}$- час роботи на встановленій швидкості, с;
α- Коефіцієнт що показує погіршення умов охолодження при роботі на швидкості нижче номінальної, приймають рівним 0,75;
β- Коефіцієнт, що показує погіршення умов охолодження під час пауз, приймають рівним 0,5.

Перевіряємо двигун за умовою:

$$\text{М}_{\text{Н}} \geq \text{М}_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{ф}}}{\varepsilon_{\text{СТ}}}}, \quad (2.27)$$

$$2070 \geq 1109 \cdot \sqrt{\frac{0.84}{0{,}6}}.$$

$$2070 \geq 1313.$$

Двигун відповідає цим умовам. По нагріванні він проходить.

Еквівалентний момент становить 63,4% від номінального, що задовольняє перевірці аварійного режиму роботи електроприводу підйому при виході з експлуатації одного з двигунів. Це забезпечує необхідний запас потужності.

Перевіряємо двигун з перевантаження за умовою:

$$\frac{M_{MAX}}{M_H} \leq \lambda, \qquad (2.28)$$

де M_{MAX}- Максимальний момент на навантажувальній діаграмі, Нм;

λ- Перевантажувальна здатність двигуна.

$$\frac{3312}{2070} \leq \lambda$$

$$1{,}6 \leq \lambda.$$

Двигун проходить по перевантаженню та нагріванню, отже кінцевий вибір падає на двигун SIEMENS моделі 1MA8-317-6BD. Через необхідність двох двигунів використовуємо два однакових.

2.3.5 Вибір та характеристика перетворювача частоти

Тому перетворювач частоти (ПЧ) для вибираємо виходячи із забезпечення виконання наступних умов:

$$I_{d\text{н}} \geq I_{\text{фн}} = 380 \text{ А};$$

$$I_{dmax} \geq K_{\text{п}} I_{\text{фн}} = 836 \text{ А},$$

де $K_{\text{п}}$- коефіцієнт зв'язку пускового струму з номінальним струмом двигуна;

$$U_{d\text{н}} \geq U_{\text{фн}} = 380 \text{ В};$$

$$S_{d\text{н}} \geq k_{\text{з}} * S_{\text{фн}} = 1{,}2 * \sqrt{3} * 380 * 380 = 520 \text{ кВА}; \qquad (2.29)$$

де $k_{\text{з}}$- Коефіцієнт запасу потужності.$k_{\text{з}} = 1{,}2$

За цими параметрами підходить перетворювач частоти ATV 71HC28N4 фірми Schneider Electric, технічні дані якого представлені в таблиці 2.2; Важлива схема показано рисунку 2.4.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики ПЧ ATV 71HC28N4

Параметр	Значення
Номінальна потужність	280 кВт
Повна потужність	325 кВА
Вхідна напруга	380 В
Номінальний струм	494 А
Максимальний тривалий струм	550 А
Максимальний струм протягом 60 с.	825 А
Максимальний струм протягом 2 с.	907 А
Вихідна частота	0.1÷500 Гц
Максимальна частота комутації	2500 Гц
Номінальне споживання енергії	1188 Вт

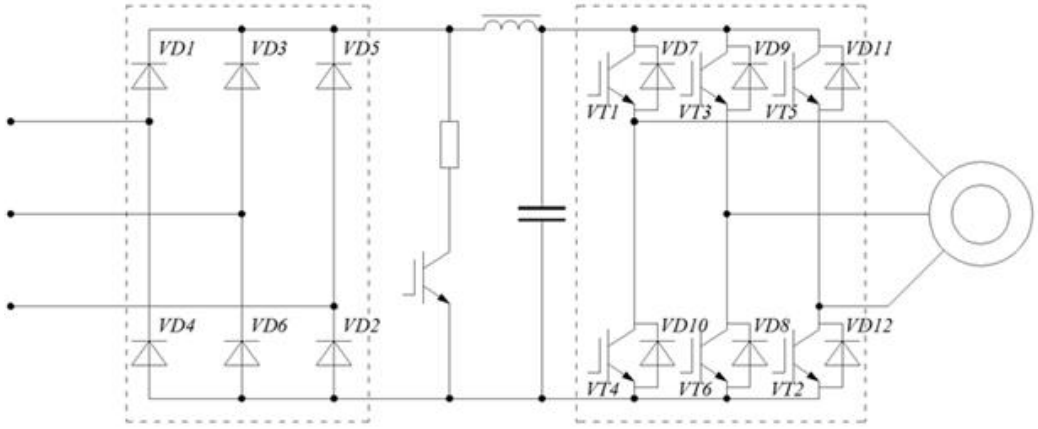

Рисунок 2.4 – Принципова схема перетворювача частоти ATV 71HC50N4

2.3.6 Вибір та характеристика силового трансформатора

Напруга живлення дорівнює 10 кВ, напруга приводу дорівнює 380 В. У цьому випадку слід використовувати понижувальний трансформатор з наступними параметрами [11]:

$$\frac{U_{\text{тр.вх}}}{U_{\text{тр.вих}}} = \frac{10}{0{,}4};$$

$$S_{\text{тр}} \geq 315 \text{ кВА}.$$

Ці параметри відповідає трансформатору Geafol 400 10/0,4 фірми Siemens. Його параметри вказані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики трансформатора Geafol 400 10/0,4

Параметр	Значення
Номінальна потужність (Sтр.н)	400 кВА
Номінальна частота (fтр.н)	50 Гц
Номінальна напруга обмотки ВН (Uтр.1л)	10 кВ
Номінальна напруга обмотки ПН (Uтр.2л)	400 В
Втрати холостого ходу (ΔPтр.хх)	800 Вт
Втрати короткого замикання (ΔPтр.кз)	4900 Вт
Напруга короткого замикання (eтр.кз)	6%

Номінальний струм трансформатора:

$$I_{\text{тр.2ф}} = \frac{S_{\text{тр.н}}}{\sqrt{3}*U_{\text{тр.2л}}} = \frac{400*10^3}{\sqrt{3}*400} = 577 \text{ А}. \quad (2.30)$$

Повний опір фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки:

$$Z_{\text{тр.2ф}} = \frac{e_{\text{тр.кз}}*U^2_{\text{тр.2л}}}{S_{\text{тр.н}}} = \frac{0{,}06*400^2}{400*10^3} = 0{,}024 \text{ Ом}. \quad (2.31)$$

Активний опір фази трансформатора:

$$R_{\text{тр.2ф}} = \frac{P_{\text{тр.кз}}}{I^2_{\text{тр.2ф}}*3} = \frac{4900}{577^2*3} = 0{,}0049 \text{ Ом}. \quad (2.32)$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_{\text{тр.2ф}} = \sqrt{Z^2_{\text{тр.2ф}} - R^2_{\text{тр.2ф}}} = \sqrt{0{,}024^2 - 0{,}0049^2} = 0{,}0235 \text{ Ом}. \quad (2.33)$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{\text{тр.2ф}} = \frac{X_{\text{тр.2ф}}}{p} = \frac{0{,}0235}{3{,}14} = 7{,}48 \text{ мГн}. \quad (2.34)$$

2.4 Висновок до другого розділу

Кранові механізми працюють у багаторазово-короткочасному режимі з великою кількістю перемикань на рік і тиждень у важливих атмосферних системах, тому для них необхідно використовувати спеціальні кранові електродвигуни з передовим обладнанням, механічним значенням і від зміненого моменту інерції.

До основних переваг електроприводів кранових механізмів можна віднести наступне: налаштування діапазонів зміни крутного моменту двигуна і регулювання 11 швидкостей; плавне регулювання швидкості; забезпечує високу жорсткість механічних властивостей і обмежує динамічні зусилля в елементах механічної частини.

Схеми обслуговування кранових механізмів можуть містити такі елементи, як опори пуску та керування, гальванічні електромагніти, контролери, баласти, апаратура сигналізації, блокування та освітлення, термінали, хімікати та забезпечення реверсивного нагріву, регулювання швидкості, електрогальванізація, обертання лебідка при підйомі та підйомі в сторони порушення, нульова та електрична блокування та захист від короткого замикання.

Сьогодні існує нагальна потреба модернізації систем управління електричними кранами, переведення їх на новий рівень з можливістю подальшої енергозбереження, підвищення надійності.

3 ВИБІР, ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ КРАНА

3.1 Мета та методи експериментальних досліджень

Мета модернізації крана вантажопідйомністю 16/5 тонн.

Метою цього проекту є модернізація мосту крана шляхом зміни його системи електроприводу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1) провести огляд сучасних конструкцій мостових кранів і типів мостів як основного несучого елемента;
2) виконати конструктивну розробку крана;
3) виконати необхідні розрахунки на міцність;
4) розв’язувати задачі, пов’язані з економікою.

3.2 Вибір обладнання для створення автоматизованої системи

3.2.1 Захист від перевантаження та коротких замикань

Для забезпечення захисту силових вентилів напівпровідникових перетворювачів від коротких замикань, як зовнішніх, так і внутрішніх, використовуються швидкодіючі плавкі запобіжники.

Вибір плавкого запобіжника здійснюється на основі ряду умов [4]:

$$U_{\text{н.пред}} \geqslant U_{\text{н.дв}} = 380 \text{ В};$$

$$I_{\text{н.пред}} \geqslant I_{max}$$

$$I_{max} = \sqrt{2} * I_{\text{пч.}max} = \sqrt{2} * 1411 = 1995 \text{ А}. \qquad (3.1)$$

Цим умовам задовольняють два розташовані паралельно запобіжники TESYS FUSE NH4 (DF2LA1251) фірми Schneider Electric з наступними параметрами:

$$I_{\text{пред}} = 1250 \text{ А};$$

$$U_{\text{пред.н}} = \sim 500 \text{ В}.$$

Автоматичні вимикачі є багатократними захисними пристроями, які призначені для захисту електроприводів і перетворювачів електричної енергії від коротких замикань та перевантажень. Вибір автоматичного вимикача для електродвигуна та перетворювача частоти (який встановлюється на стороні низької частоти) здійснюється з урахуванням таких умов [4]:

$$U_{\text{авт.викл}} \geqslant U_{\text{дв.н}} = 380 \text{ В};$$

$$I_{\text{авт.викл}} \geqslant I_{\text{дв.н}} = 380 \text{ А};$$

Цим умовам відповідає автоматичний вимикач Compact NSX LV432975 фірми Schneider Electric з робочою напругою 690 В та уставкою струму в діапазоні до 500 А.

3.2.2 Захист від перенапруг

У комплекті з перетворювачем частоти ATV 71HC28N4 йде мережевий дросель VW3 A4 564, параметри якого представлені в таблиці 3.1.

Мережевий дросель забезпечує найкращий захист від перенапруг і зменшує гармоніки струму, що виробляються перетворювачем частоти [19].

Таблиця 3.1–Параметри мережевих дроселів VW3 A4 564

Номінальна напруга	Номінальна частота	Індуктивність	Номінальний струм	Струм насичення	Втрати
380 - 480 В	50 - 60 Гц	0,038 мГн	613 А	1150 А	307 Вт

Також до комплекту вибраного перетворювача входить пасивний фільтр VW3 A4 612, який представлений на рисунку 3.1. Він дозволяє зменшити гармоніку струму з повним рівнем спотворення до 10%.

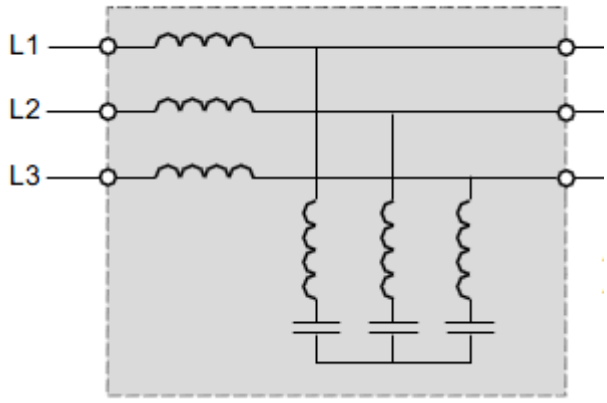

Рисунок 3.1 – Принципова схема пасивного фільтра VW3 A4 612

Також перетворювач частоти забезпечений вхідними фільтрами придушення радіоперешкод відповідно до стандарту МЕК/EN 61800-3, друге видання, категорія С2 або С3 для оточення 1 або 2, що відноситься

до приводних пристроїв регулювання швидкості та вимог ЄС з електромагнітної сумісності (EMC).

