МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАОЧНОЇ ФОРМИ ЗДОБУТТЯ ОСВІТИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Аналіз роботи та підвищення ефективності електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 т

Виконав: студент 4 курсу
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
С.С. Богомолов
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Воляр Р.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент к.т.н., доц., Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут заочної форми здобуття освіти
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
В. О.
Завідувач кафедри
к.т.н., доц. Д.М. Морозов
«_____» _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Богомолов Станіслав Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)
Тема роботи: Аналіз роботи та підвищення ефективності електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 т
керівник роботи Воляр Р.М., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від « 23 » 12 2025 року № 1833 - с
1 Строк подання студентом роботи 20 травня 2026 р.
2 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана 2) Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана 3) Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) схема до реконструкції; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п'ять ступенів

3 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Воляр Р.М., к.т.н., доц.		
Розділ 2	Воляр Р.М., к.т.н., доц.		
Розділ 3	Воляр Р.М., к.т.н., доц.		

4 Дата видачі завдання 25.12.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана	10.03.2026	
2	Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана	10.04.2026	
3	Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран	15.05.2026	

Студент _____ _____ С.С. Богомолов
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ _____ Воляр Р.М.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Богомолов Станіслав Сергійович: Тема роботи: Аналіз роботи та підвищення ефективності електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 т

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник к.т.н., доц., Воляр Р.М.,. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні заочної форми здобуття освіти. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання реконструкції системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана шляхом модернізації існуючої релейно-контакторної системи керування та впровадження програмованого логічного контролера SIMATIC S7-200. Основну увагу приділено підвищенню надійності, безпеки та ефективності роботи електропривода в умовах інтенсивної експлуатації.

У роботі виконано аналіз технологічного процесу роботи мостового крана, досліджено особливості функціонування механізму підйому та наведено характеристику основного електрообладнання. Проаналізовано принцип роботи асинхронного двигуна з фазним ротором та існуючої системи реостатного регулювання швидкості. Встановлено, що використання релейно-контакторної апаратури призводить до зниження надійності системи, збільшення витрат на технічне обслуговування та погіршення умов експлуатації обладнання.

У процесі дослідження було виконано розрахунок потужності приводного двигуна, проведено перевірку електродвигуна за тепловим режимом і умовами пуску, а також обґрунтовано вибір асинхронного двигуна потужністю 30 кВт.

Розроблено технічне рішення щодо реконструкції системи керування із застосуванням програмованого логічного контролера та джойстикового командоконтролера, що забезпечує підвищення точності керування, плавності пуску та гальмування, а також покращення ергономічних характеристик робочого місця оператора.

Особливу увагу приділено питанням охорони праці та безпеки виробничого середовища. Проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, що виникають під час експлуатації кранового обладнання, зокрема підвищений рівень шуму, вібрації, запиленості та вплив електричного струму. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на підвищення безпеки праці персоналу та забезпечення надійної роботи електрообладнання.

У результаті виконаної реконструкції досягнуто підвищення надійності системи керування електроприводом, зменшення кількості електромеханічних елементів у схемі, покращення умов експлуатації та зниження витрат на обслуговування обладнання. Використання сучасних засобів автоматизації дозволило забезпечити більш ефективну та стабільну роботу механізму підйому мостового крана.

Мета дослідження: підвищення ефективності та надійності системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана шляхом модернізації релейно-контакторної схеми та впровадження програмованого логічного контролера.

Об’єкт дослідження: електропривод механізму підйому мостового крана.

Предмет дослідження: процеси керування асинхронним електроприводом з фазним ротором у системі підйому мостового крана.

Методи дослідження:аналіз технологічних процесів, методи теорії електропривода, розрахунок електромеханічних параметрів, методи математичного моделювання, технічний аналіз систем автоматизації та програмованих логічних контролерів.

Задачі дослідження:

Провести аналіз технологічного процесу роботи механізму підйому мостового крана та особливостей його електропривода.

Дослідити існуючу систему керування асинхронним двигуном з фазним ротором та визначити її основні недоліки.

Виконати розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна механізму підйому.

Провести перевірку електродвигуна за тепловим режимом і умовами пуску.

Розробити технічне рішення щодо реконструкції системи керування електроприводом із використанням програмованого логічного контролера SIMATIC S7-200.

Обґрунтувати вибір сучасних засобів автоматизації та елементів керування електроприводом.

Дослідити можливості підвищення надійності, безпеки та ефективності роботи електропривода шляхом заміни релейно-контакторної апаратури на безконтактні елементи.

Проаналізувати умови праці та небезпечні виробничі фактори при експлуатації кранового обладнання.

Розробити заходи з охорони праці та електробезпеки для забезпечення безпечної експлуатації електропривода мостового крана.

Ключові слова: електропривод, мостовий кран, механізм підйому, асинхронний двигун, фазний ротор, програмований логічний контролер, SIMATIC S7-200, автоматизація, система керування, релейно-контакторна схема, реконструкція, джойстиковий контролер, електромеханічна система, охорона праці.

ABSTRACT

Bogomolov Stanislav Serhiiovych: Thesis topic: Analysis of Operation and Improvement of the Efficiency of the Electric Drive of the Hoisting Mechanism of a 10-Ton Bridge Crane

Bachelor's qualification thesis submitted for obtaining the higher education degree in specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", supervised by PhD in Engineering, Associate Professor R.M. Volyar. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, part-time form of education, 2026.

The qualification thesis addresses the issue of reconstruction of the control system for the electric drive of the hoisting mechanism of a bridge crane through modernization of the existing relay-contactor control system and implementation of the SIMATIC S7-200 programmable logic controller. The main attention is focused on improving the reliability, safety, and efficiency of the electric drive under conditions of intensive operation.

The thesis includes an analysis of the technological process of bridge crane operation, investigates the operating features of the hoisting mechanism, and presents the characteristics of the main electrical equipment. The operating principle of a wound-rotor induction motor and the existing rheostatic speed control system were analyzed. It was established that the use of relay-contactor equipment leads to reduced system reliability, increased maintenance costs, and deterioration of equipment operating conditions.

During the research, the power calculation of the drive motor was carried out, the electric motor was checked according to thermal conditions and starting modes, and the selection of a 30 kW induction motor was substantiated. A technical solution for the reconstruction of the control system using a programmable logic controller and a

joystick command controller was developed, ensuring improved control accuracy, smoother starting and braking processes, and enhanced ergonomic characteristics of the operator's workplace.

Special attention was paid to occupational safety and industrial environment safety issues. Hazardous and harmful factors arising during crane equipment operation, including increased noise, vibration, dust concentration, and electric current exposure, were analyzed. A set of organizational and technical measures aimed at improving personnel safety and ensuring reliable operation of electrical equipment was proposed.

As a result of the completed reconstruction, the reliability of the electric drive control system was improved, the number of electromechanical elements in the circuit was reduced, operating conditions were enhanced, and maintenance costs were lowered. The use of modern automation tools ensured more efficient and stable operation of the bridge crane hoisting mechanism.

Research objective: to improve the efficiency and reliability of the control system of the electric drive of the bridge crane hoisting mechanism by modernizing the relay-contactor circuit and implementing a programmable logic controller.

Object of research:the electric drive of the bridge crane hoisting mechanism.

Subject of research:control processes of a wound-rotor induction electric drive in the bridge crane hoisting system.

Research methods:analysis of technological processes, methods of electric drive theory, calculation of electromechanical parameters, methods of mathematical modeling, technical analysis of automation systems and programmable logic controllers.

Research tasks:

To analyze the technological process of the bridge crane hoisting mechanism operation and the features of its electric drive.

To investigate the existing control system of the wound-rotor induction motor and determine its main disadvantages.

To perform power calculation and selection of the drive motor for the hoisting mechanism.

To verify the electric motor according to thermal operating conditions and starting modes.

To develop a technical solution for reconstruction of the electric drive control system using the SIMATIC S7-200 programmable logic controller.

To substantiate the selection of modern automation tools and electric drive control elements.

To investigate possibilities for improving the reliability, safety, and efficiency of the electric drive by replacing relay-contactor equipment with contactless elements.

To analyze working conditions and hazardous industrial factors during crane equipment operation.

To develop occupational safety and electrical safety measures for safe operation of the bridge crane electric drive.

Keywords: electric drive, bridge crane, hoisting mechanism, induction motor, wound rotor, programmable logic controller, SIMATIC S7-200, automation, control system, relay-contactor circuit, reconstruction, joystick controller, electromechanical system, occupational safety.

ЗМІСТ

ВСТУП……....12
1 Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана 17
1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму підйому мостового крану ……....17
1.2 Характеристика обладнання мостового крану, електропривод механізму підйому якого реконструюється, за схемами…….....20
1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана ……....20
1.2.1.1 Механізм пересування моста……....20
1.2.1.2 Механізм пересування візка……..20
1.2.1.3 Механізм підйому……...21
1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану ……....21
1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму підйому мостового крану та формування вихідних даних…….....24
2. Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана 26
2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна…….....26
2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні…….....30
2.2.1 Мета реконструкції…….....30
2.2.2 Початкова релейно-контактна схема і вимоги до реконструкції…..33
2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції……....35
2.2.3.1 Програмований логічний контролер (ПЛК)…….....35
2.2.3.2 Джойстик …….37
2.2.3.3 Релейно-контакторна апаратура……....41
2.2.3.3.1 Лінійний контактор ……41
2.2.3.3.2 Привод пересування моста…….43
2.2.3.3.3 Привод пересування візка……43
2.2.3.3.4 Привод механізму підйому……44

2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода…….....44
2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором …….....44
2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів …….....46
2.4 Розрахунок надійності систем керування електроприводом ……....52
3. Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран.....58
3.1 Охорона праці……...58
3.1.1 Загальна характеристика умов праці……...58.
3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……....61
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ……64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ…….65
Додаток А. Схема електрична принципова електропривода механізму підйому мостового крана до реконструкції……...69
Додаток Б. Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів ……70
Додаток В. Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів…….71
Додаток Г. Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна …..72

ВСТУП

Енергоємність систем вантажопереробки набуває дедалі більшого значення через зростання вартості енергії, політику декарбонізації та необхідність підвищення ефективності внутрішньологістичних об’єктів.

Хоча стандартизовані процедури випробувань для визначення енергоємності промислових навантажувачів уже існують, а відповідні дані публікуються в технічних характеристиках обладнання, подібні методики для складських кранів (мостових кранів), які використовуються для переміщення великогабаритних вантажів, відсутні. До таких вантажів зазвичай належать металеві листи (плоскі або рулонні), сталеві профілі чи коробки. У подібних випадках немає встановлених методів оцінювання енергоємності, які дозволяли б складам визначати, чи досягають вони пасивного або енергетично-позитивного рівня функціонування.

Експлуатаційні та сервісні параметри кранів аналізуються переважно з точки зору їх класифікації та вимог технічного нагляду. Проте ці нормативи не враховують показники енергоємності, а отже не сприяють досягненню зазначених рівнів енергетичної ефективності у складських операціях.

Наукова література, присвячена енергоємності кранів, є досить обширною та охоплює різні типи і конфігурації кранового обладнання. У публікаціях простежується чітка спеціалізація залежно від таких аспектів, як конструкція кранів, їх впровадження, експлуатація та оптимізація.

Мостові крани, які застосовуються у внутрішньологістичних системах, належать до групи вантажопідіймального обладнання, призначеного для переміщення вантажів уздовж трьох координатних осей:

– переміщення моста крана (вісь X);

– переміщення візка (вісь Y);

– підйом та опускання вантажу (вісь Z).

Типова конструкція крана складається з двох підкранових колій (розташованих або у верхній частині складу, або на рівні підлоги), мостової конструкції, візка з підіймальним механізмом та, залежно від призначення, захоплювача або гака. На практиці використовуються електроприводи змінного струму (АС), дедалі частіше оснащені системами рекуперації енергії.

У межах внутрішньологістичних систем крани обробляють важкі та великогабаритні пакетовані вантажі, такі як металеві листи, прутки, сталеві рулони та великі коробки на котушках. На відміну від навантажувачів, вони не пересуваються вільно по складу, а працюють у визначених зонах — над підлоговими місцями зберігання та в логічно визначених зонах передачі вантажів у системі WMS, включаючи зони навантаження «підлога–вантажівка».

Енергоємність мостових кранів залежить від багатьох факторів, серед яких:

– тип та конфігурація приводів;

– частота робочих циклів;

– маса та форма вантажу;

– динаміка руху;

– застосовані системи рекуперації енергії;

– локальні умови експлуатації (наприклад, стратегії WMS або способи електроживлення).

Попри значний внесок кранів у загальне енергоспоживання важкої промисловості, для них не існує єдиного стандарту оцінювання енергоємності. Також відсутні узгоджені питомі показники (наприклад, витрати енергії на одну тонну переміщеного вантажу), які дозволяли б об’єктивно порівнювати рішення різних виробників.

Стандарти, такі як класи експлуатації A1–A8 та M1–M8, є корисними для вибору механічних компонентів крана, проте вони не відображають

фактичного енергоспоживання чи потенціалу рекуперації енергії, що обмежує їх аналітичну цінність.

Отже, знання рівня енергоємності крана є надзвичайно важливим, особливо на етапах попереднього проєктування та оптимізації. Це дозволяє усунути раніше існуючу проблему, коли показники енергоємності ставали відомими лише після введення крана в експлуатацію, коли можливості зміни його параметрів уже були практично вичерпані.

Кожен кран характеризується певними параметрами, зафіксованими у документації виробника. До основних належать:

– номінальна вантажопідйомність;

– висота підйому;

– швидкість підйому та опускання;

– швидкість переміщення візка;

– проліт крана (відстань між осями рейок мостової конструкції).

Підйомні крани різної конструкції і призначення є найбільш характерними установками, основні робочі процеси яких здійснюються типовими загальнопромисловими механізмами — підйомними лебідками, механізмами пересування і механізмами повороту. Як правило, підйомні крани мають неавтоматизований робочий цикл, який на всіх ділянках здійснюється за командою оператора. Таким чином, механізми кранів є типовими позиційними механізмами з ручним керуванням.

Разом з тим масовість застосування і вельми важкі умови роботи електроприводів механізмів кранів вимагають простоти їх експлуатації і високої надійності роботи. Керування швидкістю електроприводу повинне здійснюватися при накладених на прискорення, струму і моменту. Робочі швидкості основних механізмів більшості кранів такі, що при нормованих допустимих середніх прискореннях сумарний час перехідних процесів складає невелику частку загального часу циклу. При цій умові регулювання моменту і відповідний характер перехідних процесів на продуктивність крана істотного впливу не викликає.

Основним недоліком схеми керування електроприводами мостового крана механізму підйому є релейно–контакторна апаратура. Система керування з контакторними апаратами є складною, громіздкою, а також недостатньо надійною. Різко зростають витрати часу на ремонт обладнання, а також на обслуговування [1].

Темою даної роботи є: «Аналіз роботи та підвищення ефективності електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 т» шляхом заміни релейно–контактних елементів системи керування АД з фазним ротором з реостатним регулюванням безконтактними, що дозволить значно підвищити надійність даного механізму.

