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 та вдосконалення системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 т на базі ПЛК ZELIO

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.А. Шевченко
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Дьяченко В.В.
(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. Завідувача кафедри
к.т.н., доц. Д.М. Морозов
«_____» _____ 2026 року

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

Шевченко Євген Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: наліз та вдосконалення системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 т на базі ПЛК ZELIO
керівник роботи Дьяченко В.В., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від « 23 » 12 2025 року № 1833 - с
2 Строк подання студентом роботи 20 травня 2026 р.
3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування мостового крану 2) Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні 3) Охорона праці та захист навколишнього середовища.
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

6 Консультанти розділів роботи

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

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування мостового крану	10.03.2026	
2	Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні	10.04.2026	
3	Охорона праці та захист навколишнього середовища	15.05.2026	

Студент _____ Є.А. Шевченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.В. Дьяченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Шевченко Євген Анатолійович: Тема роботи: Аналіз та вдосконалення системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 т на базі ПЛК ZELIO

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

У випускній кваліфікаційній роботі розглянуто актуальне питання реконструкції системи керування електроприводом механізму пересування мостового крану вантажопідйомністю 10 тонн». Робота присвячена підвищенню надійності, безпеки та енергоефективності електроприводу шляхом модернізації існуючої релейно-контактної системи керування та впровадження сучасних засобів автоматизації на базі програмованого логічного контролера Zelio компанії Schneider Electric.

У сучасних умовах розвитку промислового виробництва мостові крани є невід’ємною частиною технологічних процесів, пов’язаних із транспортуванням і переміщенням великогабаритних вантажів. Від ефективності та безперебійної роботи механізмів пересування крана значною мірою залежать продуктивність підприємства, безпека персоналу та економічні показники виробництва. Саме тому модернізація систем електроприводу вантажопідйомних механізмів є важливим напрямом розвитку сучасної електромеханіки та автоматизації промислових процесів.

У роботі проведено аналіз технологічного процесу, у якому бере участь мостовий кран, а також досліджено конструктивні особливості його електроприводу. Детально розглянуто принцип дії електричної схеми керування механізмом пересування мосту, виконано аналіз існуючої системи реостатного пуску асинхронного двигуна з фазним ротором та визначено її основні недоліки. До таких недоліків віднесено значні габарити релейно-контактної апаратури, необхідність постійного технічного обслуговування, зношування контактних елементів та недостатній рівень автоматизації процесу керування.

Основною метою роботи стала розробка технічного рішення щодо реконструкції системи керування електроприводом шляхом заміни контактних елементів безконтактними пристроями та інтеграції програмованого логічного контролера. У процесі виконання роботи було здійснено розрахунок потужності привідного електродвигуна, визначено статичні та динамічні навантаження механізму пересування, а також обґрунтовано вибір асинхронного двигуна типу MTF-121-6 потужністю 6,3 кВт.

Особливу увагу приділено дослідженню перехідних процесів під час пуску асинхронного двигуна з фазним ротором. Для цього було створено математичну модель електроприводу у програмному середовищі Mathcad, що дозволило провести аналіз механічних характеристик системи та оцінити вплив кількості ступенів пускових резисторів на якість пускових режимів. У роботі порівняно режими пуску із п’ятьма та сімома ступенями резисторів і встановлено, що багатоступеневий пуск забезпечує зменшення пускових струмів, ударних навантажень і втрат електроенергії.

У результаті виконаної реконструкції було запропоновано використання твердотільних реле серії SSRP, сучасного джойстикового командоконтролера та програмованого логічного контролера Zelio Logic. Запропоновані технічні рішення дозволяють значно підвищити надійність роботи електроприводу, покращити ергономічність системи керування, зменшити витрати на

обслуговування та забезпечити більш високий рівень безпеки експлуатації мостового крана.