І ще ПЧ має додаткові вхідні фільтри EMC VW3 A4 411. Ці фільтри призначені для зменшення наведеного випромінювання в мережі нижче за межі, встановлені стандартами EN 55011, група 1, клас A або B і МЕК/EN 61800/3, категорія C2 або C3.

3.2.3 Контроль ізоляції

Перед перетворювачем частоти та після нього встановлюється модуль контролю ізоляції струму на землю типу Vigilohm XL308 від компанії Schneider Electric. Цей пристрій має такі технічні характеристики:

- лінійна напруга: до 1700 В;
- електрична міцність: 2500 В;
- уставка попереджувального сигналу: 1–299 кОм;
- уставка спрацьовування сигналізації: 0,2–99,9 кОм.

Для керування механізмом пересування візка обрано силовий перетворювач частоти ATV930U55N4 (рис. 3.2), який також належить до продукції Schneider Electric [17].

Використання таких компонентів забезпечує:

1) високу надійність системи контролю ізоляції, що дозволяє оперативно виявляти та попереджати витоки струму на землю, запобігаючи аварійним ситуаціям;

2) ефективність роботи частотного перетворювача, який забезпечує точність та плавність керування рухом механізму візка.

Інтеграція цих елементів сприяє підвищенню загальної безпеки, стабільності та продуктивності роботи кранових механізмів.

Рисунок 3.2 – перетворювач частоти ATV930U55N4

Для системи автоматизації був обраний програмований логічний контролер (ПЛК) TM241CEC24T виробництва компанії Schneider Electric (рис. 3.3) [13].

Рисунок 3.3 – ПЛК TM241CEC24T

Технічні характеристики ПЛК TM241CEC24T:

- номінальна напруга живлення: 24 V DC;
- кількість дискретних входів/виходів: 24;
- напруга дискретного входу: 24 V;
- тип дискретного виходу: транзисторний.

Для розширення кількості дискретних входів було обрано модуль TM3DI16K (рис. 3.4) від компанії Schneider Electric [14].

Використання ПЛК TM241CEC24T у поєднанні з модулем TM3DI16K забезпечує:

1) масштабованість системи – можливість збільшення кількості підключених дискретних сигналів без необхідності заміни основного контролера;

2) гнучкість у налаштуванні системи управління – завдяки підтримці різних модулів розширення;

3) надійність та стабільність роботи – завдяки перевіреній якості обладнання Schneider Electric.

Такий комплект дозволяє ефективно реалізувати системи керування навіть у складних технічних умовах.

Рисунок 3.4 – Дискретний модуль розширення TM3DI16K

Технічні характеристики модуля TM3DI16K:

- кількість дискретних входів: 16;
- напруга дискретного входу: 24 V;
- час відгуку: 4 мс.

Для забезпечення живлення обраного обладнання було використано блок живлення ABLS1A24050 (рис. 3.5) від компанії Schneider Electric [13].

Інтеграція модуля TM3DI16K із блоком живлення ABLS1A24050 забезпечує:

1. стабільне живлення обладнання з напругою 24 V, необхідною для роботи дискретних входів;
2. швидку реакцію системи завдяки малому часу відгуку модуля (4 мс), що є критично важливим для автоматизованих процесів;
3. надійність та сумісність компонентів, оскільки всі елементи належать до однієї серії продукції Schneider Electric.

Таке поєднання забезпечує ефективну роботу системи керування, адаптовану для виконання складних виробничих завдань.

Рисунок 3.5 – Блок живлення ABLS1A24050

Технічні характеристики блоку живлення ABLS1A24050:

- номінальна вхідна напруга: 100…240 В AC;
- номінальна потужність: 120 Вт;
- вихідна напруга: 24 В DC;
- вихідний струм: 5 А.

Для обмеження пересування візка було обрано кінцевий вимикач XCRK111 (рис. 3.6) від компанії Telemecanique [13].

Поєднання блоку живлення ABLS1A24050 та кінцевого вимикача XCRK111 забезпечує:

1) стабільне живлення системи з потужністю 120 Вт, достатньою для роботи всіх компонентів автоматизації;

2) надійний контроль переміщення візка, де кінцевий вимикач XCRK111 виконує функцію запобігання виходу механізму за допустимі межі;

3) сумісність елементів, що сприяє простоті інтеграції в загальну систему управління.

Ця конфігурація забезпечує безпеку експлуатації та ефективність системи пересування кранового візка.

Рисунок 3.6 – Кінцевий вимикач XCRK111

Технічні характеристики кінцевого вимикача XCRK111:

- серія продукту: OsiSense XC;
- тип виробу або компонента: кінцевий вимикач (limit switch);
- матеріал: металевий;
- кількість полюсів: 4;
- тип та склад контакту: 2 x (1 НЗ + 1 НВ).

Для ручного управління системою було обрано пульт керування XAL-B3-6913 (рис. 3.7) від компанії АСКО [13].

Комбінація кінцевого вимикача XCRK111 і пульта XAL-B3-6913 забезпечує:

1) надійний захист завдяки міцній металевій конструкції кінцевого вимикача, який підходить для використання у важких промислових умовах;

2) простоту управління за допомогою ергономічного пульта XAL-B3-6913, який дозволяє оператору виконувати контрольні операції вручну;

3) гнучкість налаштувань завдяки використанню контактів з різною конфігурацією (1 НЗ + 1 НВ), що дозволяє адаптувати вимикач до конкретних вимог системи.

Ця система сприяє точному і безпечному керуванню пересуванням кранового механізму.

Рисунок 3.7 – Пульт ручного керування XAL-B3-6913

Технічні характеристики ручного пульта керування XAL-B3-6913:

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

Для управління механізмом підйому було обрано силовий перетворювач частоти ATV930D30N4 (рис. 3.8) від компанії Schneider Electric [20].

Переваги використання пульта XAL-B3-6913 разом із перетворювачем ATV930D30N4:

1) зручність управління завдяки наявності семи кнопок, що забезпечують широкий функціонал для контролю руху;

2) висока надійність пульта, підтверджена класом захисту IP65, який гарантує захист від пилу та водяних бризок, що дозволяє використовувати його у складних умовах;

3) ефективне керування підйомом за рахунок перетворювача ATV930D30N4, який забезпечує плавність і точність роботи механізму підйому.

Така конфігурація обладнання дозволяє підвищити ефективність роботи системи, знизити знос механізмів і забезпечити комфорт оператора під час виконання підйомно-транспортних операцій.

Рисунок 3.8 – перетворювач частоти ATV930D30N4

В якості кінцевого вимикача обмеження підйому опускання обрано КИ – Г1 (рис.3.9) [5].

Рисунок 3.9 – Кінцевий вимикач КИ – Г1 49

Технічні характеристики обмежувача пересування XAL-B3-6913:

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

Для забезпечення контролю вантажопідйомності було обрано блок DSET01 (рис. 3.10) [5].

Особливості використання:

1) надійність конструкції завдяки міцному металічному корпусу, який забезпечує довговічність та стійкість до зовнішніх впливів;

2) точність контролю вантажопідйомності за рахунок використання блоку DSET01, який дозволяє запобігти перевантаженням, що може призвести до поломок або аварій;

3) безпека експлуатації забезпечується за рахунок конфігурації контактів (3 НЗ), що дозволяє чітко фіксувати стан системи та уникати помилок в управлінні.

Поєднання такого обладнання дозволяє ефективно контролювати процес вантажопідйому, підвищуючи безпеку та продуктивність роботи крана.

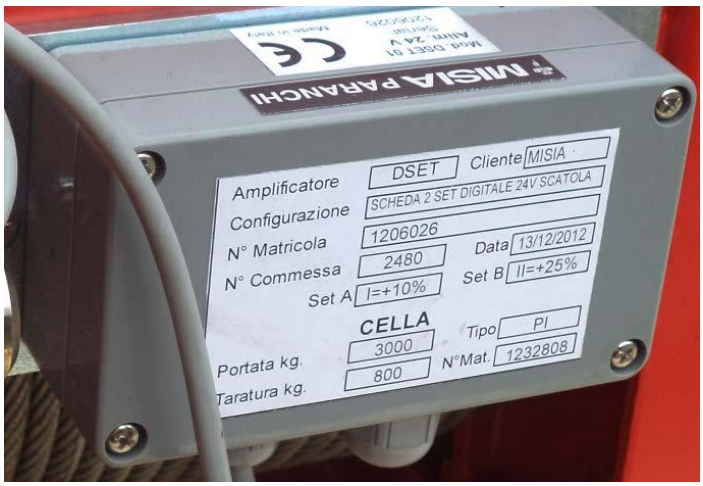

Рисунок 3.10 – Обмежувач вантажопідйомності DSET01

Технічні характеристики:

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

Вимірювання довжини троса буде здійснюватися на базі енкодера RI 76TD 1024 (рис.3.11) фірми Hengstler .

Рисунок 3.11 – Енкодер RI 76TD 1024

3.3 Розробка схемотехнічних рішень, алгоритмів автоматизації та людиномашинного інтерфейсу для системи керування мостового крану

Забезпечення захисту частотних перетворювачів та електродвигунів. Для захисту частотних перетворювачів, електродвигунів механізмів пересування та підйому будуть використані автоматичні

вимикачі спеціальної серії TeSys GV2 та GV3 від Schneider Electric. Ці вимикачі розроблені для застосування в силових колах електродвигунів і забезпечують надійний захист від перевантажень і коротких замикань.

Автоматичні вимикачі серії GV2 оснащені термомагнітним розчеплювачем, що дозволяє забезпечити захист двигунів від перевантажень та коротких замикань. Вибір вимикача здійснюється на основі відповідності номінального струму розчеплювача номінальному струму електродвигуна.

Для механізму підйому було обрано автоматичний вимикач GV3P50 (рис. 3.12), який забезпечує надійний захист електродвигунів і гарантує їх стабільну роботу в процесі підйому вантажів.

Рисунок 3.12 – Автоматичний вимикач захисту двигуна GV3

Технічні характеристики автоматичного вимикача GV3P50:

- категорія використання: AC3;
- кількість полюсів: 3;
- діапазон регулювання теплового захисту: 37…50 А.

Для забезпечення захисту двигуна пересування візка було обрано автоматичний вимикач GV2ME16 (рис. 3.13), який є аналогічним за функціональністю до вимикача для механізму підйому. Це забезпечує узгодженість в захисті всіх частин кранової системи та ефективне регулювання теплового захисту для двигуна візка.

Ці вимикачі забезпечують надійний захист від перевантажень та коротких замикань для двигунів як механізмів підйому, так і пересування візка, тим самим сприяючи стабільності та безпеці роботи кранової системи.

Рисунок 3.13 – Автоматичний вимикач захисту двигуна GV2

Технічні характеристики GV2ME16:

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

Також необхідно забезпечити захист від перевантаження електромагнітного гальма двигунів підйому та пересування візка. Для цього буде використано автоматичний вимикач серії GV2ME01 (рис. 3.13) з діапазоном регулювання теплового захисту 0,1…0,16 А, який повністю покриває струм живлення електромагнітних гальм двигунів.

Для забезпечення безпеки у крановому обладнанні обов’язково має бути встановлений головний контактор. У разі аварійної ситуації, при натисканні оператором кнопки аварійної зупинки (СТОП), головний контактор відключає силове коло крана, припиняючи будь-який непередбачений процес. Це дозволяє швидко зупинити роботу механізмів і запобігти аваріям чи пошкодженням обладнання.