Мета дослідження: підвищення ефективності та надійності системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана шляхом модернізації релейно-контакторної схеми та впровадження програмованого логічного контролера.

Об’єкт дослідження: електропривод механізму підйому мостового крана.

Предмет дослідження: процеси керування асинхронним електроприводом з фазним ротором у системі підйому мостового крана.

Методи дослідження:аналіз технологічних процесів, методи теорії електропривода, розрахунок електромеханічних параметрів, методи математичного моделювання, технічний аналіз систем автоматизації та програмованих логічних контролерів.

Задачі дослідження:

Провести аналіз технологічного процесу роботи механізму підйому мостового крана та особливостей його електропривода.

Дослідити існуючу систему керування асинхронним двигуном з фазним ротором та визначити її основні недоліки.

Виконати розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна механізму підйому.

Провести перевірку електродвигуна за тепловим режимом і умовами пуску.

Розробити технічне рішення щодо реконструкції системи керування електроприводом із використанням програмованого логічного контролера SIMATIC S7-200.

Обґрунтувати вибір сучасних засобів автоматизації та елементів керування електроприводом.

Дослідити можливості підвищення надійності, безпеки та ефективності роботи електропривода шляхом заміни релейно-контакторної апаратури на безконтактні елементи.

Проаналізувати умови праці та небезпечні виробничі фактори при експлуатації кранового обладнання.

Розробити заходи з охорони праці та електробезпеки для забезпечення безпечної експлуатації електропривода мостового крана.

1 Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана

1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму підйому мостового крану

Мостовий кран вантажопідйомністю 10 т є одним із ключових елементів підйомно-транспортного обладнання, що забезпечує безперервність виробничих процесів у цехах металопрокатки. Його основне призначення полягає у виконанні операцій з підйому, транспортування та точного позиціонування різноманітних вантажів у межах виробничого приміщення. Такі крани широко застосовуються у металургійній промисловості, машинобудуванні, складських комплексах та інших галузях важкої індустрії, де виникає необхідність у швидкому й безпечному переміщенні великогабаритних або масивних деталей, металевих заготовок, рулонів сталі, елементів конструкцій та допоміжного технологічного оснащення.

Робота мостового крана здійснюється в умовах критих виробничих приміщень, де технологічний процес супроводжується значними механічними навантаженнями, підвищеним рівнем запиленості, вібраціями та температурними коливаннями. Обладнання розраховане на експлуатацію при температурі навколишнього середовища від +40°С до –40°С, що свідчить про його здатність функціонувати як у жарких виробничих умовах, так і в неопалюваних приміщеннях або під час сезонних температурних перепадів. У цехах металопрокатки мостовий кран постійно зазнає впливу агресивного виробничого середовища: металевого пилу, окалини, підвищеної вологості та теплового випромінювання від нагрітих заготовок. Саме тому до конструкції крана, його електропривода та системи керування висуваються підвищені вимоги щодо надійності, міцності та довговічності.

Конструктивно мостовий кран складається з металевого мосту, який переміщується по підкранових коліях уздовж цеху, вантажного візка, що рухається по мосту, а також механізму підйому вантажу. Усі ці механізми

працюють узгоджено, забезпечуючи виконання складних транспортних операцій у межах виробничого циклу. Особливе значення має механізм підйому, оскільки саме він відповідає за безпечне переміщення вантажу у вертикальному напрямку. Від точності та плавності його роботи залежить не лише продуктивність праці, але й безпека персоналу та цілісність обладнання.

У процесі роботи мостовий кран виконує велику кількість повторюваних операцій. Це обумовлює циклічний характер його функціонування. Кожний цикл роботи включає декілька основних етапів: захоплення вантажу, його підйом, горизонтальне транспортування, опускання та звільнення вантажу. Після завершення одного циклу процес повторюється знову. Такий режим роботи створює значні навантаження на електропривод та механічні вузли крана, оскільки двигуни постійно переходять із режиму спокою до режиму пуску, а потім до гальмування.

Кожний процес руху мостового крана можна умовно розділити на декілька характерних періодів. Першим етапом є розгін механізму, під час якого електропривод забезпечує прискорення руху до необхідної швидкості. Саме в цей момент у системі виникають найбільші пускові струми та динамічні навантаження. Плавність розгону має надзвичайно важливе значення, оскільки різкі ривки можуть спричинити коливання вантажу, перевантаження металоконструкцій та прискорений знос механічних елементів.

Після завершення розгону настає період усталеного руху, коли механізм працює зі сталою швидкістю. У цьому режимі електропривод підтримує стабільні параметри роботи, забезпечуючи рівномірне переміщення вантажу без ривків та коливань. Саме під час усталеного руху досягається найбільш ефективне використання потужності двигуна та забезпечується оптимальна продуктивність крана.

Завершальним етапом циклу є уповільнення та гальмування механізму. На цій стадії швидкість руху поступово зменшується до повної зупинки. Від правильності процесу гальмування залежить точність позиціонування вантажу та безпечність виконання операції. Надмірно різке гальмування

може призвести до розгойдування вантажу, виникнення ударних навантажень і пошкодження елементів механізму. Саме тому сучасні системи керування мостовими кранами передбачають використання плавного регулювання швидкості та автоматизованих алгоритмів управління.

Умови експлуатації мостового крана в цеху металопрокатки характеризуються високою інтенсивністю роботи. Протягом зміни кран може виконувати сотні робочих циклів, що створює значне теплове та механічне навантаження на електродвигуни, редуктори, гальмівні системи та струмопідвідні елементи. Особливо складними є режими пуску й реверсування, коли двигуни споживають великі струми, а механічні вузли зазнають динамічних перевантажень. У зв’язку з цим важливим напрямком модернізації таких кранів є впровадження частотно-регульованого електропривода, який дозволяє забезпечити плавний пуск, зменшити пускові струми, підвищити енергоефективність та продовжити термін служби обладнання.

Застосування сучасних систем автоматизованого керування дає можливість не лише покращити технічні характеристики мостового крана, але й значно підвищити рівень безпеки праці. Системи захисту контролюють перевантаження, температуру двигунів, стан гальмівних механізмів та інші параметри роботи обладнання. У разі виникнення аварійної ситуації система автоматично зупиняє роботу крана, запобігаючи пошкодженню механізмів і виникненню небезпечних ситуацій для персоналу.

Таким чином, мостовий кран вантажопідйомністю 10 т є складним електромеханічним комплексом, який працює у важких умовах металопрокатного виробництва та виконує відповідальні транспортно-технологічні операції. Циклічний режим його роботи, наявність періодів розгону, усталеного руху та гальмування створюють підвищені вимоги до системи електропривода, механічної частини та системи керування. Ефективність роботи крана значною мірою залежить від правильного вибору технічних рішень, які забезпечують плавність руху, надійність роботи, енергоефективність та безпечність експлуатації обладнання.

1.2 Характеристика обладнання мостового крану, електропривод механізму підйому якого реконструюється, за схемами

1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана

1.2.1.1 Механізм пересування моста

Привод ходових коліс здійснюється від двох асинхронних двигунів з фазним ротором.

Найменування даних механізму пересування моста:

1. Швидкість пересування моста υ (м/хв)……..……...75
2. Проліт моста L (мм)……..17000
3. Вага крана G (т.с.)……..…..22,5
4. База крана (мм)……4500
5. Кількість ходових коліс..…… …4
6. Діаметр ходових коліс (мм)….…… ...500
7. Тип рельса……..КР–70
8. Тип редуктора……...1Ц2У 200–10–12(21)У1
9. Передатне число…..…… ……10
10. Група режимів роботи……..М7(5М ГОСТ 25835–83)

1.2.1.2 Механізм пересування візка

Рух візка здійснюється асинхронним двигуном з фазним ротором через редуктор.

Найменування даних механізму пересування візка:

1. Швидкість пересування візка υ (м/хв)……..……...37,8
2. Кількість ходових коліс…… …….4
3. Тип рельса…….Р–50
4. Тип редуктора…….ЦЗВК–160–20–16У1
5. Повне передатне число ……..……..20

6. Діаметр коліс (мм)……..320

7. Група режимів роботи...……М6(4М ГОСТ 25835–83)

1.2.1.3 Механізм підйому

Привод механізму підйому здійснюється асинхронним двигуном з фазним ротором через шестерінчастий редуктор.

Найменування даних механізму підйому:

1. Вантажопідйомність Q(т.с.)……..10
2. Висота підйому L (м)…….……..8
3. Кількість віток поліспасту……..…3
4. ККД поліспасту..…….0,95
5. Довжина каната (м)……....93
6. Діаметр каната(мм)…….……...13,5
7. Діаметр блока поліспасту(мм)…….……...……406
8. Діаметр зрівняльного блока (мм)…….……...406
9. Тип редуктора……...1Ц2У–400–25–11МУ1
10. Повне передатне число …...……25
11. Діаметр барабана (мм)…….……..504
12. Група режимів роботи…...…….М7
13. Швидкість підйому υ (м/хв)……12

1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану

Механізм підйому крану вантажопідйомністю 10 т приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором MEF 412–6У1 потужністю 30 кВт

і частотою обертання 970 об/хв. Двигун керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Параметри двигуна наведено в таблиці 1.2 [3].

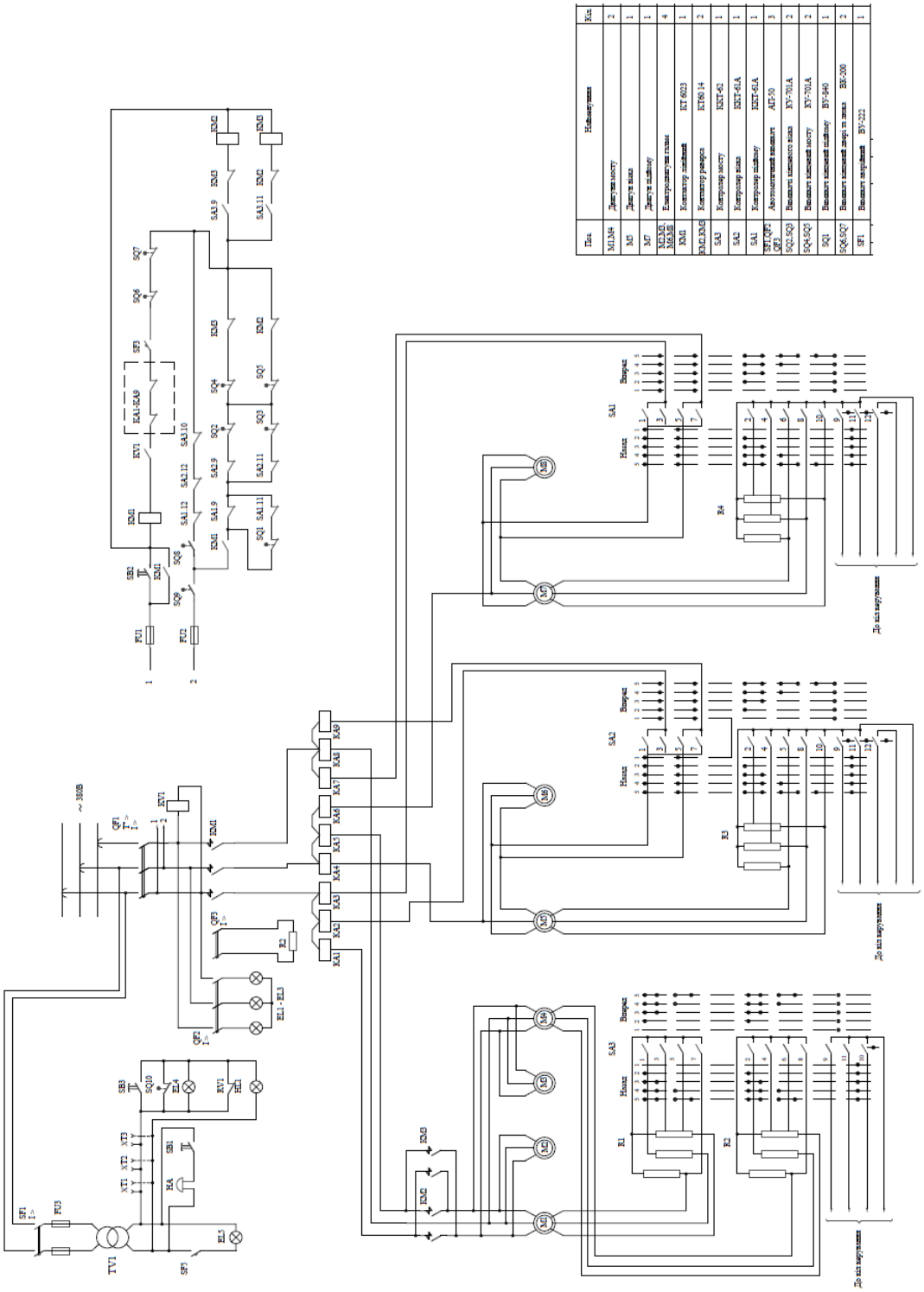


Рисунок 1.1 Схема електрична принципова електроустаткування мостового крана

Таблиця 1.2 − Номінальні параметри двигуна

Тип	$U_{фн}$, В	f, Гц	$P_н$, кВт	n_c, об/хв	Jд, кгм^2	$s_н$, %	$\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	r_1*	x_1*	r_2'*	x_2'*	x_μ'*
MEF 412–6У1	220	50	30	1000	0,675	3,0	88,5	0,82	0,032	0,073	0,042	0,012	2,8

Схема електрична принципова електроустаткування мостового крана представлена на рисунку 1.1. Дана схема призначена для керування електродвигунами механізмів підйому, пересування моста і пересування візка. У її склад входять: схема керування електродвигунами механізмів крана; схема захисної панелі; схема освітлення, сигналізації і опалювання кабіни. Для керування механізмами пересування візка і головного підйому використовується кулачкові контролери типу ККТ–61А. Всі електродвигуни обладнані механічними гальмами типу ТКТГ з електрогідроштовхачами типу ТГМ [2].

Для підйому вантажу необхідно рукоятку контролера SA1 перевести в перше положення «підйом». При цьому замкнуться контакти контролера SA1.1 і SA1.5. Напруга подається на обмотки статора електродвигуна М7. Одночасно отримує живлення електродвигун гідроштовхача М8, який підключений паралельно статору. Ротор електродвигуна М7 розгальмовується і починає обертатися. Всі контакти контролера в колі ротора розімкнені. Відбувається плавне рушання механізму підйому, оскільки в коло ротора у цей момент введені повністю ступені R4 (4–6) і R4 (7–6) пускового резистора R4. Перше положення контролера забезпечує тільки плавний процес рушання, тому рукоятку контролера відразу ж необхідно перевести в друге положення «підйом». При цьому додатково до контактів 1 і 5 контролера SA1 замикається контакт SA1.2, який вводить в коло ротора ступінь R4 (1–3). Двигун працює на малій швидкості, здійснюючи підйом вантажу (перша штучна характеристика).