Окремий розділ роботи присвячено питанням охорони праці та захисту навколишнього середовища. Проведено аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів у цеху, розглянуто вимоги до мікроклімату, освітлення, рівня шуму та вібрацій, а також запропоновано заходи щодо покращення умов праці персоналу.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для модернізації реальних систем електроприводів мостових кранів на промислових підприємствах. Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню ефективності виробництва, забезпечують стабільність роботи обладнання та відповідають сучасним вимогам автоматизації промислових процесів.

Ключові слова: мостовий кран, електропривод, програмований логічний контролер, ПЛК ZELIO, асинхронний двигун з фазним ротором, релейно-контактна система керування, автоматизація, перехідні процеси, твердотільне реле, енергоефективність, механізм пересування крана, промислова автоматизація, математичне моделювання, електромеханічна система.

ABSTRACT

Shevchenko Yevhen Anatoliiovych. Topic of the qualification thesis: Analysis and Improvement of the Control System of the Electric Drive of the Traveling Mechanism of a 10-Ton Overhead Crane Based on the ZELIO PLC.

Bachelor's qualification thesis for obtaining the higher education degree in Specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". Scientific supervisor – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor V.V. Diachenko. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, part-time form of education, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2026.

The bachelor's qualification thesis considers the urgent issue of reconstruction of the control system of the electric drive of the traveling mechanism of a 10-ton overhead crane. The work is devoted to increasing the reliability, safety, and energy efficiency of the electric drive through modernization of the existing relay-contact control system and implementation of modern automation tools based on the ZELIO programmable logic controller manufactured by Schneider Electric.

Under modern conditions of industrial production development, overhead cranes are an integral part of technological processes associated with transportation and movement of heavy and oversized loads. The productivity of an enterprise, personnel safety, and economic efficiency of production largely depend on the efficient and uninterrupted operation of crane traveling mechanisms. Therefore, modernization of electric drive systems of lifting and transport equipment is an important direction in the development of modern electromechanics and industrial automation.

The thesis analyzes the technological process involving the overhead crane and investigates the design features of its electric drive. The operating principle of the electrical control circuit of the crane traveling mechanism is considered in detail. An

analysis of the existing rheostatic starting system of the wound-rotor induction motor was carried out, and its main disadvantages were identified. These disadvantages include large dimensions of relay-contact equipment, the need for constant maintenance, wear of contact elements, and an insufficient level of automation of the control process.

The main purpose of the work was the development of a technical solution for reconstruction of the electric drive control system by replacing contact elements with contactless devices and integrating a programmable logic controller. During the research, calculations of the drive motor power were performed, static and dynamic loads of the traveling mechanism were determined, and the selection of the MTF-121-6 wound-rotor induction motor with a rated power of 6.3 kW was substantiated.

Special attention was paid to the study of transient processes during the starting of the wound-rotor induction motor. For this purpose, a mathematical model of the electric drive was developed in the Mathcad software environment, which made it possible to analyze the mechanical characteristics of the system and evaluate the influence of the number of starting resistor stages on the quality of starting modes. The work compares starting modes with five-stage and seven-stage resistors and establishes that multistage starting ensures reduction of starting currents, shock loads, and energy losses.

As a result of the reconstruction, the use of SSRP series solid-state relays, a modern joystick-type master controller, and the Zelio Logic programmable logic controller was proposed. The proposed technical solutions significantly increase the reliability of the electric drive, improve the ergonomics of the control system, reduce maintenance costs, and ensure a higher level of operational safety of the overhead crane.

A separate section of the thesis is devoted to occupational safety and environmental protection. An analysis of harmful and hazardous production factors in the workshop was carried out, requirements for microclimate, lighting, noise, and

vibration levels were considered, and measures aimed at improving working conditions for personnel were proposed.

The practical significance of the thesis lies in the possibility of using the obtained results for modernization of real electric drive systems of overhead cranes at industrial enterprises. The proposed technical solutions contribute to increasing production efficiency, ensuring stable equipment operation, and meeting modern requirements for industrial automation systems.

Keywords: overhead crane, electric drive, programmable logic controller, ZELIO PLC, wound-rotor induction motor, relay-contact control system, automation, transient processes, solid-state relay, energy efficiency, crane traveling mechanism, industrial automation, mathematical modeling, electromechanical system.