Максимальний струм у ланці живлення з напругою 380 В розраховується як сума струмів двигуна підйому та двигуна пересування візка. Цей розрахунок є необхідним для коректного вибору автоматичних вимикачів та головного контактора, що гарантує надійний захист від перевантажень та коротких замикань в усіх елементах силової схеми: $I_к = I_{дв.м.в} + I_{дв.м.п} = 11.2 + 42 = 53.2$ А.

Відповідно, для цієї системи обирається контактор LC1D65AM7 серії TeSys D від Schneider Electric (рис. 3.14).

Рисунок 3.14 – 3P контактор серії TeSys D

Технічні характеристики LC1D65AM7:

- категорія використання – AC3;
- кількість полюсів – 3;
- напруга керування – 220 В;
- допоміжний контакт – 1 НВ + 1 НЗ;
- струм комутації силових контактів – 65 А.

Для захисту електропроводки первинного кола на вході в шафу керування талю буде встановлено автоматичний вимикач. Вибір вимикача здійснюється аналогічно вибору головного контактора, тобто на основі сумарного струму механізмів. Для цього необхідно вибрати вимикач із характеристикою D, що підходить для механізмів з важким пуском, забезпечуючи захист електричних схем від перевантажень та коротких замикань під час пуску.

На основі цих параметрів було обрано автоматичний вимикач моделі A9F75363 серії Acti 9 iC60 від Schneider Electric (рис. 3.15). Цей вимикач відповідає вимогам до захисту проводки і гарантує надійний захист електричних схем від можливих пошкоджень через коротке замикання або перевантаження.

Рисунок 3.15 – 3P автоматичний вимикач серії Acti 9 iC60 53

Технічні характеристики A9F75363:

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

Для керування гальмом будуть застосовані контактори TeSys K LC1K0601M7 з напругою керування 220 В та струмом комутації 6 А (рис. 3.16). Ці контактори забезпечать надійне управління процесом гальмування механізмів крана, гарантують стабільність роботи та забезпечують безпечне і точне комутування в системі.

Рисунок 3.16 – 3P контактор серії TeSys K

Технічні характеристики LC1K0601M7:

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

Схема підключення частотного перетворювача для механізму підйому містить наступні елементи:

1) 1QF2 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV3P50;
2) 1UZ1 – перетворювач частоти ATV930D30N4;
3) 1КМ1 – контактор керування електромагнітним гальмом двигуна підйому LC1D65AM7;
4) 1М1 – двигун механізму підйому;
5) 1R1 – гальмівний резистор.

Усі ці елементи, за винятком гальмівного резистора, були обрані в попередніх розділах.

Гальмівні резистори є критично важливими для процесу реостатного гальмування, оскільки вони забезпечують розсіювання тепла, що виникає при перетворенні кінетичної енергії ротора в електричну. Основна функція цих резисторів полягає в регулюванні гальмівної сили через зміни опору: зменшення опору підвищує гальмівну силу, а збільшення — знижує її.

Для підбору гальмівного резистора слід використовувати каталог Schneider Electric, де наведено рекомендовані параметри опору для кожної серії частотних перетворювачів (рис. 3.17). Згідно з даними каталогу, для частотного перетворювача моделі ATV930D30N4 необхідний резистор з опором 16 Ом і потужністю 14 кВт.

Перетворювачі частоти	Ступінь захисту	Опір при 20 °C (Ом)	Потужність при 50 °C (кВт)	Кількість для ПЧ	Каталожний номер	Маса (кг)
ATV930U40M3	IP23	28	5.1	1	VW3A7752	25
ATV930D11N4 - D15N4	IP23	28	5.1	1	VW3A7752	25
ATV950D11N4E - D15N4E	IP23	28	5.1	1	VW3A7752	25
ATV930U75M3	IP23	16	14	1	VW3A7753	47
ATV930D18N4 - D30N4	IP23	16	14	1	VW3A7753	47
ATV950D18N4 - D30N4	IP23	16	14	1	VW3A7753	47
ATV950D18N4E - D30N4E	IP23	16	14	1	VW3A7753	47

Рисунок 3.17 – Дані з каталогу SchneiderElectric для підбору гальмівних резисторів

Відповідно до отриманих даних, для забезпечення ефективного гальмування буде обрано гальмівний резистор FELR01.1N-12K5-N018R-A-560 з опором 18 Ом та потужністю 12.5 кВт (рис. 3.18). Це обладнання забезпечить оптимальне гальмування механізму підйому, дозволяючи

ефективно розсіювати теплову енергію, що утворюється при перетворенні кінетичної енергії в електричну, що сприятиме зменшенню механічних навантажень та підвищенню надійності роботи системи.

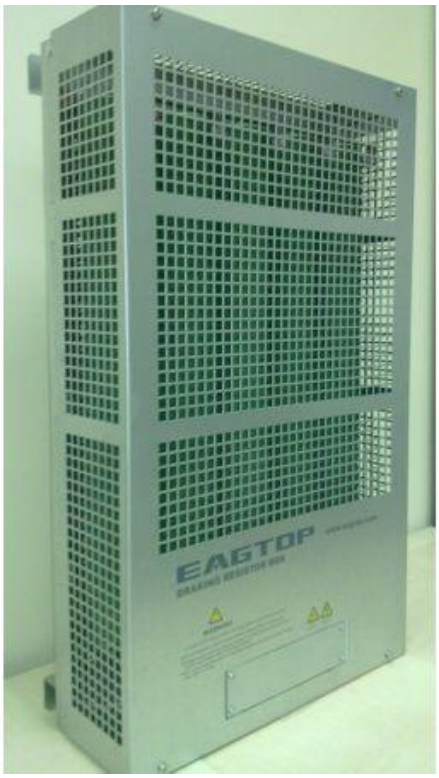

Рисунок 3.18 – Гальмівний резистор для механізму підйому

У додатку представлено дві схеми підключення, схема підключення електромагнітного гальма механізму підйому:

1) 1QF1 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME01.
2) 1КМ1 – силові контакти контактора керування електромагнітним гальмом двигуна підйому LC1D65AM7.
3) 1UZ2 – гальмівний випрямляч.
4) 1YB1 – електромагнітне гальмо.

У цій схемі електромагнітне гальмо та гальмівний випрямляч вже вбудовані в двигун механізму підйому, що спрощує конструкцію та дозволяє зменшити кількість окремих елементів, необхідних для реалізації системи.

Схема підключення частотного перетворювача механізму пересування візка:

1) 3QF2 – автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME16.
2) 3UZ1 – частотний перетворювач ATV930U55N4.
3) 3КМ1 – контактор керування електромагнітним гальмом двигуна пересування візка LC1D65AM7.
4) 3М1 – двигун механізму пересування візка.
5) 3R1 – гальмівний резистор.

Ці схеми забезпечують належну роботу механізмів підйому та пересування візка, гарантуючи ефективне управління гальмами та

електричними системами за допомогою частотних перетворювачів, контакторів та вимикачів для захисту двигунів.

Перетворювачі частоти	Ступінь захисту	Опір при 20 °C (Ом)	Потужність при 50 °C (кВт)	Кількість для ПЧ	Каталожний номер	Маса (кг)
ATV930D18M3	IP23	5	6.9	1	VW3A7746	27
ATV930D7N4 - U40N4	IP20	100	1.7	1	VW3A7750	5.5
ATV950D7N4 - U40N4	IP20	100	1.7	1	VW3A7750	5.5
ATV930U55N4 - U75N4	IP20	60	3.4	1	VW3A7751	10
ATV950U55N4E - U75N4E	IP20	60	3.4	1	VW3A7751	10

Рисунок 3.19 – Дані з каталогу SchneiderElectric для підбору гальмівних резисторів

Відповідно до отриманих даних, для забезпечення належної роботи системи буде обрано гальмівний резистор FELR01.1N-04K5-N055R-A-560 з наступними технічними характеристиками:

- опір: 55 Ом;
- потужність 4,5 кВт.

Цей гальмівний резистор буде використаний у схемах для забезпечення ефективного реостатного гальмування, що дозволяє розсіювати кінетичну енергію, перетворюючи її в тепло та забезпечуючи контроль швидкості механізмів.

Рисунок 3.20 – Гальмівний резистор для механізму пересування візка

Згідно з описом, у схемі підключення електромагнітного гальма та пульта ручного керування для механізму пересування візка використано

кілька ключових елементів, що забезпечують ефективну роботу системи та надійний захист.

Опис схеми підключення електромагнітного гальма механізму пересування візка:

1) 3QF1 - автоматичний вимикач захисту двигуна GV2ME01, який забезпечує захист від перевантажень;

2) 3КМ1 - силові контакти контактора керування електромагнітним гальмом двигуна пересування візка (LC1D65AM7);

3) 3UZ2 - гальмівний випрямляч, який перетворює змінний струм у постійний для електромагнітного гальма;

4) 3YB1 - електромагнітне гальмо, яке є вбудованим компонентом двигуна механізму пересування візка, що забезпечує ефективне гальмування.

Опис схеми підключення пульта ручного керування:

1) HS, XP1 - 16-ти піновий промисловий роз'єм, який забезпечує зручність підключення пульта до системи та дозволяє швидко замінити пульт у разі його несправності;

2) A2 - блок дискретних входів TM3DI16K, що забезпечує зчитування сигналів від кнопок пульта та їх обробку;

3) A6 - пульт ручного керування XAL-B3-6913, який включає кнопки для керування механізмами;

4) FU3 - запобіжник захисту дискретних входів, номінальний струм якого становить 0,2 А, забезпечує захист вхідних сигналів від перевантаження.

Ключові характеристики:

– запобіжник FU3 захищає дискретні входи від коротких замикань і перевантажень, запобігаючи поломкам і збоїв у роботі системи;

– пульт ручного керування включає кнопку аварійної зупинки (SB1), що дозволяє оператору зупинити роботу механізмів у разі необхідності для забезпечення безпеки.

Ця схема дозволяє не тільки зручно управляти системою, але й забезпечує високий рівень безпеки та захисту від потенційних небажаних ситуацій.