При переведенні рукоятки контролера в третє положення «підйом» додатково замикається контакт контролера SA1.4, який шунтує ступінь R4 (5–6) пускового резистора. Еквівалентний опір в колі ротора електродвигуна М7 зменшується. Електродвигун переходить працювати на другу штучну характеристику. Швидкість підйому зростає. У четвертому положенні рукоятки контролера додатково замикається контакт SA1.6. В результаті шунтується

ступінь R4 (2–3) пускового резистора. Двигун переходить працювати на третю штучну характеристику. При переведенні рукоятки контролера в п'яте положення «підйом» замикається контакт SA1.8, внаслідок чого шунтується ступінь R4 (7–6) пускового резистора. Двигун переходить працювати на четвертую штучну характеристику. Швидкість підйому буде максимальною. При цьому залишаються включеними мінімальні опори: секції R4 (1–2) і R4 (4–5), забезпечуючи м'яку механічну характеристику при роботі електродвигуна.

Для спуску вантажу рукоятка контролера SA1 плавно з нульового положення переводиться в положення п'ять «спуск». При цьому замикаються контакти SA1.3 і SA1.7 контролера SA1, змінюючи чергування підключення фаз статора до мережі. Пускові ступені резистора R4 в роторному колі вводяться в тій же послідовності, що і при пуску електродвигуна на «підйом». Спуск вантажів при даній схемі управління супроводиться двома режимами роботи двигуна: «спуск–сила» і «спуск–гальмо». Якщо опускається порожній крюк або малий вантаж, зусилля, що розвивається за рахунок ваги, не вистачає для подолання тертя в ланках механізму, тому двигуном повинен створюватися додатковий момент, направлений у бік спуску. Важкі вантажі спускаються із швидкістю вище синхронної і асинхронна машина працює в режимі генератора, віддаючи електричну енергію в мережу. Робота на цих режимах досягається установкою рукоятки контролера у відповідне положення «підйом»[2].

1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму підйому мостового крану та формування вихідних даних

Двигун механізму підйому крану керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Проект реконструкції полягає в заміни релейно–контактних елементів системи керування АД з фазним ротором з реостатним регулюванням безконтактними. Мета даної реконструкції направлена на позбавлення від великогабаритних елементів схеми, які часто виходять з ладу і потребують постійного обслуговування.

Таким чином, у випускній кваліфікаційній роботі бакалавра ставиться задача розробки електропривода змінного струму по системі асинхронний двигун з фазним ротором з керуванням за допомогою програмованого логічного контролера [4,5].

Програмовані логічні контролери (ПЛК) широко використовуються у багатьох галузях промисловості. З їхньою допомогою можна створювати систему керування будь–якої складності: від контролю роботи найпростішого автономного пристрою до найскладніших систем, що відповідають за функціонування виробничого процесу у цілому [4,5].

Конструктивно ПЛК пристосовані для роботи в типових промислових умовах, з урахуванням рівнів сигналів, термо- і вологостійкості, ненадійності джерел живлення, а також механічних ударів і вібрацій. З цією метою апаратна частина знаходиться в міцному корпусі, здатний мінімізувати негативний вплив ряду виробничих факторів. Контролери також містять спеціальні інтерфейси для узгодження і обробки різних типів і рівнів сигналів. Розширення можливостей ПЛК призвело до того, що їх все частіше застосовують в пристроях введення / виведення, що входять до складу інтегрованих систем управління - на рівнях локального управління і управління процесом. [6].

З вищенаведеного витікає що система асинхронний двигун з фазним ротором з керуванням за допомогою програмованого логічного контролера в наш час найбільш широко використовується через її безсумнівні переваги.

2 Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана

2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна

Визначимо статичну потужність на валу двигуна [7]:

$$P_{с.н.} = 9{,}81 \cdot \frac{(G + G_0)}{\eta} \cdot V \cdot 10^{-3}, \quad (2.1)$$

де G = 10000 кг – вага вантажу; G_0=50 кг вага захоплюючого пристрою; V=0,2 м/с – швидкість обертання барабану; η=0,8 – ККД механізму[9].

$$P_{с.н.} = 9{,}81 \cdot \frac{(10000 + 50)}{0.8} \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3} = 24{,}6 \text{ кВт}.$$

У відповідності з вихідними даними по режиму роботи і прийнятою системою електроприводу знаходимо значення коефіцієнта, що визначає вибір двигуна по тепловому режиму $k_m = 0{,}95$ [9].

Знаходимо номінальну потужність двигуна по тепловому режиму попередньо [9].

$$P_п \geq \frac{P_{с.н.}}{k_m}, \quad (2.2)$$

$$P_п = \frac{24{,}6}{0{,}95} = 25{,}9 \text{ кВт}.$$

Згідно [3] обираємо асинхронний двигун з фазним ротором MEF 412–6У1; $P_н$ = 30 кВт; ТВ = 40%; M_{max} = 932 Н·м; cosφ = 0,82; $I_{н.с.}$ = 75 А; $I_{н.р.}$ = 73 А; $U_р$ = 255 В; J = 0,675 кг · м^2; η = 88,5%.

Визначимо повний зведений до валу двигуна маховий момент всіх обертових і поступально–рухомих мас приводу і вантажу:

$$\sum GD^2 = (GD^2)_{пр} = k \cdot G_p \cdot D_p^2 + 4 \cdot \frac{(Q \cdot V^2)}{n^2}, \quad (2.3)$$

де k – поправочний коефіцієнт, в середньому дорівнює 1,15 [9]; $G_pD_p^2$ – маховий момент ротора електродвигуна і всіх інших частин, що обертаються зі швидкістю ротора, Н·м^2; Q = 10000 кг – вантажопідйомність; V= 12 м/хв – швидкість підйому вантажу; n= 970 об/хв – номінальна частота обертання двигуна;

$$G_pD_p^2 = 4 \cdot 9{,}81 \cdot J, \quad (2.4)$$

де J = 0,675 кг·м^2 – момент інерції двигуна,

$$G_pD_p^2 = 4 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}675 = 26{,}487 \text{ Н·м}^2.$$

$$\sum GD^2 = 1{,}15 \cdot 26{,}487 + 4 \cdot \frac{10000 \cdot 12^2}{970^2} = 36{,}6 \text{ Н·м}^2.$$

Перевіримо двигун на забезпечення теплового режиму [9]:

$$P_{НТ} \geq \frac{k_{ekv} \cdot k_z \cdot \eta_{ekv.b} \cdot \sqrt{\frac{E_o}{E_n}} \cdot k_n \cdot P_{cn}}{k_p \cdot k_0 \cdot (\eta_{ekv.b} - k_{dp} \cdot (\eta_{ekv.b} - \eta_{ekv})}, \quad (2.5)$$

де k_{ekv}, k_z, E^0, E_n – розрахункові коефіцієнти, залежать від режиму роботи і махових мас [9]; $E^0 = 0{,}4$; $k_{ekv} = 0{,}8$; $E_n = 0{,}5$; $k_z = 1$; k_n – коефіцієнт, що дорівнює одиниці для електроприводів змінного струму; $k_{dp} = 1{,}25$ – коефіцієнт, що враховує ступінь включень динамічних втрат на нагрівання машини [9]; $\eta_{ekv.b}$=0,76– еквівалентний базисний ККД [9]; k_p – коефіцієнт, що враховує збільшення втрат на регулювальних характеристиках,

$$k_р = 1 \div 1,2\ (E_р - E_{р.б.}), \qquad (2.6)$$

де $E_р$=0,5 [9] – відносна тривалість включення при регулюванні;

$$k_р = 1 \div 1,2\ (0,5 - 0,4) = 0,88.$$

Візначімо еквівалентний ККД, який є показником енергетичних властивостей системи регулювання що визначає втрати енергії в електроприводі [9]:

$$\eta_{ekv} = \frac{\eta_{ekv.b}}{1 + \frac{(\eta_{ekv.b} - \eta_{ekv.z}) \cdot GD^2}{\eta_{ekv.z} \cdot 1,2 \cdot G_p D_p^{\ 2}}}, \qquad (2.7)$$

де η_{ekv} – значення еквівалентного ККД, відповідне заданому числу включень в годину Z_{ekv} [9], при Z = 240; $\eta_{ekv.z.} = 0,75$;

$$\eta_{ekv} = \frac{0,76}{1 + \frac{(0,76 - 0,75) \cdot 36,6}{0,75 \cdot 1,2 \cdot 26,487}} = 0,75;$$

$$P_{нт} = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 0,76 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{0,4}} \cdot 1 \cdot 24,6}{0,88 \cdot 0,9 \cdot (0,76 - 1,25 \cdot (0,76 - 0,75)} = 25,2 кВт.$$

$$P_н \geq P_{нт} \qquad (2.8)$$

$$30\ кВт > 25,2\ кВт$$

Обраний електродвигун по нагріванню підходить.

Перевіримо обраний двигун по забезпеченню пускового режиму:

$$M_{max} > k_{зм} \cdot (M_{с.max} + M_{дин}), \qquad (2.9)$$

де $k_{зм}$ =1,2 – коефіцієнт запасу по моменту [9].

Визначимо максимально можливий для даного кранового механізму момент статистичного навантаження наведений до валу електродвигуна:

$$M_{c.max} = 9550 \cdot P_{c.н} / n , \quad (2.10)$$

де n =970 об/хв – частота обертання двигуна; $P_{с.н.}$ = 34,6 кВт – статична потужність;

$$M_{c.max} = 9550 \cdot \frac{24,6}{970} = 242 \text{ Н·м.}$$

Визначимо динамічний момент, який відповідає умовам необхідного прискорення та кутову швидкість двигуна:

$$M_{дин} = \frac{(GD^2 \cdot \omega_n)}{40 \cdot V} \cdot a ; \quad (2.11)$$

$$\omega_n = \frac{(2 \cdot \pi \cdot n)}{60} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 970)}{60} = 102 \text{ рад/с}, \quad (2.12)$$

де а=0,3м/с^2 – прискорення механізму [9];

$$M_{дин} = \frac{36,6 \cdot 102}{40 \cdot \frac{12}{60}} \cdot 0,3 = 140 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{max} > 1,2 \cdot (242 + 140) = 459 \text{Нм};$$

$$932 \text{ Н·м} > 459 \text{ Н·м}.$$

Обраний електродвигун по пусковому режиму підходить. Обраний двигун задовольняє всім умовам.

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні

2.2.1 Мета реконструкції

Основою сучасної автоматизації технологічних процесів є прагнення до створення максимально ефективного, безпечного та стабільного виробництва, здатного забезпечувати високі техніко-економічні показники в умовах постійного зростання вимог до якості продукції та рівня промислової безпеки. У сучасній промисловості автоматизація вже давно перестала бути лише допоміжним елементом виробництва. Вона стала невід'ємною складовою функціонування будь-якого високотехнологічного підприємства, особливо у галузях важкої промисловості, металургії, машинобудування та енергетики, де технологічні процеси характеризуються значною складністю, великою кількістю взаємопов'язаних операцій та високим рівнем відповідальності.

Головною метою автоматизації технологічного процесу є підвищення ефективності виробничого процесу. Це досягається шляхом забезпечення стабільної та безперервної роботи обладнання, оптимізації режимів функціонування технологічних установок, скорочення часу виконання виробничих операцій та зниження непродуктивних втрат. Автоматизовані системи керування дозволяють забезпечити точне підтримання заданих параметрів процесу, що позитивно впливає на продуктивність обладнання та загальну економічну ефективність виробництва. У результаті впровадження сучасних систем автоматизації підприємства отримують можливість більш раціонально використовувати енергетичні, матеріальні та трудові ресурси.

Не менш важливою основою автоматизації є підвищення безпеки виробничого процесу. У багатьох галузях промисловості технологічні процеси супроводжуються дією небезпечних факторів: високих температур, значних механічних навантажень, електричних струмів великої потужності, токсичних речовин або вибухонебезпечного середовища. У таких умовах

участь людини в управлінні виробничими процесами повинна бути максимально обмеженою. Автоматизовані системи дозволяють мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій, своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та оперативно реагувати на можливі несправності. Це значно знижує ймовірність травматизму персоналу та підвищує загальний рівень промислової безпеки.

Досягнення поставленої мети автоматизації технологічного процесу забезпечується шляхом вирішення комплексу взаємопов’язаних завдань. Одним із найважливіших серед них є поліпшення якості регулювання технологічних параметрів. У будь-якому виробничому процесі існують певні параметри, які повинні підтримуватися в заданих межах: температура, швидкість, тиск, рівень, витрата, струм, напруга та інші величини. Навіть незначні відхилення цих параметрів можуть негативно вплинути на якість продукції або призвести до порушення технологічного режиму. Використання автоматичних систем регулювання дозволяє забезпечити високу точність підтримання параметрів, оперативне реагування на зміни навантаження та стабільність роботи обладнання.

Особливе значення має підвищення коефіцієнта готовності устаткування. У промислових умовах простої обладнання призводять до значних економічних втрат, порушення виробничого графіка та зниження продуктивності підприємства. Завдяки автоматизації стає можливим постійний контроль технічного стану машин і механізмів, своєчасне виявлення несправностей та проведення профілактичного обслуговування. Системи діагностики дозволяють аналізувати параметри роботи обладнання в режимі реального часу, попереджаючи виникнення аварій та позапланових зупинок. Це забезпечує більш тривалий термін служби устаткування та підвищує надійність його експлуатації.

Важливим завданням автоматизації є також поліпшення ергономіки праці операторів технологічного процесу. У традиційних системах керування оператор був змушений постійно контролювати велику кількість параметрів, виконувати складні ручні операції та швидко реагувати на зміни

режимів роботи обладнання. Це призводило до значного психоемоційного навантаження, втоми та підвищення ймовірності помилок. Сучасні автоматизовані системи керування значною мірою спрощують роботу персоналу. Інформація про стан технологічного процесу відображається на екранах операторських станцій у зручному графічному вигляді, а більшість рутинних операцій виконується автоматично. У результаті оператор отримує можливість зосередитися на контролі загального стану системи та прийнятті стратегічних рішень, а не на виконанні одноманітних дій.

Суттєву роль у сучасній автоматизації відіграє функція зберігання інформації про хід технологічного процесу та аварійні ситуації. Усі параметри роботи обладнання, зміни режимів, сигнали тривоги та аварійні повідомлення реєструються в електронних архівах. Це дозволяє проводити детальний аналіз роботи системи, виявляти причини несправностей, оцінювати ефективність виробничого процесу та приймати обґрунтовані рішення щодо його вдосконалення. Накопичення статистичних даних створює основу для впровадження інтелектуальних систем аналізу, прогнозування технічного стану обладнання та оптимізації режимів роботи.

Вирішення завдань автоматизації технологічного процесу здійснюється шляхом впровадження сучасних методів автоматизації. До таких методів належать автоматичне регулювання, програмне керування, адаптивне керування, системи диспетчеризації, дистанційний моніторинг та використання алгоритмів штучного інтелекту. Сучасні методи автоматизації дозволяють створювати гнучкі системи керування, здатні адаптуватися до змін виробничих умов та забезпечувати оптимальні режими функціонування обладнання.