ЗМІСТ

ВСТУП……12
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА, У СТРУКТУРІ ЯКОГО ФУНКЦІОНУЄ ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНУ ..15
1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування мостового крану ……15
1.2 Характеристика обладнання мостового крану, електропривод механізму пересування якого реконструюється, за схемами…….20
1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана ……20
1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану ……..21
1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму пересування мостового крану та формування вихідних даних……23
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ……...26
2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна……..26
2.1.1. Перевірка електродвигуна по тепловому режиму…….30
2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні…….....32
2.2.1 Мета реконструкції…….32
2.2.2 Початкова релейно-контактна схема і вимоги до реконструкції……...33
2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції…….35
2.2.3.1 Джойстик……..35
2.2.3.2 Твердотільне реле……35
2.2.3.3 Програмований логічний контролер (ПЛК)……..38
2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода…...39
2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором ……..39

2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступенями пускових резисторів ……41
2.3.3 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів ……46
2.4 Порівняльний аналіз втрат в електроприводі в перехідних режимах при пуску двигуна з п’ятьма та сьома ступенями пускових резисторів ……...46
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА…..…49
3.1 Охорона праці……49
3.1.1 Загальна характеристика умов праці……..…....49
3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……..52
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ……..56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..…….58
Додаток А. Схема електрична принципова електропривода механізму пересування мостового крана до та після реконструкції……62
Додаток Б. Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступенями пускових резисторів ……..64
Додаток В. Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п’ять ступенів……66
Додаток Г. Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів …….67
Додаток Д. Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів……..69
Додаток Е. Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна ……70

ВСТУП

Мостові крани виробляють більшу частину підйомно-транспортних робіт на різних підприємствах. Вони виконують не тільки обслуговуючі функції, але і нерідко включені безпосередньо в технологічний процес. Від їх надійної та безперебійної роботи залежать продуктивність підприємства, його техніко-економічні показники, безпека обслуговуючого персоналу.

Вирішення проблеми підвищення надійності та безпечної експлуатації мостових кранів в чому визначається особливостями і якісними показниками електроприводу (ЕП) механізму пересування крана, до якого пред'являють ряд жорстких вимог, найважливішими з яких є: забезпечення високої продуктивності, безперебійності в роботі, безпеки обслуговування, простота експлуатації і ремонту , тобто забезпечення «безпеки» та «живучості» [1].

Однією з ключових особливостей електроприводу механізму пересування крана є його потужність. Потужність приводу повинна бути достатньою для забезпечення плавного і ефективного руху крана, а також для перевезення великих навантажень без перебоїв. Вибір потужності залежить від розміру крана, його максимальної вантажопідйомності та швидкості руху. Відповідна потужність дозволяє забезпечити безперебійну роботу крана та зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Точність та плавність керування є ще одними важливими аспектами електроприводу механізму пересування крана. Система приводу повинна забезпечувати високу точність управління рухом крана. Це особливо важливо для розміщення вантажу в потрібному місці з мінімальною похибкою. Плавність руху також має велике значення для запобігання раптовим рухам або розбалансуванню крана, що може призвести до аварій.

Надійність є одним із ключових показників якості електроприводу механізму пересування крана. Система приводу повинна бути стійкою до впливу

зовнішніх факторів, таких як вібрація, пил, вологість та інші агресивні середовища. Надійність приводу включає в себе відсутність відмов та перебоїв у роботі, що дозволяє підвищити безпеку експлуатації крана та запобігти небезпечним ситуаціям, таким як випадкове падіння навантаження.

Енергоефективність є ще одним важливим якісним показником ЕП механізму пересування крана. Застосування енергоефективних приводів дозволяє знизити споживання електроенергії та витрати на його утримання. Це має велике значення в умовах постійного підвищення вартості енергоресурсів та збільшення уваги до екологічних питань. Енергоефективні приводи забезпечують оптимальне використання енергії та зменшують викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Окрім особливостей та якісних показників, важливо також враховувати фактори безпеки та підтримки. Електропривід механізму пересування крана повинен бути проектований з урахуванням вимог безпеки, таких як запобігання аварій, захист від перевантажень та системи аварійного зупинення. Крім того, надійна підтримка та сервісне обслуговування є важливими аспектами для забезпечення тривалої та безперебійної роботи ЕП механізму пересування крана.