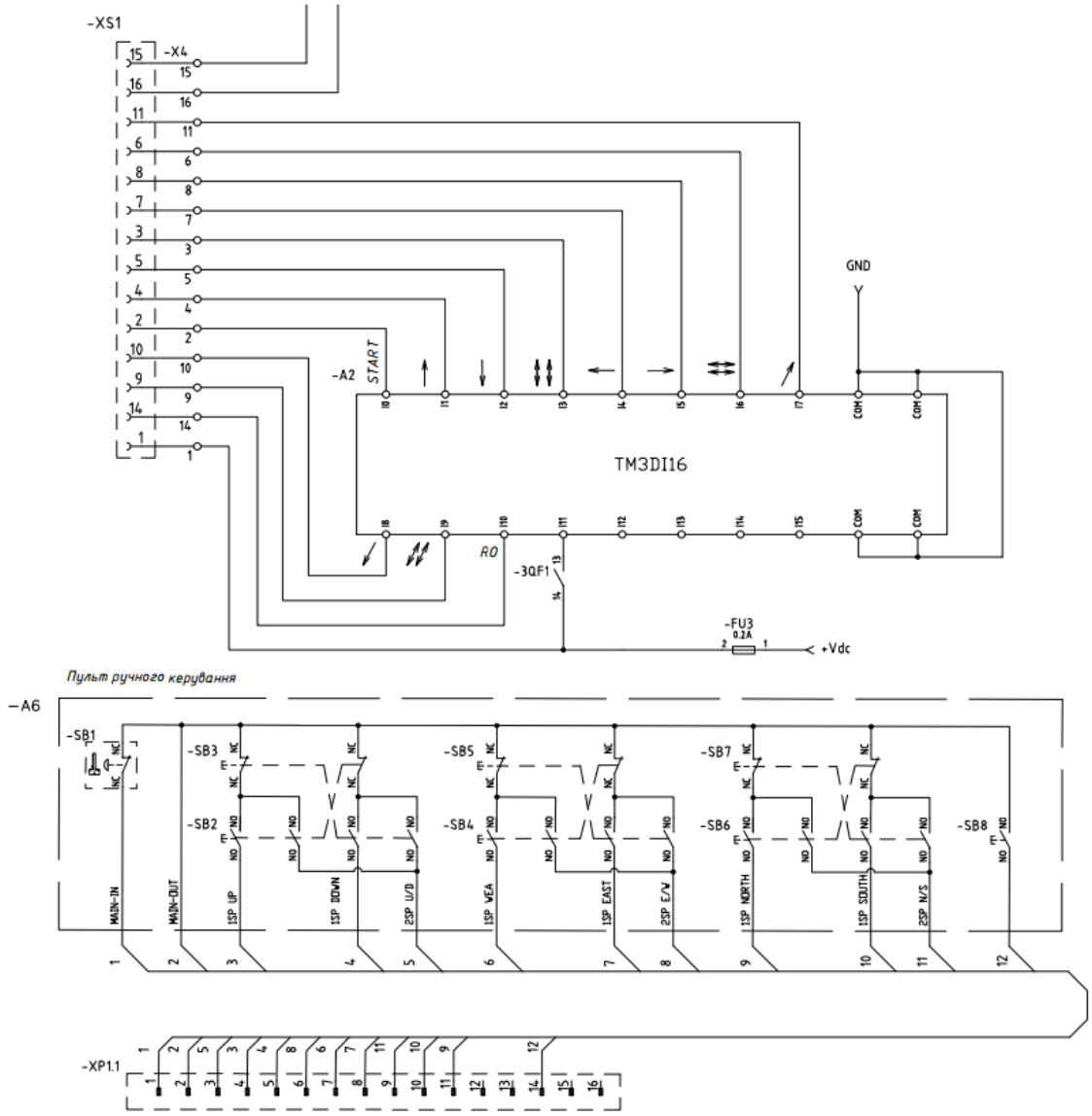

Рисунок 3.21 – Схема підключення блока дискретних входів та розключення виводів пульта ручного керування

На рисунку 3.22 зображено схему підключення ПЛК, енкодера, та кінцевих вимикачів обмеження пересування та підйому.

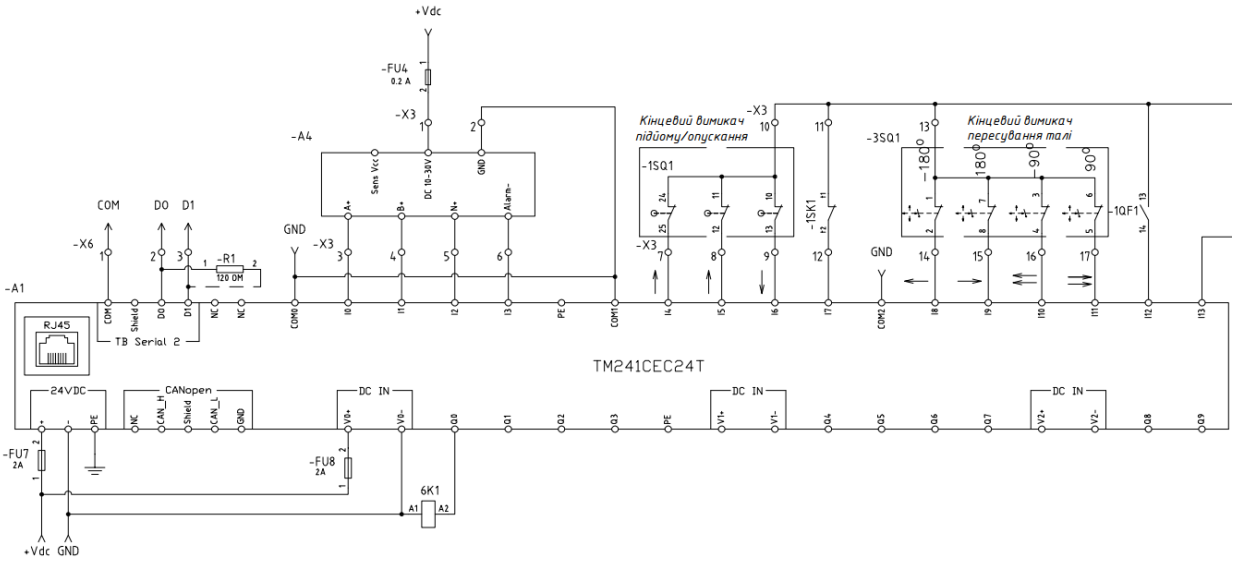

Рисунок 3.22 – Схема підключення блока дискретних входів та розключення виводів пульта ручного керування

На рис. 3.22, представлені ключові компоненти для керування механізмами підйому та пересування візка, а також для збирання та обробки даних для точної роботи системи.

Елементи схеми A1 – Програмований логічний контролер (ПЛК) TM241CEC24T. ПЛК забезпечує централізоване керування всіма механізмами та обробку сигналів від сенсорів і контролерів.

Підключення до інших елементів здійснюється через протокол Modbus RTU, що дозволяє забезпечити стабільну і надійну комунікацію між компонентами.

A4 – Енкодер RI 76TD 1024 енкодер використовується для вимірювання положення і швидкості руху механізмів підйому та пересування візка.

Він передає дані на ПЛК, що дозволяє точно визначати позицію вантажу і забезпечує необхідну компенсацію коливань під час підйому і пересування.

1SQ1 – Кінцевий вимикач обмеження підйому-опускання КИ-Г1:

Кінцевий вимикач використовується для визначення досягнення крайньої точки підйому або опускання механізму.

Це дозволяє уникнути перевантажень і забезпечити точне регулювання руху.

3SQ1 – Кінцевий вимикач обмеження пересування візка XCRK111:

Кінцевий вимикач для механізму пересування візка визначає досягнення крайньої точки пересування, запобігаючи пошкодженням або неконтрольованим рухом візка.

Протокол зв'язку. Зв'язок між програмованим логічним контролером (ПЛК) і частотними перетворювачами здійснюється через протокол Modbus RTU, що забезпечує:

– збір даних з енкодерів та кінцевих вимикачів;

– передачу команд для керування перетворювачами частоти та іншими елементами. Взаємодію між різними частинами системи в реальному часі;

Розробка програми керування. Програма керування є критичним компонентом для забезпечення правильної та безпечної роботи крана. Вона повинна включати. Основні функції керування: контроль роботи двигунів підйому і пересування візка, підтримка заданих швидкостей і напрямків руху

Функція компенсації коливань вантажу: алгоритм, який коригує рухи механізмів, щоб компенсувати небажані коливання вантажу, забезпечуючи плавність роботи.

Програма створюється у середовищі програмування, сумісному з ПЛК TM241CEC24T, що дозволяє здійснити налаштування і програмування логіки контролера. Після написання логіки програма завантажується в ПЛК, що дозволяє автоматично здійснювати контроль за роботою всієї системи.

Таким чином, схема та програма керування забезпечують точне і ефективне керування всіма механізмами, а також підтримку безпеки та зручності в експлуатації крана.

3.4 Розрахунок системи управління

Залежно від вимог, що висуваються до електроприводу лебідки, обмеження швидкості і моменту, що крутить, потрібні як з точки зору динаміки, так і з точки зору статики [15].

Це може забезпечити лише векторний контроль. Цей контроль досягає динамічних характеристик, близьких до двигуна постійного струму. Це досягається шляхом роздільного управління компонентами струму статора, що відповідають за момент та поле. Таким чином, точне управління моментом, що крутить, стає можливим.

Ми вибираємо векторну систему управління з непрямим регулюванням координат, яка програмно реалізована на основі мікроконтролера Simovert MD VectorControl, де інформація про вектори потокозчеплення АТ виходить непрямим чином на основі математичних моделей. У цьому випадку базова структура є керуючою структурою з непрямою орієнтацією вздовж вектора магнітного потоку ротора і модульним принципом структури системи управління.

Система має два основні канали управління: канал управління кутовою швидкістюωта канал управління модулем потокозчеплення ротора. Також система має 2 підлеглих їм внутрішніх контури регулювання складових струму статора I1x і I1y в осях x і y ортогональної системи координат, що обертається із синхронною швидкістюω_0електромагнітного поля двигуна

Для моделювання ланцюга необхідно знати величини індуктивності та опору ланцюга ротора та статора, а також індуктивність ланцюга намагнічування. Необхідні дані визначаємо нижче [22].

Швидкість обертання магнітного поля визначається виразом:

$$n_1 = \frac{60*f_1}{p} = \frac{60*50}{3} = 1000\,\frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (3.2)$$

де n_1 - номінальна частота мережі живлення, Гц.

Величина номінального ковзання обчислюється за такою формулою:

$$S_i = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000-990}{1000} = 0{,}01. \quad (3.3)$$

де S_i – номінальна швидкість двигуна, об/хв.

Номінальна кутова швидкість обертання ротора розраховується за такою формулою:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi*n_2}{30} = \frac{\pi*990}{30} = 103{,}67\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.4)$$

Кутова швидкість обертання магнітного поля:

$$\omega_1 = \frac{2*\pi*f_1}{p} = \frac{2*\pi*50}{3} = 104{,}72\,\frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.5)$$

Номінальний, максимальний та пусковий моменти визначаємо наступним чином:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = 2074\ \text{Нм}. \quad (3.6)$$

$$M_{\text{макс}} = m_{\text{макс}} * M_{\text{н}} = 2 * 2073{,}89 = 4148\ \text{Нм} \quad (3.7)$$

$$M_{\text{п}} = m_{\text{п}} * M_{\text{н}} = 1{,}6 * 2073{,}89 = 3318\ \text{Нм} \quad (3.8)$$

Критичне ковзання за формулою:

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{н}} * \left(m_{\text{макс}} + \sqrt{m_{\text{макс}}^2 - 1}\right) = \\ = 0{,}01 * \left(2 + \sqrt{2^2 - 1}\right) = 0{,}0373 \quad (3.9)$$

Механічні втрати рівні:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0{,}01 \div 0{,}05) * P_{\text{н}} = 0{,}011 * 215000 = 2365\ \text{Вт} \quad (3.10)$$

Коефіцієнт приведення:

$$C = 1{,}011.$$

Номінальну фазну напругу знаходимо за формулою:

$$U = \frac{U_н}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (3.11)$$

Приведений активний опір ротора дорівнює:

$$R_2 = \frac{1}{3} * \frac{(P_н + П_{мех})}{I_н^2 * \frac{1-S_н}{S_н}} = \frac{1}{3} * \frac{2365+215000}{380^2 * \frac{1-0{,}01}{0{,}01}} = 0{,}0051 \text{ Ом} \quad (3.12)$$

Розмір активного опору статора визначається:

$$R_1 = \frac{3}{2} * \frac{U^2 * (1-S_н)}{C * \left(1 + \frac{C}{S_{кр}}\right) * K_м * (P_н + \Delta P_{мех})} \quad (3.13)$$

Підставивши дані, отримаємо:

$$R_1 = \frac{3}{2} * \frac{220^2 * (1-0{,}01)}{C * \left(1 + \frac{1{,}011}{0{,}373}\right) * 2 * (215000+2365)} = 0{,}0087 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

Наведена індуктивність розсіювання ротора:

$$L_2 = \frac{U}{4 * \pi * f_1 * (1+C^2) * k_I * I_н} = \frac{220}{628{,}3 * (1+1{,}011^2) * 5{,}4 * 380} = 0{,}000103 \text{ Гн} \quad (3.15)$$

Індуктивність статора знайдемо за виразом:

$$L_1 = \frac{U}{2 * \pi * f_1 * I_н * \sqrt{1-(cos\varphi)^2} - \frac{2}{3} * \frac{2 * \pi * f_1 * M_{макс}}{p * U} * \frac{S_н}{S_{кр}}} \quad (3.16)$$

Підставимо потрібні значення та отримаємо:

$$L_1 = \frac{220}{2 * \pi * 50 * 380 * \sqrt{1-(0{,}88)^2} - \frac{2}{3} * \frac{2 * \pi * 50 * 4148}{3 * 220} * \frac{0{,}01}{0{,}0373}} = 0{,}0048 \text{ Гн} \quad .$$

Індуктивність контуру намагнічування розраховується так:

$$L_\mu = \frac{U}{2 * \pi * f_1 * I_н * \left(\sqrt{1-(cos\varphi)^2} - cos\varphi * \frac{S_н}{S_{кр}}\right)} \quad (3.17)$$

Підставляємо дані:

$$L_\mu = \frac{220}{2*\pi*50*380*\left(\sqrt{1-(0{,}88)^2}-0{,}88*\frac{0{,}01}{0{,}0373}\right)} = 0{,}0094 \text{ Гн} \quad .$$

Коефіцієнт приведення С1:

$$C_1 = 1 + \frac{L_2}{L_\mu} = 1 + \frac{0{,}000103}{0{,}0094} = 1{,}011 \qquad (3.18)$$

Порівнявши коефіцієнти наведення, переконуємось у тому, що коефіцієнт приведення підібраний правильно.