Поряд із методами автоматизації важливе значення має впровадження сучасних технічних засобів автоматизації. До них належать програмовані логічні контролери, частотні перетворювачі, датчики, мікропроцесорні системи, системи SCADA, промислові мережі передачі даних та інтелектуальні виконавчі механізми. Використання сучасної елементної бази дозволяє значно підвищити точність, швидкодію та надійність систем

автоматичного керування. Наприклад, застосування частотних перетворювачів у системах електропривода забезпечує плавне регулювання швидкості, зменшення енергоспоживання та зниження механічних навантажень на обладнання.

Особливої актуальності автоматизація набуває в умовах цифровізації промисловості та розвитку концепції «Індустрія 4.0». Сучасні автоматизовані системи інтегруються в єдині інформаційні мережі підприємства, забезпечуючи обмін даними між різними виробничими ділянками, системами управління та аналітичними платформами. Це дозволяє створювати комплексні системи управління виробництвом, які здатні не лише контролювати технологічні процеси, але й автоматично оптимізувати їх відповідно до виробничих потреб.

Таким чином, автоматизація технологічних процесів є одним із найважливіших напрямків розвитку сучасної промисловості. Вона забезпечує підвищення ефективності виробництва, покращення якості продукції, зниження енерговитрат, підвищення надійності обладнання та створення безпечних умов праці. Використання сучасних методів і засобів автоматизації дозволяє підприємствам успішно функціонувати в умовах високої конкуренції, забезпечуючи стабільність виробничих процесів та високий рівень технічного розвитку.

2.2.2 Початкова релейно-контактна схема і вимоги до реконструкції

Загальна схема керування краном приведена на листах графічної частини проекту [2]. Фрагмент силової схеми живлення привода підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 тон та схема кіл керування краном наведена на рисунках додатку А. Специфікація апаратів і пристроїв схем додатку А приведена в таблиці. 2.1 [2].

Таблица 2.1 − Специфікація апаратів і пристроїв

Позіція/ позначення	Призначення	Кіль – кість	Примітка
1	2	3	4
M1..M4	Двигуни моста	2	
M5	Двигун візка	1	
M7	Двигун підйому	1	30 кВт, 970 об/хв
M2;M3 M6;M8	Електродвигуни гальм	4	
KM1	Контактор лінійний КТ6023	1	
KM2; KM3	Контактор реверсу КТ6014	2	

Продовження таблиці 2.1

SA3	Контролер моста ККТ–62	1	
SA2	Контролер візка ККТ–61А	1	
SA1	Контролер підйому ККТ–61А	1	
SF1; QF2; QF3	Автоматичний вимикач АП–50	3	
SQ2; SQ3	Вимикач кінцевий візка КУ–701А	2	
SQ4; SQ5	Вимикач кінцевий моста КУ–701А	2	
SQ1	Вимикач кінцевий підйому ВУ–840	1	
SQ6; SQ7	Вимикач кінцевий дверей і люка ВК–200	2	
SF3	Вимикач аварійний ВУ–222	1	

Робота схеми:

Вибір напряму руху здійснюється зміною порядку чергування фаз живлення приводного двигуна. Перемикання проводиться безпосередньо по колах командоконтролера SA1 контактами 1,3,5,7.

Контактами 2,4,6,8,10 здійснюється комутація ступенів додаткового опору в колі ротора. У даному приводі реалізована несиметрична схема включення додаткових ступенів. Це дозволяє отримати більшу кількість ступенів при використанні невеликої кількості контактів. Таким чином, зменшуються кидки моменту при розгоні.

2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції

Для підвищення надійності роботи приводу застосуємо програмований логічний контролер, крім того, для підвищення комфорту керування, замінимо кулачковий контролер ККТ-62 джойстиком VNSO з дискретними виходами.

2.2.3.1 Програмований логічний контролер (ПЛК)

Для реконструкції релейно–контакторної схеми було прийнято рішення використовувати програмований логічний контролер сімейства Simatic S7-200 компанії Siemens. Програмовані логічні контролери серії SIMATIC S7-200 виробництва Siemens використовуються на відносно простих ділянках виробництва. На базі S7-200 будуються АСУ ТП початкового рівня з мінімальними тимчасовими і фінансовими витратами. Завдяки підтримці більшості промислових мереж, S7-200 легко інтегрується до складу АСУ ТП з більш потужними контролерами виробництва як Siemens, так і інших брендів, а також в розподілені системи управління, таких як телеметрія, наприклад.



Рисунок 2.1 Програмований контролер SIMATIC S7-200

Для побудови систем керування на базі контроллерів SIMATICS7-200 може бути використаний декілька типів центральных процесорів, кожний з яких має два варіанта виконання:

• з живленням = 24В і транзисторними вихідними каскадами,

• з живленням ~ 120/230 В і виходами у вигляді замикаючих контактов реле.

Всі центральні процесори позволяют проводити підключення модулів розширення .

Центральний процесор CPU 226, призначений для побудови відносно простых систем автоматичногокерування, работаючих автономно або в складі розподілених систем автоматичного керування. Оснащен 24 встроенными дискретными входами і 16 дискретними виходами, дозволяє производить подключение до 7 модулей расширения ввода-виводу.

Основні технічні дані процесора (CPU226-216-1BB23-2XBO) з живленням змінним струмом:

Напруга живлення центрального процесора	230В
Споживаний струм	320 мА
Споживана потужність	17Вт
Кількість дискретних входів	24
Кількість дискретних виходів	16
Тип вихідних каскадів	реле(сухой контакт)
Вихідна напруга	250В
Тривалий струм одного виходу, не більш	2,0А

Центральні процесори S7 - 200 забезпечені вбудованим блоком живлення напругою -24В для живлення вхідних кіл контроллерів. Залежно від модифікації центрального процесора вихідний струм блоку живлення може складати 180, 280 або 400мА. Якщо потужності цих блоків живлення недостатньо, то спільно з контроллерами S7 - 200 можуть бути використані зовнішні блоки живлення сімейства SITOP power. Блоки живлення SITOP Power 24В/3.5А призначені для живлення центральних процесорів і модулів

програмованих контроллерів SIMATIC S7 - 200, а також їх зовнішніх кіл. Вони виконують перетворення вхідної однофазної напруги змінного струму промислової частоти в стабілізовану вихідну напругу -24В і забезпечують електронний захист від коротких замикань в колі навантаження.

Для програмування всіх типів центральних процесорів SIMATIC S7-200 може бути використано програмне забезпечення STEP 7 Micro / WIN. Розробка програм виконується на мовах LAD (Ladder Diagram- діаграми сходовій логіки), STL (Statement List -список інструкцій) і FBD (Function Block Diagram - діаграми функціональних блоків).

2.2.3.2 Джойстик

Кулачковий командоконтролер ККТ-62, що було використано в початковій схемі здійснює безпосередню комутацію силових кіл. Необхідність комутації великих струмів обумовлює відповідні габарити контактів, зусилля пружин і, таким чином, від оператора потрібні значні зусилля для перемикання ступенів.Враховуючи це, зявляється доцільним застосування органа керування нового покоління – джойстика.

о установки пропонується одноосьовий командоконтролер типу VNSO джойстикового виконання виробництва Spohn & Burkhardt, який є сучасним високонадійним пристроєм керування, спеціально розробленим для використання у промислових системах підвищеної відповідальності. Даний тип командоконтролерів широко застосовується у вантажопідіймальних механізмах, електрогідравлічних системах, мостових та козлових кранах, підйомно-транспортному обладнанні, навантажувачах, конвеєрних системах та інших видах промислової техніки, де необхідне точне, плавне та безпечне керування рухом механізмів.

Використання командоконтролера VNSO у системі керування мостовим краном обумовлено його високими експлуатаційними характеристиками, ергономічністю та надійністю роботи в складних виробничих умовах. У процесі експлуатації підйомно-транспортного обладнання оператору необхідно постійно виконувати значну кількість керуючих дій, пов’язаних із переміщенням вантажів, зміною швидкості руху механізмів та точним позиціонуванням вантажу. Саме тому до органів керування висуваються підвищені вимоги щодо зручності використання, точності формування команд та довговічності конструкції.

Командоконтролер VNSO виконаний у джойстиковому форматі, що забезпечує інтуїтивно зрозуміле та максимально зручне керування технологічним процесом. Конструкція джойстика дозволяє оператору плавно задавати напрямок руху та регулювати швидкість переміщення механізмів залежно від кута відхилення рукоятки. Завдяки цьому забезпечується висока точність керування електроприводом і значно зменшується ймовірність виникнення різких ривків або ударних навантажень під час пуску та гальмування механізмів.

Особливістю командоконтролерів виробництва Spohn & Burkhardt є їхня орієнтація на експлуатацію у важких промислових умовах. Пристрої мають підвищений рівень механічної міцності, стійкість до вібрацій, пилу, вологи та температурних перепадів. Це особливо важливо для металургійних підприємств і цехів металопрокатки, де обладнання працює в умовах підвищеної запиленості, значних динамічних навантажень та впливу високих температур. Корпус контролера виготовляється з високоміцних матеріалів, що забезпечують довговічність і захист внутрішніх елементів від механічних пошкоджень.

Однією з основних переваг використання джойстикового командоконтролера є можливість реалізації багатоступеневого або плавного керування електроприводом. У традиційних системах керування оператор змушений використовувати кнопкові або кулачкові командоапарати, які

забезпечують лише фіксовані режими роботи механізмів. У результаті це призводить до різких пусків, підвищених пускових струмів та збільшення механічного зносу обладнання. Використання VNSO дозволяє формувати більш плавні сигнали керування, що позитивно впливає на динаміку роботи електропривода та сприяє підвищенню ресурсу механічних вузлів крана.

Важливим аспектом є ергономічність конструкції командоконтролера. Рукоятка джойстика має анатомічну форму, що забезпечує комфортне керування навіть при тривалій роботі оператора. Зменшення фізичного навантаження на оператора є надзвичайно важливим фактором у виробничих умовах, де керування мостовим краном здійснюється протягом усієї робочої зміни. Завдяки продуманому розташуванню органів керування оператор може швидко та точно виконувати необхідні маніпуляції без зайвих рухів і перевтоми.

У сучасних системах автоматизованого керування мостовими кранами командоконтролер VNSO часто інтегрується з мікропроцесорними системами керування, програмованими логічними контролерами та частотними перетворювачами. Це дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості електродвигунів, автоматичне обмеження прискорення та уповільнення, а також функції захисту від перевантаження. Сигнали, сформовані джойстиком, можуть передаватися як у дискретному, так і в аналоговому форматі, що забезпечує високу сумісність з різними типами систем керування.

Особливу увагу при проектуванні систем керування підйомно-транспортним обладнанням приділяють питанням безпеки. Командоконтролер VNSO оснащується спеціальними механізмами повернення рукоятки у нейтральне положення, що дозволяє автоматично припиняти рух механізму після відпускання органу керування оператором. Це значно знижує ризик аварійних ситуацій та забезпечує додатковий рівень захисту під час роботи з важкими вантажами. Крім того, у конструкції

контролера можуть передбачатися блокування від випадкового ввімкнення, аварійні кнопки зупинки та інші елементи промислової безпеки.

Ще однією перевагою даного типу командоконтролерів є їхня висока електрична надійність. Контактні елементи та датчики мають великий ресурс роботи та розраховані на виконання сотень тисяч циклів перемикання. Це особливо важливо для мостових кранів, які працюють у циклічному режимі та виконують велику кількість пусків і зупинок протягом зміни. Надійність командоапарата безпосередньо впливає на безперервність виробничого процесу та ефективність роботи всього обладнання.

У процесі модернізації кранових електроприводів застосування сучасних джойстикових систем керування є одним із найбільш перспективних напрямків удосконалення. Використання командоконтролера VNSO дозволяє не лише покращити технічні характеристики системи керування, але й значно підвищити комфорт роботи оператора, точність переміщення вантажів та загальний рівень безпеки експлуатації обладнання.

Таким чином, одноосьовий командоконтролер VNSO джойстикового типу виробництва Spohn & Burkhardt є сучасним та ефективним засобом керування підйомно-транспортними механізмами. Його застосування у системах керування мостовими кранами забезпечує плавність регулювання, зменшення динамічних навантажень, підвищення надійності електропривода, покращення ергономічних умов праці оператора та підвищення безпеки технологічного процесу.



Рисунок 2.2 Джойстик VNSO

Основні технічні дані командоконтролера VNSO: номінальна робоча напруга 230В, номінальний робочий струм 16А, кількість позицій напрямків 7-0-7 з фіксацією у кожному положенні. Для визначення положення рукоятки командоконтролера передбачена прозора гравірувальна пластина.

Таким чином, конструкція джойстика надає можливості реалізувати пуск привода більш плавним з використанням симетричних ступень пускових опорів. Схема привода механізму з сім'ю симетричними ступенями пускового опору надана на другому листі графічної частини.

2.2.3.3 Релейно-контакторна аппаратура

Для комутації силових кіл застосовани електромагнитни контактори серії Sirius 3RT10 виробництва концерну SIEMENS.

2.2.3.3.1 Лінійний контактор

Лінійний контактор (КМ) триполюсний типа 3RT1055(типоразмер S6) з електромагнитним приводом на номінальну живлячу напругу керування 200 ÷277В та робочий струм до185А.

Електромагнітна котушка живиться від попередньо включеного електронного блоку, який має потужність, достню для надійного спрацьовування та утримання контактора.

Для живлення електромаенитних приводів напруга подається на клеми А1/А2 бічного електронного модуля.Керуючі входи контактора виведени на 7-полюсний штекерний роз'єм. Потужність, яку споживає електромагнитний привод при включенні 280ВА, при утримані 4,4ВА.



Рисунок 2.3 Лінійний контактор Siemens SIRIUS 3RT1055

Лінійний контактор Siemens SIRIUS 3RT1055 є триполюсним електромагнітним комутаційним апаратом серії SIRIUS виробництва Siemens, який призначений для комутації силових електричних кіл змінного струму та широко застосовується у системах електропривода промислового обладнання, мостових кранів, конвеєрних ліній, насосних установок і підйомно-транспортних механізмів.

Контактор типорозміру S6 характеризується високою комутаційною здатністю та розрахований на робочий струм до 185 А, що дозволяє використовувати його у потужних електроприводах із значними пусковими навантаженнями. Електромагнітний привід контактора забезпечує швидке та надійне спрацювання силових контактів при подачі керуючої напруги в діапазоні 200–277 В. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота електропривода навіть в умовах інтенсивного циклічного режиму роботи.

Контактори серії SIRIUS мають модульну конструкцію, що значно спрощує монтаж, технічне обслуговування та заміну окремих елементів. У

промислових системах автоматизації вони часто використовуються разом із тепловими реле, автоматичними вимикачами та частотними перетворювачами, формуючи комплексні системи захисту й керування електродвигунами.