Вирішення проблеми підвищення надійності та безпечної експлуатації мостових кранів залежить від розуміння та впровадження високих стандартів якості для електроприводу механізму пересування. Потужність, точність, плавність руху, надійність та енергоефективність є ключовими характеристиками, які сприяють підвищенню продуктивності та безпеки роботи крана. Оптимальне використання цих особливостей та показників дозволяє забезпечити надійну та безпечну експлуатацію мостових кранів в різних сферах діяльності.

В даний час для переважної більшості вантажопідіймальних кранів мостового типу в якості ЕП раціональним є використання асинхронного електроприводу (АЕП), як найбільш простого, дешевого і надійного.

У зв'язку з цим актуальним є розробка та дослідження АЕП механізму пересування мостових кранів з підвищеною безпекою і живучістю як єдиної електромеханічної системи в комплексі з сучасними системами на базі мікроконтролерного (МК) пристрою, що виконує не тільки функції захисту а й функції управління ЕП.

Метою даної роботи є реконструкція електропривода механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 тон шляхом інтеграції в існуючу систему керування асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором з реостатним регулюванням програмованого логічного контролера Zelio компанії SchneiderElectric, фірми Telemecanique та безконтактних реле ZelioRelay серії SSRP.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА, У СТРУКТУРІ ЯКОГО ФУНКЦІОНУЄ ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНУ

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

Мостовий кран вантажопідйомністю 10 т є важливим елементом внутрішньоцехового транспортного обладнання, що використовується для виконання широкого спектра вантажопідіймальних і транспортно-технологічних операцій у промисловому виробництві. Основним призначенням даного виду кранів є забезпечення механізованого підйому, переміщення та точного позиціювання великогабаритних, масивних і технологічно важливих вантажів у межах виробничих приміщень, складських зон та монтажних дільниць. Використання мостового крану дозволяє значно підвищити ефективність виробничих процесів, скоротити час виконання транспортних операцій, зменшити фізичне навантаження на персонал та забезпечити безпечне переміщення важких деталей і конструкцій.

Конструктивно мостовий кран являє собою складну електромеханічну систему, до складу якої входять металоконструкція мосту, вантажний візок, механізм підйому вантажу, механізм пересування візка, механізм пересування мосту, а також електрообладнання та система керування. У процесі роботи кран забезпечує вертикальний підйом і опускання вантажу за допомогою вантажопідіймального механізму, а також його горизонтальне транспортування у двох взаємно перпендикулярних напрямках — вздовж підкранових колій та поперек прольоту цеху. Така конструктивна особливість дозволяє обслуговувати практично всю робочу зону виробничого приміщення та виконувати точне позиціювання вантажів у заданих координатах.

Механізм пересування мостового крану виконує одну з ключових функцій у загальній структурі вантажопідіймальної системи. Саме він забезпечує переміщення мосту вздовж підкранових шляхів та дозволяє здійснювати транспортування вантажів між різними виробничими зонами. Робота механізму пересування супроводжується значними динамічними навантаженнями, частими пусками та гальмуваннями, змінами напрямку руху, а також впливом інерційних процесів, що виникають при переміщенні масивних вантажів. У зв’язку з цим до електроприводу механізму пересування висуваються підвищені вимоги щодо надійності, плавності пуску, точності керування та стійкості до перевантажень.

Електропривод механізму пересування мостового крану повинен забезпечувати стабільну роботу в умовах інтенсивної експлуатації та змінного навантаження. Однією з важливих характеристик такого електроприводу є здатність забезпечувати плавний розгін і гальмування без виникнення різких ривків, які можуть негативно впливати як на механічні елементи конструкції, так і на безпеку транспортування вантажу. Надмірні динамічні навантаження можуть призводити до підвищеного зношування зубчастих передач, ходових коліс, муфт, редукторів та інших елементів механічної системи. Саме тому питання вдосконалення системи керування електроприводом є важливим завданням сучасної електромеханіки.