Векторне управління частотним керованим асинхронним електроприводом пов'язане як із зміною частоти та значень струму змінних асинхронного двигуна, так і відносною орієнтацією їх векторів у полярній або декартовій системі координат. Регулюючи значення амплітуди змінних та кутів між їхніми векторами, АТ повністю контролюється як у статистиці, так і в динаміці, що помітно покращує якість перехідних процесів порівняно зі скалярним контролем. Цей факт має вирішальне значення для вибору систем із векторним управлінням.

На рисунку 3.23 показано структурну схему системи ПЧ-АТ з управлінням по потокозчепленню ротора.

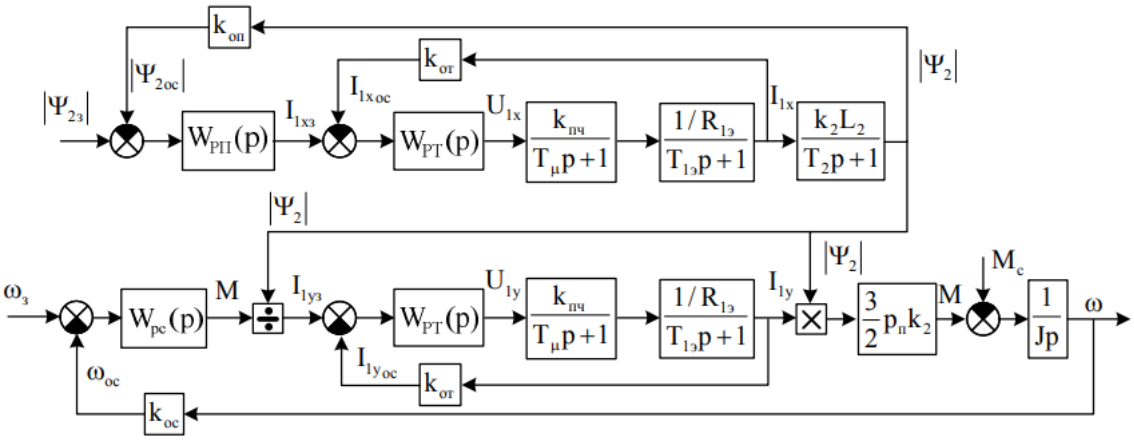

Рисунок 3.23 – Структурна схема системи ПЧ-АТ при орієнтації координат x,y по потоку зчеплення ротора.

Еквівалентний опір ланцюга статора розраховується так:

$$R_\text{e} = R_1 + R_2 = 0{,}0087 + 0{,}0051 = 0{,}0138 \text{ Ом} \qquad (3.19)$$

Електромагнітна постійна часу цього ланцюга:

$$T_\text{e} = \frac{L_1}{R_{1\text{e}}} = \frac{0{,}0048}{0{,}0138} = 0{,}346 \text{ с} \qquad (3.20)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку струму дорівнює:

$$K_{\text{от}} = \frac{10}{I_{\text{макс}}} = \frac{10}{2052} = 0{,}0049\,\frac{\text{В}}{\text{А}} \quad (3.21)$$

Постійна інтеграція часу:

$$T_{\text{ит}} = \frac{K_{\text{от}} * K_{\text{п}}}{R_{\text{е}}} * 2 * T_{\mu} = \frac{0{,}0049 * 22}{0{,}0138} * 2 * 0{,}001 = 0{,}019 \text{ с.} \quad (3.22)$$

де - Еквівалентний статичний коефіцієнт передачі;$K_{\text{п}} = 22$
Передатна функція регуляторів струму виглядає так:

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{T_{\text{е}}+1}{T_{\text{іт}}p} \quad (3.23)$$

Передаточна функція потокозчеплення представлена нижче:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{T_2+1}{T_{\text{ип}}p} \quad (3.24)$$

Електромагнітна постійна часу ланцюга ротора розраховується:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} * 2 * T_{\mu} = \frac{0{,}000103 * 2 * 0{,}001}{0{,}0051} = 0{,}0000407 \text{ с} \quad (3.25)$$

Постійна інтеграція ПІ-регулятора потокозчеплення ротора:

$$T_{\text{іп}} = \frac{4 * T_{\mu} * k_{\text{оп}} * k_2 * L_2}{k_{\text{от}}} \quad (3.26)$$

$$T_{\text{іп}} = \frac{4 * 0{,}001 * 0{,}518 * 91{,}3 * 0{,}000103}{0{,}049} = 0{,}0040 \text{ с.}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по потоку зчеплення:

$$k_{\text{оп}} = \frac{10}{\psi_{max}} = \frac{10}{19{,}3} = 0{,}518\ \frac{\text{В}}{\text{Вб}} \quad (3.27)$$

Максимальне потокозчеплення:

$$\psi_{max} = L_{\mu} * I_{max} = 0{,}0094 \cdot 2052 = 19{,}3 \text{ Вб} \quad (3.28)$$

При визначенні передавальної функції регулятора швидкості необхідно враховувати, що регулятор швидкості повинен компенсувати вплив робочого блоку формування електромагнітного моменту асинхронного двигуна. Для цього на виході РС повинен бути увімкнений дільник, аналогічний системам двофазного регулювання швидкості

двигунів постійного струму. У цьому випадку передатна функція регулятора швидкості виглядає так:

$$k_{\text{РС}} = \frac{2*J_S*k_{\text{от}}}{3*p_{\text{П}}*k_2*k_{\text{ОС}}*4*T_{\text{П}}} = \frac{2*33*0{,}0049}{3*3*91{,}3*0{,}065*4*0{,}001} = 1{,}01 \qquad (3.29)$$

де J_Σ- Сумарний момент інерції електроприводу, кг*м2;
kос - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, В·с.

$$k_{\text{ОС}} = \frac{10}{\omega_{max}} = \frac{10}{103{,}67} = 0{,}0965 \text{ В/с} \qquad (3.30)$$

Налаштування контуру регулювання швидкості на симетричний оптимум здійснюється за допомогою ПІ-регулятора швидкості з наступною функцією передачі:

$$W_{\text{РС}}(p) = k_{\text{РС}} * \frac{8*T_\mu p+1}{8*T_\mu p} = 1{,}01 * \frac{8*0{,}001p+1}{8*0{,}001p} \qquad (3.31)$$

Для надання сигналу завдання швидкості виду S-подібної характеристики, а також для зменшення перерегулювання по моменту, після блоку завдання швидкості встановлено фільтр.

3.6 Моделювання мехатронної системи

Щоб спростити моделювання, обробку та аналіз перехідних процесів, операція роботи мостового крана поділена на чотири характерні області:

- опускання траверси до точки закріплення ковша;
- підйом ковша з металом для подальшого переміщення;
- опускання порожнього ковша;
- підйом траверси до верхньої точки мостового крана.

Також для досягнення більшої наочності час статичних режимів роботи електроприводу було зменшено.Перехідні процеси представлені на рисунку 3.24.

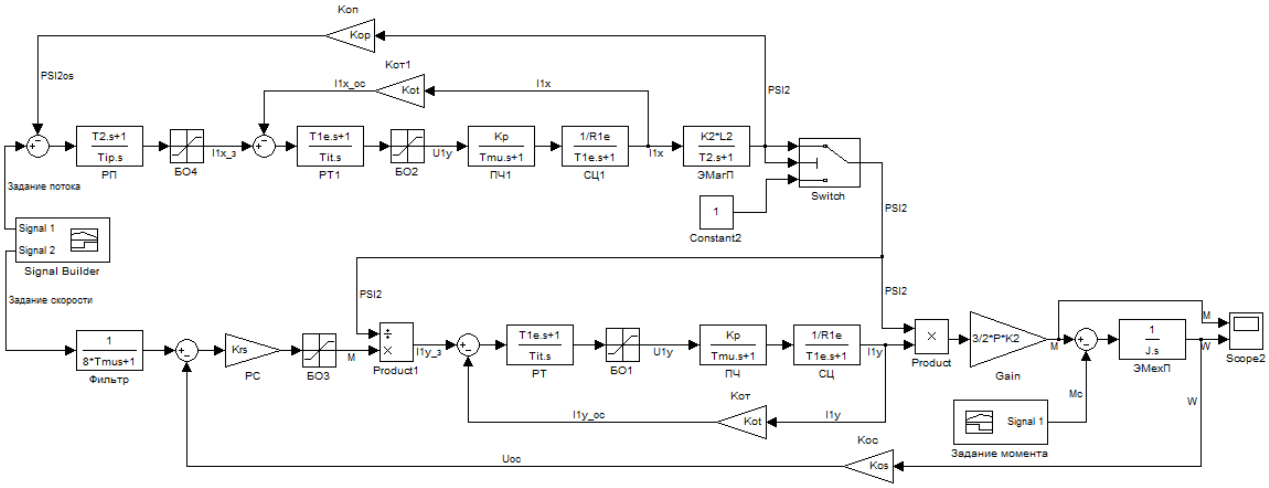

Рисунок 3.24 – Структурна схема системи ПЧ-АТ при орієнтації координат x,y по потокозчепленню ротора, реалізована [23]

3.7 Висновок за третім розділом

У цьому розділі виконано розрахунок і вибір необхідних компонентів для створення автоматизованої системи, а також розроблено схемотехнічні рішення та програмне забезпечення для програмованого логічного контролера.

Вибраний двигун і перевірив його по нагріванню та перевантажувальній здатності. Розрахований привод відповідає всім технологічним вимогам.

Розраховані та обрані перетворювач частоти та трансформатор.

Побудовано механічні характеристики електроприводу.

Вибрано необхідний захист силової схеми.

4 РОЗДІЛ З ЕКОНОМІКИ

4.1 Розрахунок витрат на модернізацію крану

Частотне регулювання ефективно використовується на підприємствах, в промисловості та комунальних господарствах [18], забезпечуючи наступні переваги:

– підвищений момент і точність роботи на дуже низьких швидкостях, а також покращені динамічні характеристики завдяки алгоритмам векторного управління потоком у розімкнутих або замкнутих системах приводу;

– розширений діапазон вихідної частоти для високошвидкісних двигунів;

– точність підтримки швидкості та енергозбереження для розімкнутих приводів із синхронними двигунами;

– плавне, безударне управління незбалансованими механізмами за допомогою систем адаптації потужності;

– можливість модернізації існуючих агрегатів без заміни основного устаткування і практично без зупинок у роботі. Метою техніко-економічного обґрунтування є визначення економічних показників від впровадження модернізації електропривода переміщення візка мостового крану. Суть технічного рішення полягає у заміні старої системи керування на перетворювач частоти. Впровадження частотного регулювання електроприводів (ЧРП) дозволяє:

– підвищити надійність роботи та ефективність системи в цілому;

– покращити точність регулювання;

– зекономити енергоресурси та енергію;

– автоматизувати виробничі процеси. Для обґрунтування економічної доцільності запропонованого технічного рішення в дипломному проекті необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити розмір капітальних витрат;

– розрахувати обсяг експлуатаційних витрат;

– оцінити та проаналізувати показники економічної ефективності від впровадження запропонованого рішення [21].