2.2.3.3.2 Привод пересування моста

Контактори вибіру напряму руху мосту(КМ2, КМ3) 3RT1035(типоразмер S2)триполюсні,модіфікація з звичайним приводом, живляча напруга керування 230В,робочий струм 40А, потужність включення/ утримання 145/12,5ВА.

Для комутації пускових опорів кола ротора приводу руху моста (К3.1-К3.7) вибраний чотириполюсний контактор 3RT1325(S0) живляча напруга керування 230В, робочий струм 35А, потужність включення/утримання 61/9,8ВА.

2.2.3.3.3 Привод пересування візка

Коммутація пускових опорів (КМ4,КМ5,К2.1-К2.7) здійснюється триполюсними контакторами 3RT1025(типоразмер S0), живляча напруга керування 230В, робочий струм 17А. Потужність, споживана електромагнитнім приводом на включення / утримання 61 /7,8ВА.

2.2.3.3.4 Привод механізму підйому

Коммутація пускових опорів (КМ6, КМ7,К1.1- К1.7) здійснюється триполюсними контакторами 3RT1054 (типорозмір S6), живляча напруга керування 230В, рабочий ток 150А. Потужність, споживана електромагнитнім приводом на включення / утримання 300 /5,8ВА.

2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода

2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором

У нерухомій системи координат $\omega_к = 0$ рівняння АД в проекціях на дійсну та уявну вісі системи координат "α−β", набирають відповідно наступного вигляду [14]:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}}; \quad u_{1\beta} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} \\ \mathrm{u}_{2\alpha} = R_2' i_{2\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} + \omega_r p_n \psi_{2\beta}; \quad \mathrm{u}_{2\beta} = R_2' i_{2\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} - \omega_r p_n \psi_{2\alpha}, \end{cases} \tag{2.13}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_\sigma (\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}), \quad k_\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}. \tag{2.14}$$

де $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$ – відповідно результуючі вектори напруг, струмів і потокозчеплень; R_1, R_2' – відповідно активний опір обмотки статора та приведений активний опір обмотки ротора; p_n – кількість пар полюсів двигуна; ω_r – кутова швидкість ротора; M – електромагнітний момент АД визначається як векторний добуток потокозчеплення та струму.

Вектори потокозчеплень можна записати через результуючі вектори струмів статора і ротора [14]:

$$\overline{\psi}_1 = L_1\bar{i}_1 + L_m\bar{i}_2; \quad \overline{\psi}_2 = L_2'\bar{i}_2 + L_m\bar{i}_1 \tag{2.15}$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$; $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$ – повні індуктивності обмоток статора та ротора; L_m – максимальна взаємна індуктивність між цими обмотками; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора.

Для повного опису перехідних процесів в АД до рівнянь напруг та моменту слід додати рівняння руху електропривода:

$$M - Mc = j\frac{d\omega_r}{dt}, \tag{2.16}$$

де M_c – момент опору на валу АД; J – момент інерції електропривода, приведений до вала АД.

Враховуючи рівняння електропривода, систему рівнянь АД в нормальній формі Коши можна представити наступним чином [14]:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}} = u_{1\alpha} - \mathrm{R}_1\imath_{1\alpha}; \quad \frac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} = u_{1\beta} - \mathrm{R}_1\imath_{1\beta}; \frac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\alpha} - R_2'i_{2\alpha} - \omega_r p_n\psi_{2\beta}; \\ \frac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\beta} - R_2'i_{2\beta} + \omega_r p_n\psi_{2\alpha}; \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J} \end{cases} \tag{2.17}$$

Момент двигуна знаходиться через проекції векторів потокозчеплення статора та ротора. Запис диференційних рівнянь через потокозчеплення забезпечує найкомпактніший їхній вигляд. Але при цьому додатково необхідно записати алгебраїчні вирази, що зв'язують струми з потокозчепленнями[14]:

$$i_{1\alpha} = k_\sigma(L_2\psi_{1\alpha} - L_m\psi_{2\alpha}); i_{1\beta} = k_\sigma(L_2\psi_{1\beta} - L_m\psi_{2\beta});$$
$$i_{2\alpha} = k_\sigma(L_1\psi_{2\alpha} - L_m\psi_{1\alpha}); i_{2\beta} = k_\sigma(L_1\psi_{2\beta} - L_m\psi_{1\beta}). \quad (2.18)$$

2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів

Проведемо розрахунки щодо реостатного пуску АД з фазним ротором номінальні параметри якого наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 − Номінальні параметри двигуна

Тип	$U_{фн}$, В	f, Гц	P_n, кВт	n_c, об/хв	Jд, кгм^2	s_n, %	$\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	r_1*	x_1*	r_2'*	x_2'*	x_μ'*
MEF 412–6У1	220	50	30	1000	0,675	3,0	88,5	0,82	0,032	0,073	0,042	0,012	2,8

Напруга живлення двигуна синусоїдальна, а мережа живлення трифазна та симетрична. У такому разі в системі рівнянь АД слід прийняти $u_{2\alpha} = u_{2\beta} = 0$, а симетрична трифазна система синусоїдальних напруг статора з початковою фазою φ та амплітудою U_m в системі координат "α−β" матиме вигляд:

$$u_{1\alpha} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi); u_{1\beta} = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (2.19)$$

Знаходимо номінальний струм:

$$I_{1ф} = \frac{P_n}{3U_{фн} \cdot \eta_н \cdot \cos\phi_н}. \quad (2.20)$$

де P_{2n} – номінальна потужність двигуна, кВт; η – коефіцієнт корисної дії (ККД); *cos φ* – коефіцієнт потужності.

$$\mathrm{I}_{1\phi} = \frac{30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,885} = 62,635 A.$$

Отримаємо абсолютні значення опорів:

$$\mathrm{R}_1 = r_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}};\ \mathrm{R}_2 = r'^*_2 \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}};\ X_1 = X_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}; \qquad (2.21)$$

$$X'_2 = X'^*_2 \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}};\ X_\mu = X_\mu^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}.$$

де X_1 – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; X'_2 – індуктивний опір обмотки ротора приведений до обмотки статора; X_μ – головний індуктивний опір; X^*, R^*– опір у відносних одиницях; x, r – опір, Ом; I_1 – номінальний фазний струм статора, А; $U_{1номф}$ – номінальна фазна напруга, В.

$$\mathrm{R}_1 = 0,032 \cdot \frac{220}{62,635} = 0,112\ Ом;\ \mathrm{R}_2 = 0,042 \cdot \frac{220}{62,635} = 0,148\ Ом;$$

$$X_1 = 0,073 \cdot \frac{220}{62,635} = 0,256\ \text{Ом};\ X'_2 = 0,012 \cdot \frac{220}{62,635} = 0,042\ Ом;$$

$$X_\mu = 2,8 \cdot \frac{220}{62,635} = 9,835\ Ом\ .$$

Частота мережі живлення

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_н. \qquad (2.22)$$

$$\omega_0 = 2 \cdot 3,1416 \cdot 50 = 314\ рад/с.$$

За формулами знаходимо значення індуктивностей:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0}. \qquad (2.23)$$

$$L_1 = \frac{0,256 + 9,835}{314} = 0,032\,\text{Гн}; \quad L_2 = \frac{0,042 + 9,835}{314} = 0,031\,\text{Гн};$$

$$L_m = \frac{9,835}{314} = 0,031 Гн.$$

Номінальний момент:

$$\mathrm{M}_н = \frac{3\mathrm{R}_2'}{s_n \cdot \omega_c} \cdot \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s_n})^2 + (X_1 + X_2')^2}. \qquad (2.24)$$

$$\mathrm{M}_н = \frac{3 \cdot 0,148}{0,03 \cdot 62,83} \cdot \frac{220^2}{(0,112 + \frac{0,148}{0,03})^2 + (0,256 + 0,042)^2} = 268,565 Нм.$$

Критичний момент:

$$\mathrm{M}_{КР} = \frac{3}{2 \cdot \omega_c} \cdot \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \qquad (2.25)$$

$$\mathrm{M}_{КР} = \frac{3}{2 \cdot 104,72} \cdot \frac{220^2}{(0,112 + \sqrt{0,112_1^2 + (0,256 + 0,042)^2}} = 1607\,\text{Нм}.$$

Кількість пар полюсів:

$$p=3000/n_0=3000/1000=3.$$

Визначення коефіцієнта kσ

$$k\sigma = \frac{1}{L_1 \cdot L_2 - L_m} = \frac{1}{0,032 \cdot 0,031 - 0,031} = 33490\ .$$

Приймемо число ступенів пускових резисторів m=7, режим пуску форсований.

Максимальний момент M_{max} =295×2,8=827 Нм

Приймаємо для форсованого пуску величину пікового моменту:

$$M_1 = 0{,}7M_{max} = 0{,}7 \times 827 = 579 \text{ Нм}.$$

Відношення пікового й перемикаючого моментів:

$$\lambda = \sqrt[6]{\frac{1}{S_{\text{ìì}} \times \dot{I}'_1}} = \sqrt[6]{\frac{1}{0{,}03 \times 1{,}96}} = 1{,}6,$$

де 0,7×2,8=1,96.

Перемикаючий момент:

$$M_2 = \frac{\dot{I}'_1}{\lambda} = \frac{1{,}96}{1{,}6} = 1{,}22 \ .$$

Внутрішній опір ротора:

$$r_{ð} = \frac{U_{ðíîì} \ S_{\text{ìì}}}{\sqrt{3} I_{ð\text{ìì}}} = \frac{250 \times 0{,}03}{\sqrt{3} \times 74} = 0{,}0585 \ \text{Ом}$$

Повні опори кола ротора на кожному ступені:

$$R_6 = \lambda r_p = 1{,}6 \times 0{,}0585 = 0{,}094 \text{ Ом}$$
$$R_5 = \lambda^2 r_p = 1{,}6^2 \times 0{,}0585 = 0{,}15 \text{ Ом}$$
$$R_4 = \lambda^3 r_p = 1{,}6^3 \times 0{,}0585 = 0{,}24 \text{ Ом}$$
$$R_3 = \lambda^4 r_p = 1{,}6^4 \times 0{,}0585 = 0{,}39 \text{ Ом}$$
$$R_2 = \lambda^5 r_p = 1{,}6^5 \times 0{,}0585 = 0{,}62 \text{ Ом}$$

$$R_1 = \lambda^6 r_p = 1{,}6^6 \times 0{,}0585 = 0{,}99 \text{ Ом}$$

Опори окремих секцій пускового реостата:

$r_6 = R_6 - r_p = 0{,}094 - 0{,}0585 = 0{,}0355$ Ом

$r_5 = R_5 - R_6 = 0{,}15 - 0{,}094 = 0{,}056$ Ом

$r_4 = R_4 - R_5 = 0{,}24 - 0{,}15 = 0{,}09$ Ом

$r_3 = R_3 - R_4 = 0{,}39 - 0{,}24 = 0{,}15$ Ом

$r_2 = R_2 - R_3 = 0{,}62 - 0{,}39 = 0{,}23$ Ом

$r_1 = R_1 - R_2 = 0{,}99 - 62 = 0{,}37$ Ом

Загальний опір пускового реостата:

$R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 = 0{,}0355 + 0{,}056 + 0{,}09 + 0{,}15 + 0{,}23 + 0{,}37 = 0{,}93$ Ом .

Критичне ковзання:

$$S_{\text{кр}} = S_{н}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0{,}03(2{,}8 + \sqrt{2{,}8^2 - 1}) = 0{,}16 .$$

Ковзання й частота обертання при $M=M_1$ при роботі на природній характеристиці:

$$S_{д1} = \frac{S_{Êð}}{\frac{M_{\max}}{M_1} + \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{M_1}\right)^2 - 1}} = \frac{0{,}16}{\frac{1}{0{,}7} + \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}7}\right)^2 - 1}} = 0{,}065 ,$$

$n_e = n_0 (1 - Se_1) = 1000(1 - 0{,}065) = 935$ об/хв.

Ковзання й частота обертання при $M=M_1$ при роботі на реостатних характеристиках:

$$S_{p1} = S_{e1}\frac{R_1}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}99}{0{,}0585} \approx 0{,}998;$$

$n_1 = n_0 (1-Sp_1) = n_0 (1-0{,}998) = 1000 \times 0{,}01 = 10$ об/хв

$$S_{p2} = S_{e1}\frac{R_2}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}62}{0{,}0585} = 0{,}69;$$

$n_2 = n_0 (1-Sp_2) = n_0 (1-0{,}69) = 1000 \times 0{,}31 = 310$ об/хв.;

$$S_{p3} = S_{e1}\frac{R_3}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}39}{0{,}0585} = 0{,}4;$$

$n_3 = n_0 (1-Sp_3) = n_0 (1-0{,}4) = 1000 \times 0{,}6 = 600$ об/хв.;

$$S_{p4} = S_{e1}\frac{R_4}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}24}{0{,}0585} = 0{,}27;$$

$n_4 = n_0 (1-Sp_4) = n_0 (1-0{,}27) = 1000 \times 0{,}73 = 730$ об/хв.;

$$S_{p5} = S_{e1}\frac{R_5}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}15}{0{,}0585} = 0{,}17;$$

$n_5 = n_0 (1-Sp_5) = n_0 (1-0{,}17) = 1000 \times 0{,}83 = 830$ об/хв.;

$$S_{p6} = S_{e1}\frac{R_6}{r_p} = 0{,}065\frac{0{,}094}{0{,}0585} = 0{,}1;$$

$n_6 = n_0 (1-Sp_6) = n_0 (1-0{,}1) = 1000 \times 0{,}9 = 900$ об/хв..

Перепад швидкостей на відповідних ступенях:

$\Delta n_1 = n_1 - 0 = n_1 = 10$ об/хв.;

$\Delta n_2 = n_2 - n_1 = 310\text{-}10 = 300$ об/хв.;

$\Delta n_3 = n_3 - n_2 = 600\text{-}310 = 290$ об/хв.;

$\Delta n_4 = n_4 - n_3 = 730\text{-}600 = 130$ об/хв.;

$\Delta n_5 = n_5 - n_6 = 830\text{-}730 = 100$ об/хв.;

$\Delta n_6 = n_6 - n_5 = 900\text{-}830 = 70$ об/хв.;

$\Delta n_7 = n\ e\text{-}_e - n_6 = 935\text{-}900 = 35$ об/хв..

Час пуску на відповідних ступенях

$$t = J\frac{\Delta n}{M_1 - M_2}\ln\frac{M_1 - M_{\acute{i}}}{M_2 - M\acute{i}};$$

$$t_1 = 0{,}675\frac{10}{579 - 359}\ln\frac{1{,}96 - 1}{1{,}22 - 1} = 0{,}045\text{c};$$

$t_2 = 0{,}0045 \times 300 = 1{,}356$ с;

$t_3 = 0{,}0045 \times 290 = 1{,}3$с;

$t_4 = 0{,}0045 \times 130 = 0{,}59$с;

$t_5 = 0{,}0045 \times 100 = 0{,}45$с;

$t_6 = 0{,}0045 \times 70 = 0{,}32$с;

$t_7 = 0{,}0045 \times 35 = 0{,}16$с.