Під час роботи мостового крану електропривод механізму пересування функціонує у складних режимах, які характеризуються частими циклами пуску та зупинки, реверсивними режимами роботи, короткочасними перевантаженнями та нерівномірним характером навантаження. Крім того, на роботу електроприводу впливають зовнішні фактори виробничого середовища, серед яких підвищена запиленість, вібрації, перепади температури, підвищена вологість та електромагнітні завади. Усі ці фактори суттєво ускладнюють умови

експлуатації електрообладнання та висувають додаткові вимоги до його конструкції й системи керування.

Особливе значення для ефективної роботи мостового крану має система керування електроприводом. Від якості її функціонування залежать точність позиціювання вантажів, плавність руху, швидкість виконання транспортних операцій та загальний рівень безпеки. Традиційні релейно-контактні системи керування, які тривалий час використовувалися у вантажопідіймальному обладнанні, мають низку недоліків, серед яких значні габаритні розміри, складність технічного обслуговування, обмежений ресурс контактних елементів та невисока гнучкість налаштування режимів роботи. У сучасних умовах розвитку промислової автоматизації дедалі більшого поширення набувають програмовані логічні контролери, твердотільні реле та цифрові системи керування, які забезпечують більш високий рівень надійності, функціональності та енергоефективності.

Таким чином, механізм пересування мостового крану та його електропривод є важливою складовою сучасних транспортно-технологічних систем. Ефективність роботи цього механізму безпосередньо впливає на продуктивність виробничих процесів, технічний стан обладнання, рівень енергоспоживання та безпеку праці персоналу. Саме тому аналіз технологічного процесу, у якому функціонує електропривод механізму пересування мостового крану, а також дослідження шляхів його модернізації та вдосконалення є актуальним науково-технічним завданням.

Мостовий кран є важливим елементом вантажного обладнання. Цей кран має вантажопідйомність 10 тонн і виконує різноманітні завдання, пов'язані з підйомом, переміщенням та розміщенням вантажів у промисловому середовищі. Розглянемо основну роботу механізму мостового крана і його важливі функції в контексті колесопрокатного цеху.

Мостовий кран складається з двох головних компонентів: гальмового механізму та механізму пересування. Гальмовий механізм відповідає за зупинку і фіксацію крана під час підйому та опускання вантажів. Він забезпечує безпеку під час роботи крана та запобігає нежеланим рухам або падінню вантажу. Механізм пересування відповідає за рух крана вздовж мостових балок і його позиціювання в потрібному місці. Цей механізм забезпечує горизонтальний рух крана, що дозволяє пересувати вантажі з одного місця на інше.

Однією з основних функцій мостового крана є підйом і переміщення вантажів. Кран оснащений гаком або іншими спеціальними пристроями, які дозволяють йому піднімати різноманітні вантажі. Завдяки своїй вантажопідйомності 10 тонн, кран може піднімати великі та важкі предмети, такі як сталеві рулони, конструкційні елементи, металеві пластини тощо. Після підняття вантажу кран може переміщати його вздовж мостових балок та опускати в потрібному місці. Це дозволяє розміщувати вантажі з високою точністю та ефективністю, що є важливими факторами в промисловому виробництві.

Крім підйому та переміщення вантажів, мостовий кран також виконує інші важливі завдання. Наприклад, він може використовуватися для завантаження та розвантаження вантажів з транспортних засобів, таких як вантажівки або залізничні вагони. Кран може також виконувати операції з переміщенням вантажів між різними робочими місцями, що сприяє оптимізації процесу виробництва та підвищенню продуктивності. Важливою функцією мостового крана є також забезпечення безпеки під час роботи. Кран має бути оснащений системами безпеки, такими як система аварійного зупинення, що відпрацьовує у випадку виникнення небезпечних ситуацій.