4.1.1 Розрахунок капітальних витрат

Для визначення капітальних витрат можна скористатися наступною формулою:

$$К_{пр} = К_{об}(\sum Ц_i) + З_{тзс} + З_м + З_н + З_i \qquad (4.1)$$

де $К_{об}(\sum Ц_i)$ - вартість придбання електроустаткування (електричний двигун та перетворювач), необхідного для реалізації прийнятого технічного рішення;

$З_{зс}$ - транспортно-заготівельні і складські витрати;

$З_м$ - витрати на монтажні витрати;
$З_н$ - витрати на налагоджувальні витрати;
$З_і$- інші одноразові вкладення грошових коштів.

Розрахунок капітальних витрат занесена до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Зведення капітальних витрат

№ п/п	Найменування технічних засобів (комплектуючих виробів)	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн.
1	Асинхронний двигун SIEMENS моделі 1MA8-317-6BD	1	47000	47000
2	Перетворювач частоти Altivar71 та гальмівний пристрій (у комплекті)	1	120300	120300
	ВСЬОГО			167300

Вартість транспортно-заготівельних та складських витрат (Зтзс) розраховується з урахуванням таких факторів:

- відстані доставки обладнання від місця покупки до місця його експлуатації;
- кількості, маси та розмірів обладнання;
- типу транспортних засобів, що використовуються для перевезення;
- тарифів на транспортування;
- вартості навантажувально-розвантажувальних робіт;
- витрат на складську обробку та зберігання.

Вартість перевезення обладнання з Польщі (місто Краків) до Дніпра враховується у загальній вартості електроустаткування.

Витрати на монтажні ($З_м$) та налагоджувальні роботи ($З_н$) можна обчислити наступним чином:

$$З_м = \sum(Ч_і * a_i * t_i) * к_д * к_{см} * к_і = \quad (4.2)$$
$$= 4 * 68{,}93 * 8 * 1{,}2 * 1{,}375 * 1{,}1 * 1500 = 5503 грн$$

$$З_н = \sum(Ч_і * a_i * t_i) * к_д * к_{см} * к_і = \quad (4.3)$$
$$= 2 * 68.93 * 8 * 1.2 * 1.375 * 1.1 * 1500 = 3501 грн$$

де Чі - чисельність працівників і -го розряду, необхідних для виконання певного об'єму монтажних (налагоджувальних) робіт, чол%;

аі - часова тарифна ставка 4-го розряду;

ti - час, необхідний для виконання певного об'єму монтажних (налагоджувальних) робіт, години;

Кд - коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

Ксм - коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальні заходи;

Кі - коефіцієнт, що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

Інші одноразові вкладення грошових коштів (Зі) можуть включати витрати на:

- демонтаж застарілого устаткування;
- проведення проектно-конструкторських робіт;
- підготовку персоналу;
- придбання готового програмного забезпечення.

Капітальні витрати:

$$\text{Кпр} = 124340 + 5503 + 3501 = 133\,345 \text{ грн.} \quad (4.4)$$

4.1.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати – це поточні витрати на експлуатацію та обслуговування об'єкта проектування за визначений період (зазвичай рік), виражені в грошовому еквіваленті.

Основними статтями експлуатаційних витрат для електротехнічного устаткування є:

1) амортизаційні відрахування ($С_а$);
2) заробітна плата обслуговуючого персоналу ($С_з$);
3) відрахування на соціальні заходи з заробітної плати ($С_с$);
4) витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт обладнання ($С_т$);
5) вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування ($С_е$);
6) інші експлуатаційні витрати ($С_і$).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати можна обчислити за наступною формулою:

$$С = С_а + С_з + С_т + С_е + С_і \quad (4.5)$$

Розрахунок експлуатаційних витрат ведеться по проектному і базовому варіанту паралельно.

4.1.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річний фонд амортизаційних відрахувань обчислюється як певний відсоток від суми капітальних витрат, що відносяться до різних видів основних засобів та нематеріальних активів. Цей відсоток визначається окремо для кожної категорії капітальних витрат в проектному варіанті, а також на основі даних підприємства щодо балансової вартості обладнання, що підлягає заміні, для базового варіанту.

Розрахунки амортизаційних відрахувань наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування показників	Капітальні витрати, грн.	Норма амортизації, %	Сума амортизації, грн.
Проектний варіант	133345	20	26669
Базовий варіант	126500	20	25300

Базова балансова вартість замінюваного устаткування узяті за даними відділу основних засобів підприємства, що складають 148500 грн.

4.1.4 Визначення річних витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні частини, оплату праці ремонтних робітників і можуть визначатися на основі фактичних даних підприємства.

Витрати на поточний ремонт апаратури автоматики та систем автоматизації розраховуються з урахуванням витрат на матеріали, запасні частини та заробітну плату працівників, що здійснюють ремонт. Ці витрати можуть бути визначені за фактичними даними підприємства або на основі оцінок середніх витрат на проведення ремонтних робіт в умовах конкретного виробництва та розраховуються за формулою:

$$З_{п.р.} = \sum R_i * T_i * m_i * R_{\Sigma i} + \frac{S*П}{Т_i} * Т_ф \qquad (4.6)$$

де: n - число пристроїв автоматики, що підлягають ремонту;

Ri - годинна ставка робочих, виконуючих ремонт, грн. (68,93 грн);

ti - трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю залежно від виду ремонту, год/од.: (середнього – 7 год)

mi - число ремонтів за рік;

R∑- сумарна категорія складності ремонту залежно від виду електроустаткування :

Асинхронні двигуни від 30 до 150 кВт – 2,5;

Si - вартість однотипних замінюваних елементів, грн.;

П- кількість однотипних замінюваних елементів;

Т- середній термін служби деталей цього типу, ч.;

Тф- число годин роботи апаратури в рік, ч.

$$Зпр. = 68{,}93 * 7 * 1 * 2{,}5 + \frac{213*3}{1600} * 1920 = 1973 \text{ грн.} \qquad (4.7)$$

$$Зпр. = 68{,}93 * 7 * 1 * 2{,}5 + \frac{456*4}{1000} * 1920 = 4708 \text{ грн.} \qquad (4.8)$$

4.1.5 Розрахунок вартості спожитої електроенергії

Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування впродовж року, визначається виходячи з його встановленої потужності і річного фонду робочого часу об'єкту проектування по формулі:

$$\text{С} = W\text{р} * \text{Це} \quad (4.9)$$

де: Wр - кількість спожитої за рік електроенергії, кВт·год.;
Це- тариф на електроенергію, грн./кВт·год.
2,02 грн./кВт год - вартість електроенергії для підприємств.
Кількість спожитої за рік електроенергії, кВт-год розраховуємо по формулі:

$$W\text{г.пр.} = td * th * tt * P\text{н} = \\ = 20 * 8 * 12 * 30 = 57600 \text{ кВт} * \text{год} \quad (4.10)$$

$$W\text{г.баз.} = td * th * tt * P\text{н} = \\ = 20 * 8 * 12 * 12 = 61440 \text{ кВт} * \text{год} \quad (4.11)$$

де: t_d - кількість робочих днів в місяць;
t_h - кількість робочих годин в зміну;
t_t - кількість місяців на рік;
Рн - потужність електродвигуна.

Вартість електроенергії:

$$C\text{е.пр} = W\text{р} * \text{Це} = 57600 * 2{,}02 = 116352 \text{ грн.} \quad (4.12)$$

$$C\text{е.баз} = W\text{р} * \text{Це} = 61440 * 2{,}02 = 124109 \text{ грн.} \quad (4.13)$$

Таким чином, річні експлуатаційні витрати у проектному варіанті:

$$\text{Спр} = \text{Са} + \text{Сс} + \text{Се} = 26669 + 1973 + 116352 = 144\,994 \text{ грн.}$$

Річні експлуатаційні витрати у базовому варіанті:

$$\text{Сб} = \text{Са} + \text{Сс} + \text{Се} = \\ = 25300 + 4708 + 124109 = 154\,117 \text{ грн.} \quad (4.14)$$

Повна річна економія від впровадження варіанту визначається:

$$\text{Е} = \Delta\text{П} + \Delta\text{С} = 12869 + 9\,124 = 21\,992 \text{ грн} \quad (4.15)$$

де : ΔП - повний річний прибуток;

ΔC - економія (перевитрата) на експлуатаційних витратах, знаходиться за формулою.

$$\Delta C = Сбаз - Спр = 154117 - 144994 = 9124 \text{ грн} \quad (4.16)$$

4.2 Розрахунок річного економічного ефекту

Оцінка економічної ефективності що розглядаються в дипломному проекті технічних і організаційних рішень здійснюється на основі визначення і аналізу наступних показників :

а) розрахункового коефіцієнта ефективності капітальних витрат Ер;

б) терміну окупності капітальних витрат Тр.

Коефіцієнт ефективності капітальних витрат Ер показує, скільки гривен додаткового прибутку приносить одна гривна капітальних витрат:

$$Ер = Е/К \quad (4.17)$$

де Е - загальна річна економія від впровадження об'єкту проектування, тисяч грн.;

К-капітальні витрати по варіанту, що викликали економію, тисяч грн..

Проект капітальних вкладень визнається доцільним за умови:

$$Ер > Ек \quad (4.18)$$

Результати техніко-економічного обґрунтування ефективності впровадження результатів дипломного проекту наведено у таблиці 7.

Таблиця 7 - Порівняльна оцінка техніко-економічних показників

№	Найменування	Од. виміру	Базовий варіант	Проектний варіант
1	Капітальні витрати	грн.	126500	133345
2	Експлуатаційні витрати	грн	124109	116352
3	Річна економія	грн		21992
4	Розрахунковий коефіцієнт	од.		0,17
5	Термін окупності	років		6
6	Вартість електроенергії	грн	124109	116352

4.3 Розрахунок терміну окупності

Термін окупності капіталовкладень $Т_р$ визначає, за який період часу вкладені кошти повернуться завдяки сукупній економії, досягнутій у результаті реалізації обраного варіанту.

$$Тр = К/Е = 133345/21992 = 6 \text{ років} \quad (4.19)$$

Річна економія, отримана внаслідок модернізації запропонованого обладнання, становить 21 992 гривні. Розрахунковий коефіцієнт ефективності дорівнює 0,17, а термін окупності капіталовкладень, згідно з розрахунками, складає 6 років.

ВИСНОВКИ

У роботі була успішно проведена модернізація системи електроприводу переміщення крана. Було підібрано сучасний електродвигун, що відповідає актуальним стандартам, а також частотний перетворювач.

У рамках проекту виконано розрахунок системи автоматичного керування електроприводом переміщення крана. Проаналізовано характеристики моменту, швидкості та магнітного потоку асинхронного двигуна під час виконання заданої тахограми руху.

В економічному розділі за результатами розрахунків встановлено ефективність технічного рішення щодо заміни старого електроприводу на новий, який відповідає сучасним стандартам регульованих електроприводів. Річна економія від модернізації обладнання становить 47 081,8 гривні, розрахунковий коефіцієнт ефективності дорівнює 0,37, а термін окупності капітальних вкладень складає 2,6 роки. Таким чином, доведено доцільність впровадження синтезованої системи автоматичного керування.

Аналітичний огляд виявив існуючі системи компенсації коливань вантажу у вантажопідіймальних кранах, їх переваги та недоліки. З огляду на результати аналізу підтверджено актуальність розробки автоматизованої системи компенсації коливань вантажу для підйомних кранів.