В додатку Б наведено програму розроблену в пакеті Mathcad 14 з реактивним моментом опору на валу M_H та початковою фазною напругою статора $\varphi = \pi/2$ рад. У програмі змінна "n" визначає кількість точок для побудови графіків, t_d – крок розрахунку. Графіки перехідних процесів M(t), ω(t), i_1(t) наведені на рисунках В.1–В.3 додатку В. На рисунку Г.1 додатку Г наведено графіки функцій напруги, струму та потужності під час пуску АД.

2.4 Розрахунок надійності систем керування електроприводом

Значення експлуатаційної інтенсивності відмов $\lambda_е$ більшості груп елементів розраховуються по математичній моделі [14]:

$$\lambda_е = \lambda_б \prod_{i=1}^{m} K_i , \qquad (2.26)$$

де $\lambda_б$ –базова інтенсивність відмов елементів даної групи;

Кі –коефіцієнти, враховуючі зміну експлуатаційної інтенсивності відмов в залежності від різних факторів;

m – число чинників, що враховуються.

Розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмов мікропроцесорів і програмованих логічних інтегральних мікросхем (ПЛК) виконується за математичною моделлю:

$$\lambda_e=(\lambda_{кр}k_t+\lambda_{кор}k_E)\,k_Q\,k_{L.}. \qquad (2.27)$$

Модель поширюється на наступні групи інтегральних мікросхем (ІМС): аналогові ІС біполярної технології, програмовані логічні ІС, цифрові мікропроцесори біполярної технології та ін.

Математична модель прогнозування значень експлуатаційної інтенсивності відмов електромагнітних реле (контакторів):

$$\lambda_e=(\lambda_б\cdot k_F\,k_P\,k_П+\lambda_б^{(ком)}\,F\cdot k_Pk_K\,k_П)\,k_E. \qquad (2.28)$$

Математична модель прогнозування значень експлуатаційної інтенсивності відмов електронної плати (джойстик):

$$\lambda_e=\lambda_б\cdot k_t\,k_E\,k_П. \qquad (2.29)$$

Математична модель прогнозування значень експлуатаційної інтенсивності відмов кулачкового командоконтролера:

$$\lambda_e=(\lambda_б^{(ки)\cdot}\,k_F\,k_к+\lambda_б^{(вкл)}\,NF)\cdot k_P\,k_П\;k_E. \qquad (2.30)$$

Пояснення коефіцієнтів, що входять до математичної моделі:

$\lambda_{кр}$ – інтенсивність відмов, обумовлена кристалом;

$\lambda_{корп}$ – інтенсивність відмов, пов’язана з відмовами корпуса;

$\lambda_б^{(ком)}$ – інтенсивність відмов контактора, що приходиться на одну

комутацію;

$\lambda_{б}^{(ки)\cdot}$ – базова інтенсивність відмов комунікаційного вироба в цілому;

$\lambda_{б}^{(вкл)}$ – додаткова інтенсивність відмов вироба, що припадає на одне вмикання;

k_E – коефіцієнт експлуатації, що враховує ступінь жорсткості умов експлуатації;

k_Q – коефіцієнт якості, враховує ступінь жорсткості вимог до контролю якості та правил приймання елементів в умовах виробництва;

k_L – тривалість промислового виробництва ІМС;

F –середня частота перемикань, F=600;

k_t – коефіцієнт температурного режиму, враховує значення температури елемента.

Коефіцієнт, що враховує вплив температури, може бути отриманий за моделлю:

$$k_t = 0{,}1\exp\left[\frac{-E_a}{8.617\cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{T_{êð}+273}-\frac{1}{298}\right)\right], \qquad (2.31)$$

де Еа - енергія активації , Еа=0,4 еВ.

$T_{кр}$ –температура кристала.

$$T_{кр}=T_{корп}+R_{корп}P=40+20\cdot 0{,}6=52°. \qquad (2.32)$$

$$k_t = 0{,}1\exp\left[\frac{-0{,}4}{8.617\cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{52+273}-\frac{1}{298}\right)\right]=0{,}1e^{1{,}294}=0{,}1\cdot 3{,}65=0{,}365.$$

k_P – коефіцієнт режиму роботи, що залежить від електричного завантаження,

k_F – коефіцієнт, що враховує число комутацій на годину:

$$k_F = 0{,}5 + 0{,}25 \lg F = 0.5 + 0.25 \lg 600 = 1{,}2; \qquad (2.33)$$

$k_П$ – коефіцієнт приймання;

k_K – коефіцієнт, що залежить від кількості задіяних контактів;

N – кількість контактів.

$$k_k = 0{,}42 + 0{,}24N.$$

Експлуатаційна інтенсивність відмов програмованого логічного контролера:

$$\lambda э = (0{,}56 \cdot 0{,}365 + 2{,}8 \cdot 8) \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 226 \cdot 10^{-6} \text{ 1/годину.}$$

Експлуатаційна інтенсивність відмов електронної плати (командоконтроллер VNSO):

$$\lambda e = 0{,}18 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}44 \cdot 3 \cdot 5 = 9{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/годину.}$$

Експлуатаційна інтенсивність відмов контактора Z-SCH230/63-40 :

$$k_P = A \exp\left[\left(\frac{t_{îêð} + 273}{N_T}\right)^G\right] \exp\left[\left(\frac{K_H}{N_S}\right)^H\right],$$

де A, N_T, G, N_S, H – постійні коефіцієнти [16].

$$k_P = 0{,}1951 \exp\left[\left(\frac{35 + 273}{352}\right)^{15{,}7}\right] \exp\left[\left(\frac{0{,}8}{0{,}8}\right)^2\right] = 0{,}26.$$

k_k =0,42+0,24N=0,42+0,24·4=1,38;

λe =0,01· 6· 0,26· 3 + 0,007· 600 · 0,26·1,38· 3 =4,56·10^{-6} 1/годину.

Експлуатаційна інтенсивність відмов модуля(проектний варіант):

$\lambda_м$ =(226+4,56·29+9,3·3) ·10^{-6} =386·10^{-6} 1/годину.

Наработка модуля на відмову:

$$T = \frac{1}{\lambda e} = \frac{1}{386 \cdot 10^{-6}} = 2589 \text{ годин}$$

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

$$Р_м(t_р) = e^{\frac{-t_Д}{T}} = e^{\frac{-5000}{2589}} = 0,145.$$

Експлуатаційна інтенсивність відмов кулачкового командоконтролера (базовий варіант):

λe =(0,075·1,27· 2 + 0,0027· 14·600) 10^{-6} · 1,34·15· 1,2=395·10^{-6} ,

де $к_р = 7\left[\left(\frac{t_{îêð} + 273}{398}\right)^{12}\right]\exp(1,25K_H)^2 = 7\left[\left(\frac{35+273}{398}\right)^{12}\right]\exp(1,25\cdot 1)^2 = 1,34$.

Наработка елемента на відмову:

$$T = \frac{1}{\lambda_э} = \frac{1}{395 \cdot 10^{-6}} = 2529 \text{ годин;}$$

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

$$Р_м(t_р) = e^{\frac{-t_P}{T}} = e^{\frac{-5000}{2529}} = 0,138$$

Таблиця 2.3 – Результати визначення коефіцієнтів надійності електричної принципової схеми

	$\lambda б \cdot 10^{-6}$ 1/ч	k_t	k_E	k_Q	k_L	k_F	$K_к$	$k_П$	$\lambda э \cdot 10^{-6}$ 1/ч	N_i
ПЛК	0,56/2,8	0,365	8	10	1				226	1
контактор	0,01/0,0007		6			1,2	1,38	3	4,56	29
джойстик	0,18	3,44	3					5	9,3	3
Кулачковий командоконтролер	0,075/0,0027		1,2			1,27	2	15	395	3

Таблиця 2.4 – Імовірність безвідмовної роботи системи керування приводом в базовом и проектном варіантах

Години	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Проектна схема	0,679	0,462	0,314	0,213	0,145	0,0986	0,067	0,0455	0,031	0,021
Базова схема	0,673	0,453	0,305	0,206	0,138	0,093	0,063	0,42	0,028	0,19

На рисунку Г.2 додатку Г наведений графік залежності імовірності безвідмовної роботи системи керування електроприводом Рм за час Т у базовому (а) та проектному варіантах (б).

3 Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран

3.1. Охорона праці

Темою даної випускної кваліфікаційної роботі бакалавра є: «Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран.» Тому в даному розділі дипломного проекту розглянуто основні шкідливості та небезпеки машинного відділення цеху.

3.1.1 Загальна характеристика умов праці

Машинне відділення цеху згідно з норм ДСП 173-96 [24] відноситься до підприємств I класу небезпеки виробництва тому розмір санітарно-захисної зони повинен бути не менш 1000 метрів.

Всередині будівлі колесопрокатного цеху розміщуються електромашинні приміщення або машинні зали, де встановлені основні силові двигуни, перетворювалювального пристрою, апаратура управління і ін. Усередині цехів розміщуються також багаточисельні. приміщення станції управління (ПСУ), пости керування (ПК) і ін. У спеціальних підвальних приміщеннях влаштовуються центральні мастильні станції (маслопідвали) і станції автоматичного густого змазування.

Небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при прокатці металів, у першу чергу обумовлені її видом, устаткуванням і робочими засобами.

Виробничий процес по характеру роботи, що виконується згідно ГОСТ 12.1.005-88 [25] та ДСН 3.3.6.042-99 [26] відноситься до категорії середньої тяжкості IIа, при яких витрата енергії дорівнює 176-232 Вт (151-200 ккал/год.).

Технологічні операції виконуються в несприятливих кліматичних умовах (високі температури робочої зони, теплові випромінювання, загазованість, запиленість і тому подібне). Тому в кабіну управління і пульт управління подається очищене (кондиційоване) повітря, для подачі якого в кабіні встановлено кондиціонер в пожежобезпечному виконанні. Підлога, стеля, стіни і двері кабіни утеплені і звукоізольовані, а також для запобігання замерзання стекол кабіна обладнана опалювальною установкою безпечною в пожежному відношенні.

Допустимі і фактичних величини метеоумов в робочій зоні відповідно до [25] і [26] приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Метеорологічні умови в робочій зоні (факт/доп)

Професія	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с, не більше	
		Холодний період	Теплий період	Холодний період	Теплий період	Холодний період	Теплий період
Оператор крана	IIа	18-19/ 17-23	22/ 18-27	40-60/ 75	40-60/ 65 при 26 °С	0,2/ <0,3	0,25/ 0,2-0,4

Висока запиленість повітря призводить до легеневих захворювань – пневмоконіоз. Рівень запиленості повітря робочої зони не повинен перевищувати 6 мг/м^3 [25]. Вміст пилу в робочій зоні машинного відділення склав 10 мг/м^3.

На крані має місце загальна вібрація, яка передається через опорні поверхні на тіло сидячої людини і за джерелом її виникнення є транспортно-технологічною.

Фактичні і допустимі значення параметрів транспортно-технологічної вібрації згідно ДСН 3.3.6.039-99 [27] наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Фактичні і допустимі значення параметрів вібрації

Середньогеометричні значення частот, Гц	2	4	8	16	31,5	63
Віброшвидкості м / с.						
Фактична	0,64	0,23	0,12	0,12	0,12	0,12
Допустима	1,3	0,45	0,22	0,20	0,20	0,20

Вібрація, відповідає допустимим параметрам і не перевищує критичних параметрів.

Основним джерелом шуму при роботі крана є працюючий двигун. Згідно ДСН 3.3.6.037-99 [28] допустимий рівень звукового тиску 80 дБ, фактичний рівень шуму – 85 дБ.

Згідно ДБН В.25-28-2006 [29] робота наладчика крану відноситься до V розряду зорової роботи, який характеризується роботою малої точності.

Параметри природного і штучного освітлення приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 -Параметри природного і штучного освітлення

Розряд зорової роботи	Природне освітлення			Штучне освітлення			
	Район по ресурсам світового клімату	m, коеф. Світового клімату	ЕО, N, %	Освітленність,Е, лк		Пок. Освітленності Р	Коеф пульс., %
				Нормативне значення	Фактичне значення		
V	1	1	3	200	165	40	20

Окрім вказаних шкідливостей на ділянці є частини механізмів, що обертаються, які можуть травмувати персонал, що не дотримується правил охорони праці. Всі рухомі деталі, що обертаються, захищені.

3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

Згідно із НПАОП 0.00-4.12-05 [30], робітники, які не пройшли навчання та інструктаж та перевірку знань із питань охорони праці, не допускаються до роботи. Саме роботодавець є відповідальною особою з приводу організації та здійснення інструктажів з питань охорони праці, а також перевірки працівників. У Типовому положенні про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці визначені усі види та проведення інструктажів із охорони праці.

Інструктажі із питань охорони праці бувають вступні, первинні, повторні, позапланові та цільові. Спочатку проводиться вступний інструктаж. Його проводять для всіх категорій робітників і для студентів, практикантів. Проведений інструктаж відмічають у спеціальному журналі.

Первинний інструктаж проводить тільки особа, яка є відповідальною з питань техніки безпеки. Його проводять для всіх робітників конкретної ділянки. Звіт про інструктаж заносять у журнал інструктажів, так само, як і при вступному інструктажі.

Позаплановий інструктаж проводиться особою, відповідальною за техніку безпеки. Звіт про інструктаж вноситься у той самий журнал.

Мостовий кран призначений для роботи в цеху від 3-х фазного змінного струму напругою 380 В і частотою 50 Гц. Попадання людини під напругу може відбутися при обриві проводу, порушенні ізоляції, оголенні проводів і пуску регулювальної апаратури.

Згідно ПУЕ [31] прийнято, що напруга силових електричних кіл в машинному приміщенні не вище 660 В, у виробничих приміщеннях – не вище 220 В. Електропроводка виконана ізольованими проводами. Кабели й шланги трубопроводу розміщені і укріплені таким чином, щоб при русі візка виключалася можливість їх зачеплення за конструкції, які знаходяться в

прокатному цеху. Для захисту електродвигуна крана від короткого замикання застосовані автоматичні вимикачі з електромагнітними і тепловими розцепителями. Кола керування, освітлення і сигналізації крана мають захист від коротких замикань.

По електричній небезпеці, згідно ПУЕ, ділянка відноситься до категорії особливо небезпечних приміщень, оскільки в цеху є струмопровідні підлоги (сталеві плити R=100 Ом); пил оксидів заліза, висока температура повітря в теплий період року. По доступності устаткування цех відноситься до виробничих приміщень, по напрузі – до 1000 В.

Причинами ураження електричним струмом є:

- дія електричного струму через дугу;

- дотик до відкритих струмопровідних частин, ізоляція яких пошкоджена;

- дотик до струмопровідних частин через предмети з низьким опором ізоляції;

- дія крокової напруги і інше.

Виробничий процес в колесопрокатному цеху за вибуховою, вибухопожежною і пожежною небезпекою згідно з НАПБ Б.03.002-2007 відноситься до категорії «Г», тому що обробці піддаються негорючі матеріали в розпеченому стані [32].