Кран грає важливу роль у ланцюгу виробництва, забезпечуючи ефективність та швидкість переміщення матеріалів і компонентів. Це сприяє

зниженню витрат на робочу силу, оптимізації процесу та підвищенню загальної продуктивності цеху.

Узагальнюючи, мостовий кран є невід'ємною частиною заводів і виконує важливу роботу з підйому, переміщення та розміщення вантажів. Він забезпечує безпеку та ефективність роботи виробництва, сприяє оптимізації процесів та підвищенню продуктивності.

У сучасних умовах розвитку промислової автоматизації та електромеханічних систем особливої актуальності набуває питання модернізації електроприводів вантажопідіймального обладнання. Постійне зростання вимог до продуктивності, надійності та безпеки виробничих процесів вимагає впровадження сучасних технічних рішень, здатних забезпечити стабільну роботу механізмів у складних умовах експлуатації. Саме тому вдосконалення систем керування електроприводом механізму пересування мостового крану є важливим напрямом розвитку сучасних систем автоматизації.

Застосування сучасних програмованих логічних контролерів, твердотільних комутаційних елементів та цифрових засобів керування дозволяє значно підвищити ефективність роботи мостових кранів, покращити точність позиціювання вантажів, зменшити динамічні навантаження на механічні вузли та скоротити витрати на технічне обслуговування обладнання. Крім того, модернізація електроприводу сприяє підвищенню рівня електробезпеки, покращенню умов праці обслуговуючого персоналу та збільшенню загального ресурсу роботи електромеханічної системи.

Таким чином, аналіз технологічного процесу функціонування мостового крану та дослідження шляхів удосконалення системи керування його електроприводом мають важливе практичне та науково-технічне значення. Реалізація сучасних підходів до автоматизації дозволяє забезпечити підвищення

енергоефективності, надійності та конкурентоспроможності промислового обладнання в умовах сучасного виробництва.

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

1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана

В таблиці 1.1 наведено основні технічні дані й характеристики мостового крана [2].

Таблица 1.1− Основні технічні данні мостового крана

Параметр	Значення
Вантажопідйомність крана $Q_н$, т	10
Номінальна швидкість підйому (спуску) $v_р$, м/с	0,09
Допустиме прискорення a_d, м/с	0,1
Робочий шлях підйому (спуска) Н , м	8
Діаметр барабана лебідки $D_б$, м	0,4
Маса барабана лебідки $т_б$, т	0,297
Момент інерції муфти з гальмівним шківом $J_М$, кгм^2	0,4
Передавальне число редуктора підйому $u_{рк}$	35,6
Тип електродвигуна	АД
Кратність поліспасту, $a_п$	2
Діаметр колеса крана D_k, м	0,7
Передавальне число редуктора пересування крана $и_{рк}$	35,6
Максимальне переміщення крана $L_{к м}$	40
Номінальна швидкість пересування крана v_k, м/с	0,75
ККД механізму пересування крана	0,85
Момент інерції гальмівної муфти моста $J_м$, кгм^2	0,4
Маса крана з візком m_k, т	20
Маса приводних коліс крана $m_{пк}$, т	0,24

1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану

Механізм пересування крану приводиться в рух двома асинхронними двигунами з фазним ротором потужністю 6,3 кВт і частотою обертання 1000 об/хв. Двигуни керується блоками пускачів, реостатів та контакторів. Параметри двигуна наведено в таблиці 1.2 [3].

Таблиця 1.2 − Номінальні параметри двигуна типу MTF – 121 – 6

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'*	$x_ц$'*
MTF – 121 – 6	220	50	6.3	1000	0,1	5,5	79	0,8	0,079	0,0795	0,081	0,012	1,9

Схема електрична принципова електроустаткування мостового крана представлена на листі графічної частини проекту (презентація). 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 управління механізмом пересування моста використовується кулачковий контролер типу ККТ-62. Всі електродвигуни обладнані механічними гальмами типу ТКТГ з електрогідроштовхачами типу ТГМ [2].