Для реалізації цієї системи здійснено розрахунок потужності двигуна пересування візка, а також перевірку його за критеріями нагріву і перевантажувальної здатності. Розроблено схемо-технічні рішення, підібрано необхідне обладнання для впровадження системи компенсації коливань вантажу. Дослідження показали, що використання системи компенсації значно зменшує величину коливань вантажу порівняно зі звичайним частотним керуванням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабко В. В., Левицький С. М. Електропривод підприємств АПК: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2012. 198 с.
2. Синявський О. Ю., Савченко П. І., Лавріненко Ю. М., Козирський В. В., Хондола Ю. М., Ільїчов І. П. Електропривод : навч. посіб. / за ред. О. Ю. Синявського. – Київ : Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
3. Електропривод: підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ: Ліра-К, 2009. 504 с.
4. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: підручник / за ред. Є. Л. Жулая. Київ: Вища освіта, 2001. 288 с.
5. Електропривод: підруч. для вузів. Ч. 1 / О. С. Марченко, Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, Є. Л. Жулай; за ред. О. С. Марченко. Київ: Урожай, 1995. 207 с.
6. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним корегуванням: навч. посіб. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2004. 312 с.
7. Щур І. З., Дробот І. М. Методичні вказівки до курсового проєктування з дисципліни "Електропривід" для студентів спеціальності "Енергетика сільськогосподарського виробництва". Львів, 2003. 53 с.
8. Чорний О. П., Луговий А. В., Родькін Д. Й., Сисук Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем: підручник. Кременчук, 2001. 410 с.
9. Лавріненко Ю. М., Синявський О. Ю., Савченко В. В. Основи електроприводу: підручник. Київ, 2010.
10. Півняк Г. Г., Волков О. В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією: монографія. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. 470 с.
11. Олійник В. С., Марченко О. С., Жулай Є. Л., Лавріненко Ю. М. Практикум з електропривода. Київ: Урожай, 1995. 190 с.
12. Перетворювачі частоти: основи вибору та підбору : веб-сайт. URL: https://ukrprommotor.com.ua/ru/blog/vidi-chastotnih-peretvoryuvachiv-ta-ih-zastosuvannya---oglyad-i-rekomendatsii (дата звернення: 05.12.2024).
13. Перетворювачі частоти Siemens Micromaster 440 : веб-сайт. URL: https://pe-ko.com.ua/micromaster_440_2015 (дата звернення: 05.12.2024).
14. Голубь А. П., Кузнецов Б. І., Опрішко І. А., Соляник В. П. Системи управління електроприводами / за ред. В. П. Соляника. Київ: УМК ВО, 1992. 376 с.
15. Герасимяк Р. П., Лещєв В. А. Аналіз і синтез кранових електромеханічних систем. Одеса: СМІЛ, 2008. 192 с.

16. Чан В. Т. Способи підвищення ефективності гасіння коливань металоконструкцій козлових кранів: автореф. дис. Одеський державний політехнічний університет, 1996. 17 с.
17. Зайцев В. С., Харланов О. В. Адаптивна система управління електроприводом вантажопідіймального механізму крана. Вісник Приазовського державного технічного університету, 2009. Вип. 19. С. 215–217.
18. Сладковський А., Ханішевський Т., Матия Т. Динаміка мостового крана. Частина 2. Моделювання процесу підйому вантажу з постійною швидкістю. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2010. № 10, частина 2. С. 168–177.
19. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Класифікація критеріїв оптимізації режимів руху вантажопідіймальних машин. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки, 2012. Вип. 124, Т. 2. С. 292–302.
20. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. **Аналіз та синтез режимів руху механізмів

ДОДАТОК А ПІДКЛЮЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

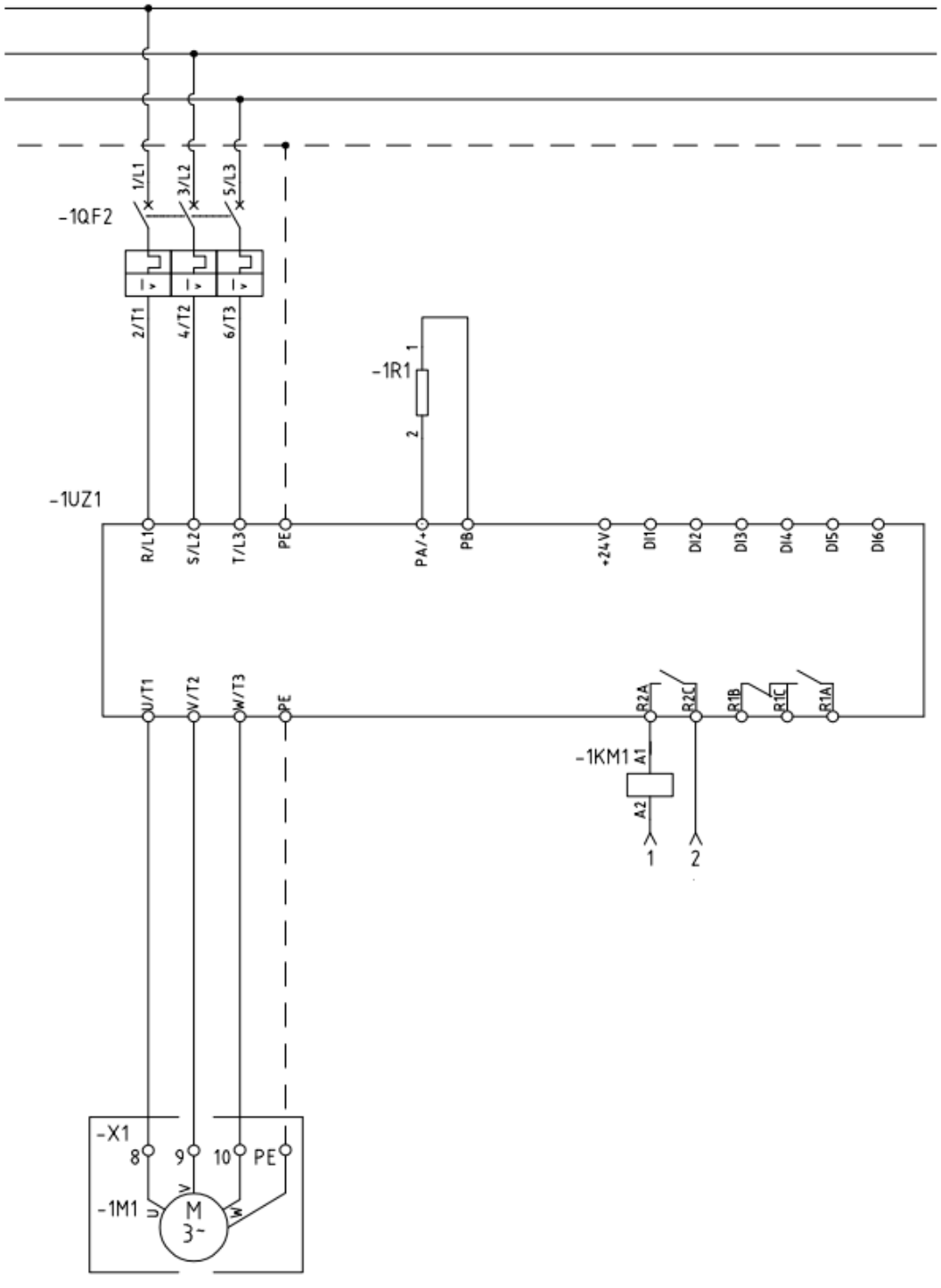

Рисунок А.1 - Схема підключення частотного перетворювача механізму підйому

ДОДАТОК Б ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГАЛЬМА МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ

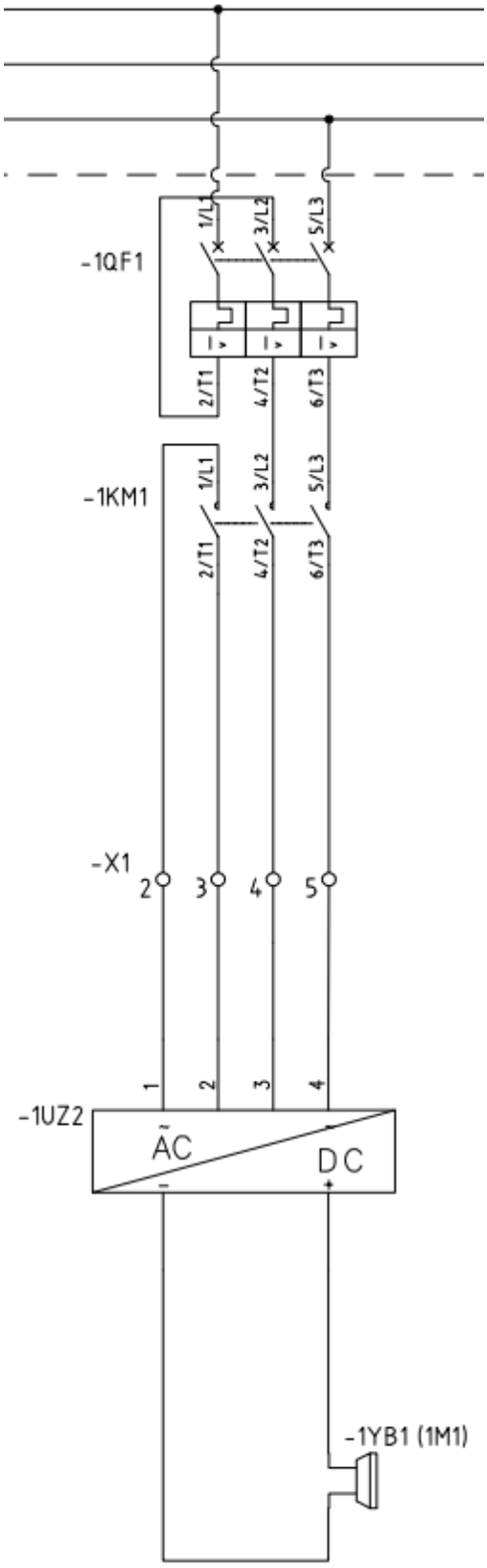

Рисунок Б.1 – Схема підключення електромагнітного гальма механізму підйому

ДОДАТОК С ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГАЛЬМА ПЕРЕСУВАННЯ ВІЗКА

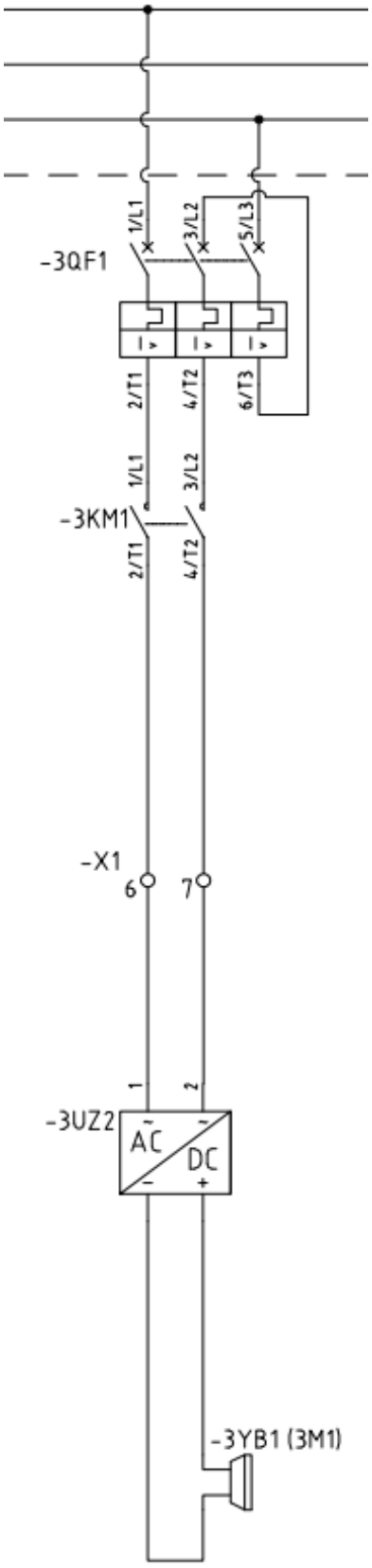

Рисунок С.1 – Схема підключення електромагнітного гальма механізму пересування візка