Будівлю цеху побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій, цегли, залізобетону, скла і ін.) і, згідно ДБН В.1.1-7-2002, вона має II ступінь вогнестійкості [33].

Пожежі в машинному відділені можуть виникнути в результаті:

- загоряння електрообладнання при перевантаженнях, перегрівах і коротких замиканнях (клас пожежі − Е);

- загоряння паливно-мастильних матеріалів при попаданні в них іскор електричного або механічного походження, впливу тепла від нагрітих предметів, під впливом відкритого вогню (клас пожежі − В);

- самозайманння промасленого ганчір'я (клас пожежі − А);

- дії статичного чи грозового розряду.

Для забезпечення пожежної безпеки використовуються наступні заходи: вся апаратура управління розміщена в герметизованому контейнері, електродвигуни всіх механізмів мають ступінь захисту від зовнішнього середовища. Електроприводи кранів мають глибоке регулювання швидкостей. У зв’язку з цим навантаження на гальма мінімальне, температура гальмівних колодок в робочому режимі не перевищує допустиму, резистори обрані з стандартних блоків з розрахунком, щоб температура поверхні активних частин не перевищувала 185 °С. З метою забезпечення пожежної безпеки на пульту передбачено вуглекислотний вогнегасник, який використовується з метою гасіння електропроводки та електрообладнання.

Для гасіння пожеж водою використовується пожежний водопровід, об'єднаний з виробничим. На його мережі у приміщенні цеху встановлені пожежні крани з брезентовими рукавами і відводами. Зовні будівлі по її периметру в підземних колодязях розміщені пожежні гідранти. Для доступу на дах будівлі використовуються пожежні сходи, укріплені на стінах. Для гасіння можливих пожеж в цеху (відділі, ділянці, лабораторії) передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначаються на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004 [34].

Пожежною сигналізацією обладнанні всі приміщення цеху.

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра на тему: «Аналіз роботи та підвищення ефективності електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 10 т

» виконана реконструкція електропривода шляхом інтеграції в існуючу систему керування асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором з реостатним регулюванням програмованого логічного контролера SIMATIC S7-200.

В основній частині роботи проведено розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна.

Було обрано електродвигун змінного струму з фазним ротором потужністю 30 кВт, частотою обертання n = 970 хв$^{-1}$, з моментом інерції $J_р$=0,675 Н·м·с^2.

Було розроблено технічне рішення з реконструкції схеми управління механізмом. Застосування нового органу управління – командоконтролера (джойстикового типу) VNSO заміст існуючого командоконтролера.

Контролер без принципових змін може бути інтегрований в існуючу систему управління.

В розділі Охорона праці та захист навколишнього середовища особлива увага приділена робочому місцю оператора крана і машинному відділенню – місць, де ймовірність виробничого травматизму найбільш значна.

Розглянуті питання умов праці в цеху. Технічні та організаційні заходи на ділянці роботи крану спрямовані на забезпечення недоступності до струмоведучих частин і неможливості випадкового дотику до них, усунення небезпеки поразки при замиканні струму на корпус електрообладнання або землю, запобігання помилкових дій персоналу електроустановок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Марченко А. П., Міщенко М. Т., Будьонний М. М. Особливості експлуатації автомобілів з електроприводом в сучасних умовах розвитку енергетичної галузі в Україні //ІІІ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ МОРСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ КАФЕДРИ СЕУ І ТЕ ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ. – 2021. – С. 346

2. Інструкція з експлуатації мостового крана вантажопідйомністю 10 тон.

3. Монахов Є. А. XXI СТОРІЧЧЯ І ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ //Міжнародний науково-технічний журнал" Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 386-388.

4. Грищук Ю. С. Мікроконтролери: архітектура, програмування та застосування в електромеханіці. – 2019.-256 с.

5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник/ за ред. А. Г. Соскова.– К.: Каравела, 2006.– 384 с.

6. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін; за ред. В. І. Мілих. – К.: Каравела, 2007. – 688 с.

7. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин //ВС Ловейкін, ЮО Ромасевич. – 2012. Київ. 236 с.

8. Любін М.В., Токарчук О.А., Єленіч М.П. Розрахунки підіймальних механізмів та машин. Навчальний посібник. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця. 2013. URI: http://repository.vsau.org/repository/getfile.php/5983.pdf

9. Pichugin S.F. Comparative analysis of loads from the travelling cranes of different producers / S.F. Pichugin, Iu.E. Patenko, S.A. Maslova // International Journal of Engineering & Technology. - 2018. - Vol. 7, No 3.2, [S.I. 2]. - P. 36-39

10. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів.Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 –Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка)/ Т.П. Павленко, О.В. Донець, О.М. Петренко;Харків. нац. ун-тміськ. госп-ваім. О.М. Бекетова. –Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. –132с.

11. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств :підручник / В. І. Мілих, Т. П. Павленко. –Харків: НТУ «ХПІ», 2016. –272 с.

12. Одновісний командоконтролер (джойстик) S14 W. GESSMANN GMBH (Гессманн). Електронний ресурс.-Режим доступу: http://geonorma.promobud.ua/ua/odnovisnij-komandokontroler-dzhojstik-s14-w.-gessmann-gmbh-g-p304827.htm.

13. Інтелектуальне реле SIMATIC S7-200.-Електронний ресурс.

14. A. Kosucki, Ł. Stawiński, P. Malenta, J. Zaczyński, J. Skowrońska Energy Consumption and Energy Efficiency Improvement of Overhead Crane’s Mechanisms // Eksploatacja i Niezawodność. — 2020. — Vol. 22. — P. 322–330.

15. A. Céspedes-Cubides, M. Jradi A Review of Building Digital Twins to Improve Energy Efficiency in the Building Operational Stage // Energy Informatics. — 2024. — Vol. 7. — Article 13.

16. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та ін.; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

17. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Коренькова Т.В. Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики // Міжнар. наук.–техн. конф. «Проблеми

автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.

18. P. Zajac, T. Rozic Energy Consumption of Forklift versus Standards, Effects of Their Use and Expectations // Energy. — 2022. — Vol. 239. — Article 122187.

19. S. Perotti, L. Cannava, B. Najafi, E. Gronda, F. Rinaldi Sustainable and Energy-Efficient Industrial Systems: Modelling the Environmental Impact of Logistics Facilities // Lecture Notes in Business Information Processing. — 2024. — Vol. 507. — P. 146–157. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Навчальний посібник. – 2-ге вид. перероб. та доповнене/В.Г. Рудницький. – Київ:Освіта України, 2013.-287 с.

20. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. Та доп./Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен/За ред. Академіка НАН України Г.Г. Півняка.-Дніпропетровськ:Видавництво НГА України, 2000.-597 с.

21. Черемісін М. М. и др. Перехідні процеси в системах електропостачання //Харків: Факт. – 2005.

22. V. Anand, S. Lee, V. Prabhu Energy-Aware Models for Warehousing Operations // IFIP Advances in Information and Communication Technology. — 2014. — Vol. 439. — P. 390–397.

23. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. № 379/1404.

24. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. − М.: Изд-во стандартов, 1990.

25. ДСН 3.36.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: Держстандарт, 1999. – 31 с.

26. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. – К.: Держстандарт, 1999.

27. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – К.: Держстандарт, 1999.

28. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. – К.: Мінбуд України, 2006.

29. НПАОП 0.00–4.12.05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. – К.: Держнаглядохоронпраці, 2005.

30. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2009. − Х.: Форт, 2009.

31. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Укр. НДІПБ, 2007.

32. ДБН В.1.1.7-2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об′єктів будівництва. − К.: Держбуд України, 2003.

33. НАПБ Б.03.001-2004. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. К.: МНС України, 2004.

34. РЕГІОНАЛЬНА ДОПОВІДЬ про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2016 рік. –Дніпро, 2017.

Додаток А

Схема електрична принципова електропривода механізму підйому мостового крана до реконструкції

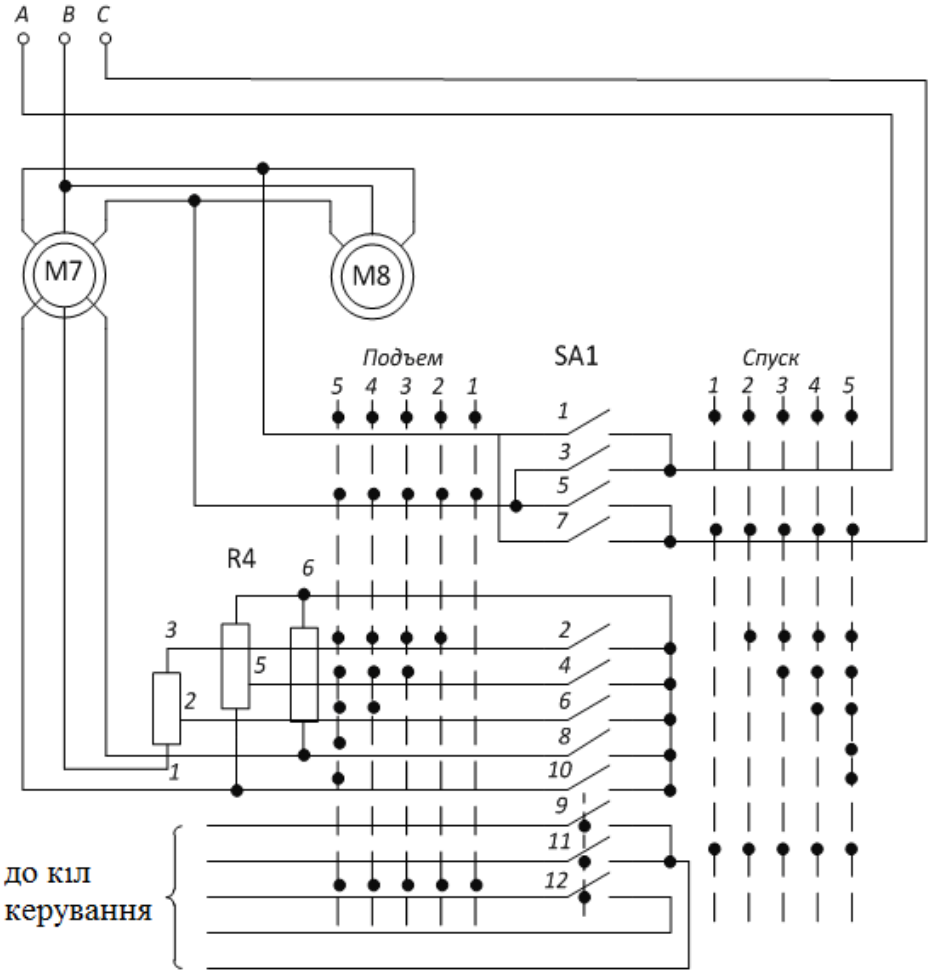


Рисунок А.1 − Фрагмент силової схеми живлення привода підйому

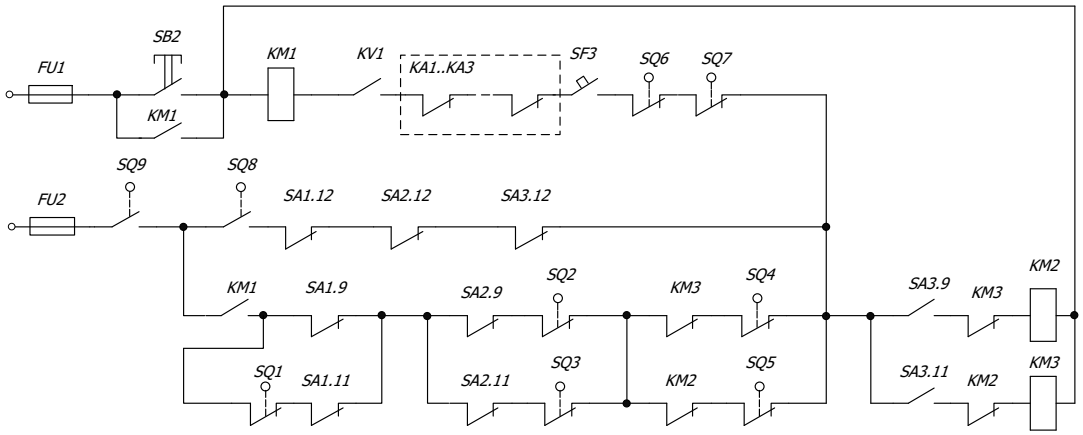


Рисунок А.2 − Схема кіл керування краном

Додаток Б

Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 7 \quad M1 \equiv 0.85 \cdot Mkr \quad M1 = 1.366 \times 10 \quad \lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn \cdot M1}} \quad \lambda = 1.308 \quad M2 \equiv \frac{M1}{\lambda} \quad M2 = 1.044 \times 10^3$

$Rr1 \equiv R2 \cdot \lambda \quad Rr2 \equiv R2 \cdot \lambda^2 \quad Rr3 \equiv R2 \cdot \lambda^3 \quad Rr4 \equiv R2 \cdot \lambda^4 \quad Rr5 \equiv R2 \cdot \lambda^5 \quad Rr6 \equiv R2 \cdot \lambda^6 \quad Rr7 \equiv R2 \cdot \lambda^7 \quad s1 \equiv sn \cdot \frac{M1}{Mn \cdot \lambda}$

$Rr1 = 0.193 \quad Rr2 = 0.252 \quad Rr3 = 0.33 \quad Rr4 = 0.432 \quad Rr5 = 0.565 \quad Rr6 = 0.739 \quad Rr7 = 0.967 \quad s1 = 0.117$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

$\omega1 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr1}{R2}\right)}{30} \quad \omega2 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr2}{R2}\right)}{30} \quad \omega3 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr3}{R2}\right)}{30}$

$\omega4 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr4}{R2}\right)}{30} \quad \omega5 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr5}{R2}\right)}{30} \quad \omega6 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr6}{R2}\right)}{30} \quad \omega7 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr7}{R2}\right)}{30}$

$\omega1 = 88.741 \quad \omega2 = 83.818 \quad \omega3 = 77.378 \quad \omega4 = 68.954 \quad \omega5 = 57.935 \quad \omega6 = 43.52 \quad \omega7 = 24.665$

Расчет напряжений, токов и моментов

$U1\alpha(u) \equiv Um \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad U1\beta(u) \equiv Um \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi)$

$I1\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_1 - Lm \cdot u_3) \quad I1\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_2 - Lm \cdot u_4)$

$U2\alpha(u) \equiv 0 \quad U2\beta(u) \equiv 0$

$I2\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_3 - Lm \cdot u_1) \quad I2\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_4 - Lm \cdot u_2)$

$M(u) \equiv \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot Lm \cdot k\sigma \cdot (u_2 \cdot u_3 - u_1 \cdot u_4)$

$Mc(u) \equiv \begin{cases} Mr & \text{if } u_5 > 0 \\ -Mr & \text{otherwise} \end{cases}$

$U1\alpha(u) \equiv Um \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad U1\beta(u) \equiv Um \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad I1\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_1 - Lm \cdot u_3) \quad I1\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_2 - Lm \cdot u_4)$