ДОДАТОК Д ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

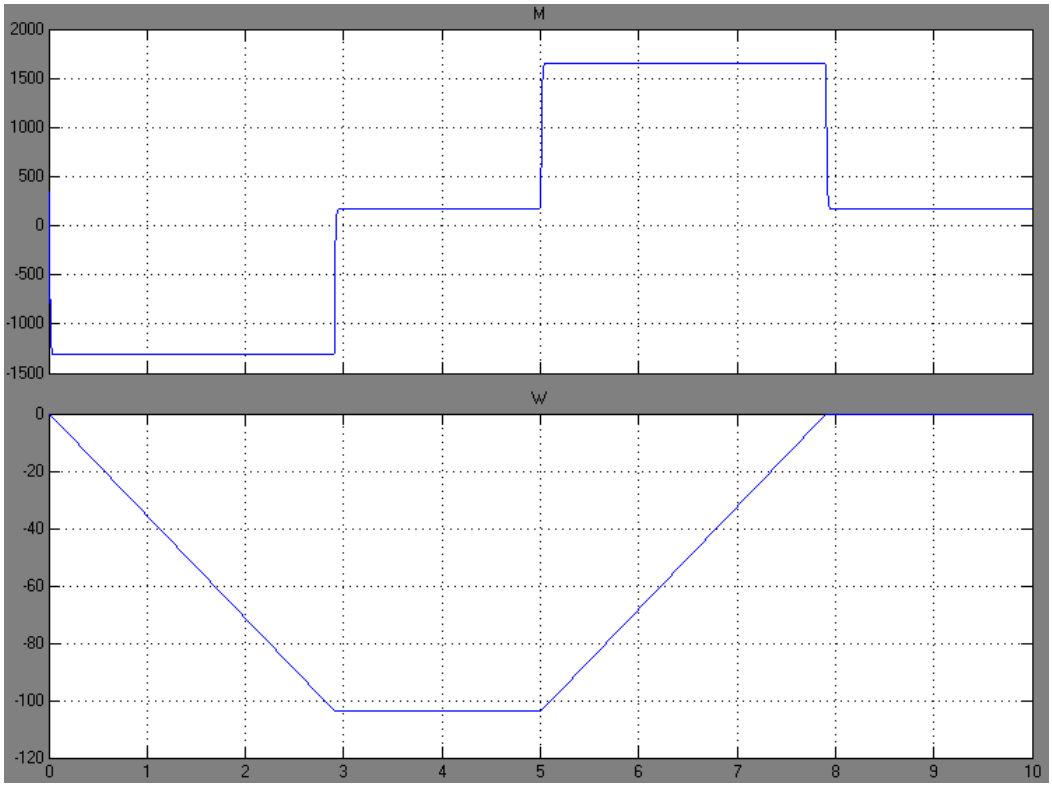

Рисунок Д.1 - Перехідні процеси моменту та швидкості двигуна при опусканні траверси

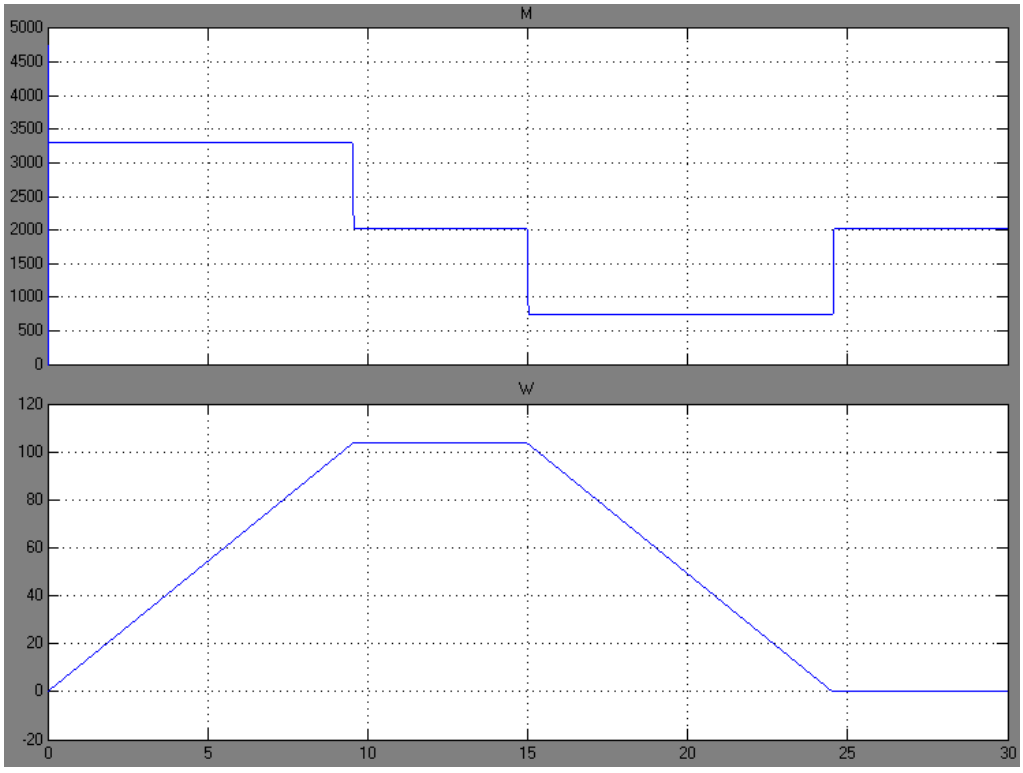

Рисунок Д.2 - Перехідні процеси моменту та швидкості двигуна під час підйому ковша з металом

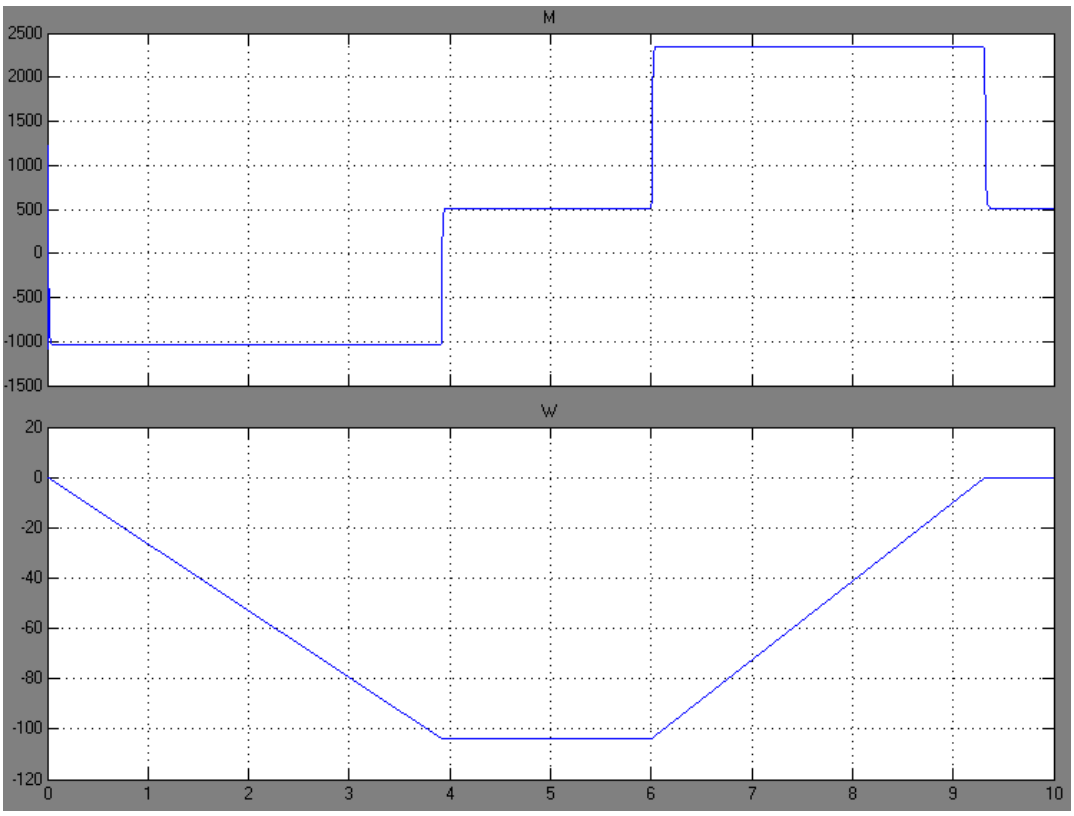

Рисунок Д.3 - Перехідні процеси моменту та швидкості двигуна при опусканні ковша

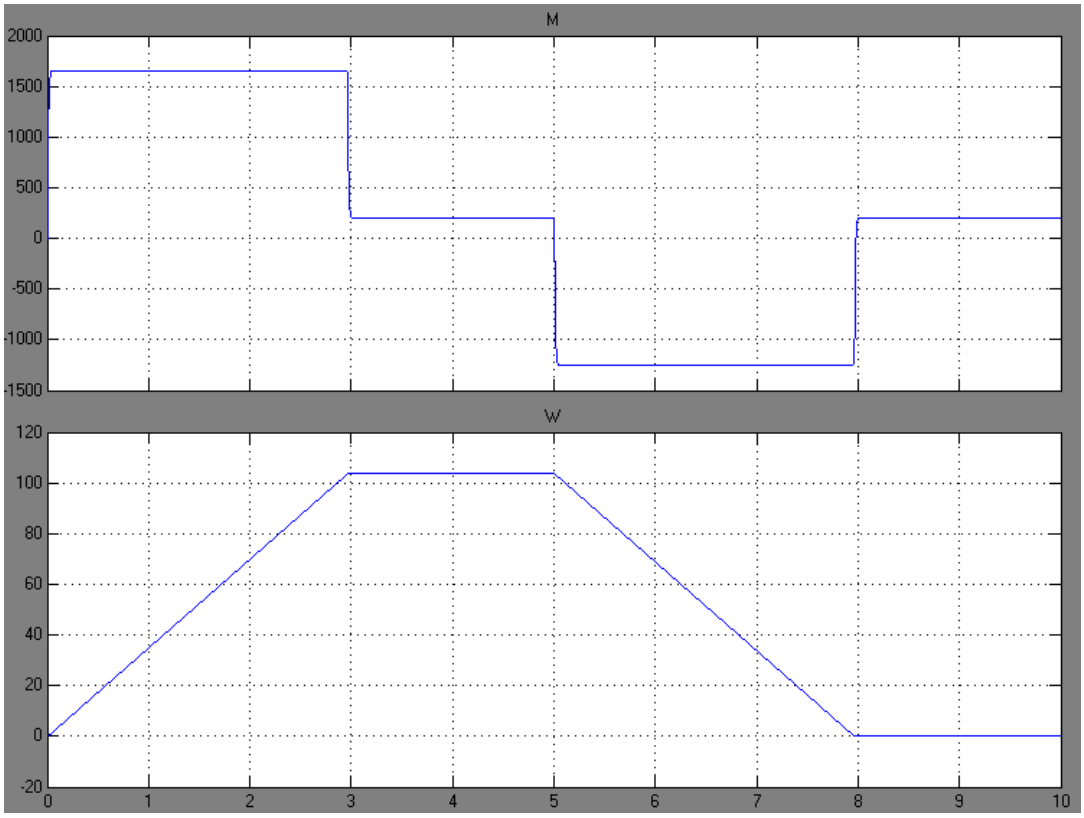

Рисунок Д.4 - Перехідні процеси моменту та швидкості двигуна під час підйому траверси