$U2\alpha(u) \equiv 0 \quad U2\beta(u) \equiv 0 \quad I2\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_3 - Lm \cdot u_1) \quad I2\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_4 - Lm \cdot u_2)$

$M(u) \equiv \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot Lm \cdot k\sigma \cdot (u_2 \cdot u_3 - u_1 \cdot u_4) \quad Mc(u) \equiv \begin{cases} Mr & \text{if } u_5 > 0 \\ -Mr & \text{otherwise} \end{cases}$

Расчет статической механической характеристики $so := 0$

$statica(so) := \left| \begin{array}{l} s_{0,0} \leftarrow so \\ V_{0,0} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad s_{i,0} \leftarrow \frac{i}{n} \\ \quad V_{i,0} \leftarrow \frac{\pi \cdot (1 - s_{i,0}) \cdot no}{30} \\ \quad Rr \leftarrow \left| \begin{array}{l} Rr7 \text{ if } V_{i,0} < \omega7 \\ Rr6 \text{ if } \omega7 \le V_{i,0} < \omega6 \\ Rr5 \text{ if } \omega6 \le V_{i,0} < \omega5 \\ Rr4 \text{ if } \omega5 \le V_{i,0} < \omega4 \\ Rr3 \text{ if } \omega4 \le V_{i,0} < \omega3 \end{array} \right. \end{array} \right.$

$Rr(u) \equiv \begin{cases} Rr7 & \text{if } u_5 < \omega7 \\ Rr6 & \text{if } \omega7 \le u_5 < \omega6 \\ Rr5 & \text{if } \omega6 \le u_5 < \omega5 \\ Rr4 & \text{if } \omega5 \le u_5 < \omega4 \\ Rr3 & \text{if } \omega4 \le u_5 < \omega3 \\ Rr2 & \text{if } \omega3 \le u_5 < \omega2 \\ Rr1 & \text{if } \omega2 \le u_5 < \omega1 \\ R2 & \text{otherwise} \end{cases}$

Додаток В

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів

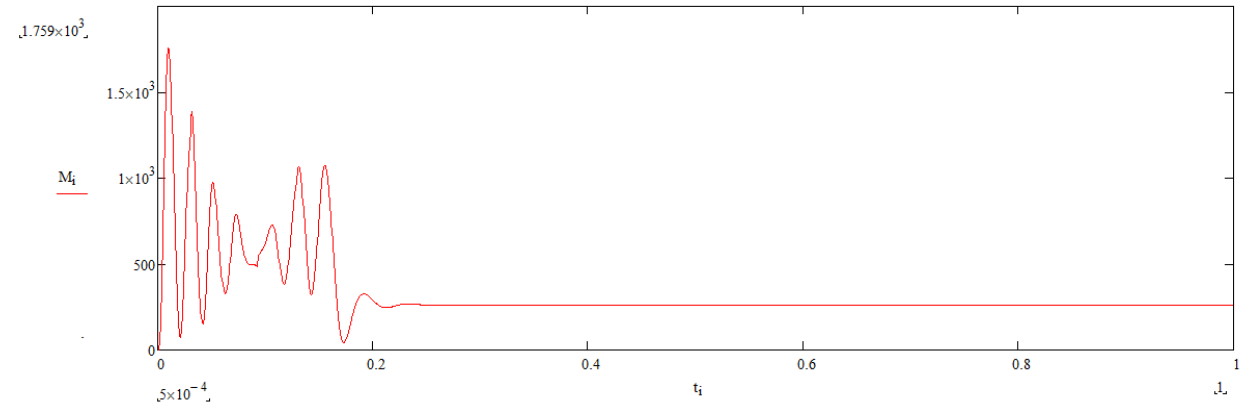


Рисунок В.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

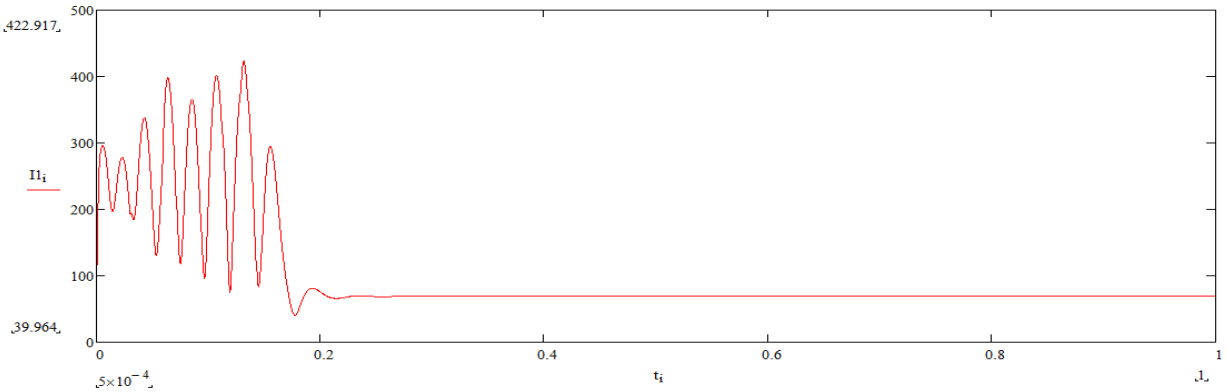


Рисунок В.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

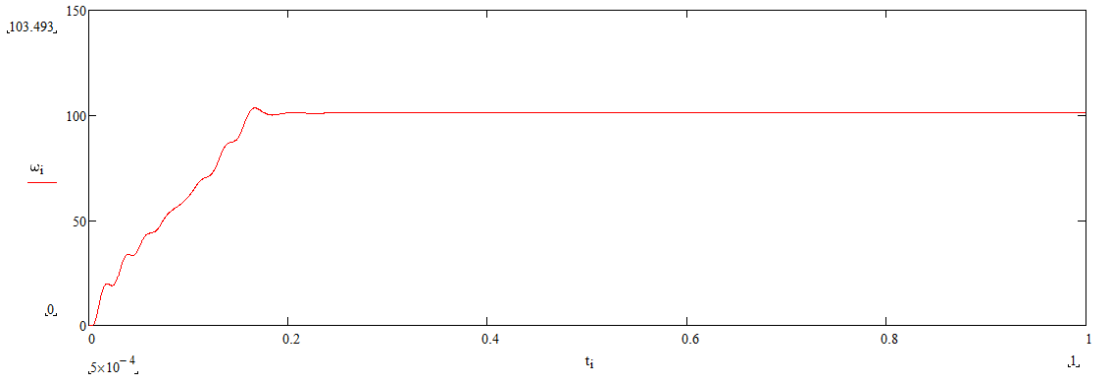
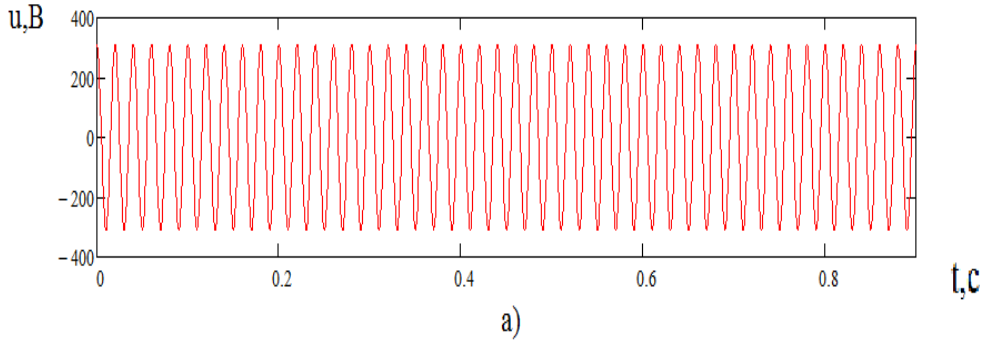


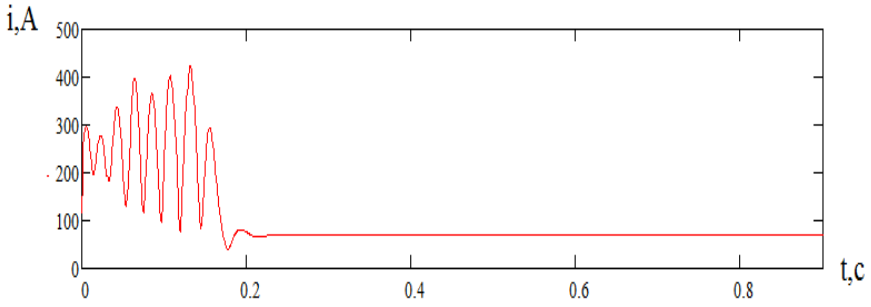
Рисунок В.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Г

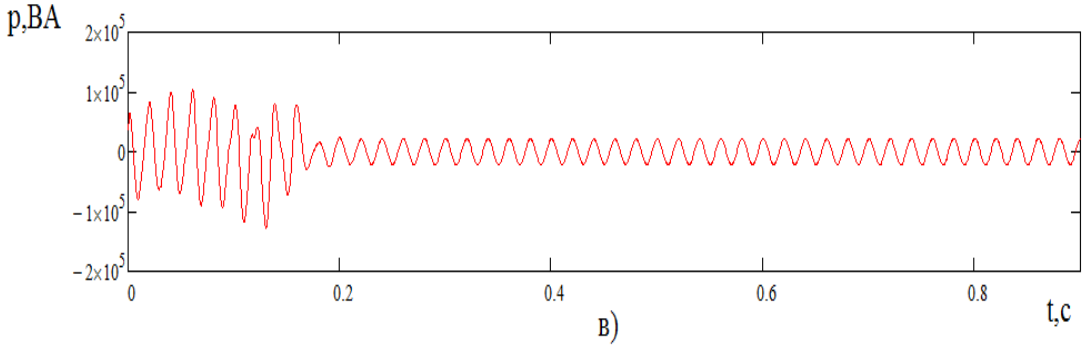
Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна



а)



б)



в)

Рисунок Г.1 − Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=7

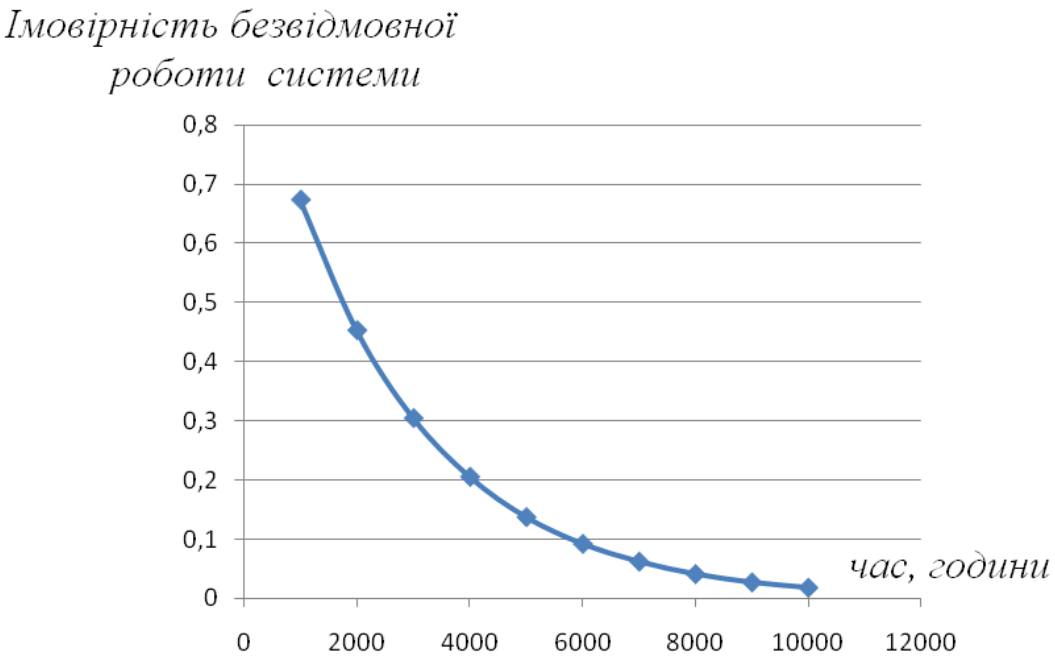


Рисунок Г.2 (а) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у базовому варіанті

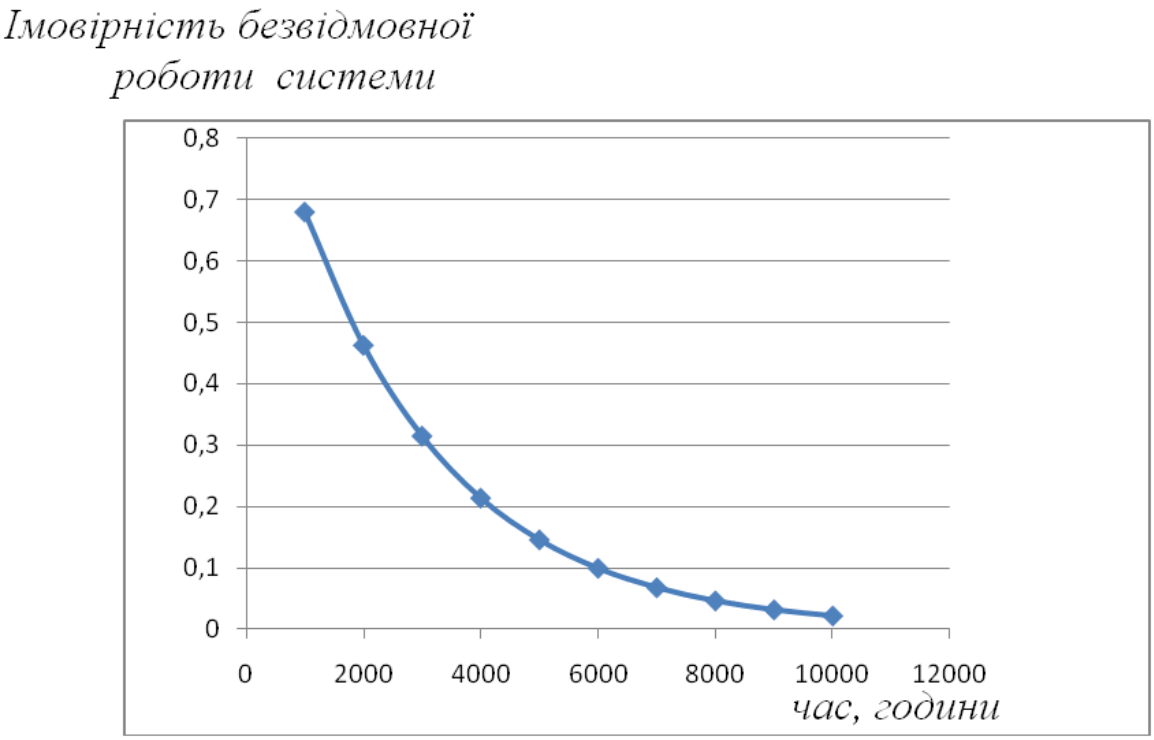


Рисунок Г.2 (б) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у проектному варіанті