Для пуску електродвигунів для пересування моста «вперед» необхідно рукоятку контролера SA3 встановити в перше положення «вперед». При цьому через контакт контролера SA3.9, що замкнувся, отримує живлення котушка контактора реверсу КМ2. Контактор, спрацювавши, замикає свої силові контакти в колі статорів електродвигунів М1 і М4. Одночасно отримують живлення і електродвигуни М2 і М3 електрогідравлічних штовхачів гальм двигунів М1 і М4. Двигуни розгальмовуються і плавно починають набирати швидкість. У колах роторів введені ступені пускових резисторів R1 (1-3), R1 (1-6) для електродвигуна М1 і R2 (1-3), R2 (1-6) для двигуна М4. відбувається плавне

рушання механізму пересування моста. Після рушання рукоятку контролера переводимо в друге положення «вперед». Замикаються контакти контролера SA3.1 і SA3.2 в колах пускових резисторів R1 і R2 електродвигунів М1 і М4. У колі роторів електродвигунів М 1 і М4 вводяться додаткові ступені R1 (2-5) і R2 (2-5), чим забезпечується початок повільного пересування моста в напрямі «вперед».Збільшення швидкості пересування досягається переведенням рукоятки контролера в положення 3, 4, 5. Контакти, що замкнулися, шунтують ступені пускових резисторів, що приводить до збільшення швидкості пересування моста.

Зупинка електродвигунів механізму пересування моста здійснюється переведенням рукоятки контролера в положення «нуль». При цьому в зворотній послідовності розмикаються контакти контролера і в коло роторів електродвигунів вводяться ступені пускових резисторів. У нульовому положенні втрачає живлення котушка контактора реверсора КМ2. Статори електродвигунів М1 і М2 відключаються від мережі. Одночасно відключаються електродвигуни М2 і М3 електрогідравлічних гальм. Відбувається гальмування механізму. У аварійних ситуаціях гальмування може бути здійснене противовключенням. Для цього рукоятку контролера переводять в друге положення «назад». При цьому спрацьовує контактор реверсора КМ3 і замикає свої контакти в колі статорів електродвигунів М1 і М4. Змінюється чергування фаз в статорах, що приводить до зміни напряму обертання поля в статорах електродвигунів М1 і М4. Здійснюється гальмування електродвигунів противовключенням. Після повної зупинки електродвигунів рукоятку контролера необхідно поставити в нульове положення. Зміна напряму пересування моста здійснюється переведенням рукоятки контролера в положення «назад». Схема працює аналогічно описаному вище [2].

Після повної зупинки електродвигунів рукоятку командоконтролера необхідно перевести у нульове положення, що забезпечує повне вимкнення силових кіл електропривода та повернення системи керування у вихідний безпечний режим роботи. У цьому положенні відбувається розмикання контактів керування, припиняється подача напруги на обмотки статора електродвигунів, а також активується система механічного гальмування, яка забезпечує остаточну

фіксацію механізму пересування мостового крану. Такий режим роботи дозволяє уникнути самовільного руху мосту, підвищує безпеку експлуатації обладнання та запобігає виникненню аварійних ситуацій під час виконання вантажопідіймальних операцій.

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

Реконструкція електропривода механізму пересування мостового крану є важливою задачею для підвищення ефективності, надійності та безпеки його експлуатації. В цій статті розглянемо основні шляхи реконструкції електропривода механізму пересування мостового крану та їх значення для поліпшення його функціональних характеристик.

Заміна старого обладнання. Один з основних шляхів реконструкції електропривода механізму пересування полягає в заміні застарілого обладнання на сучасне та більш продуктивне. Це може включати заміну електродвигунів, приводних механізмів, редукторів, систем керування та інших компонентів. Нове обладнання зазвичай має вищі технічні характеристики, покращену ефективність та надійність, що сприяє підвищенню продуктивності та безпеки роботи крану.

Впровадження сучасних систем керування. Системи керування грають важливу роль у роботі електроприводу механізму пересування крану. Використання сучасних автоматичних систем керування дозволяє поліпшити точність, стійкість та ефективність руху крану. Такі системи можуть включати програмовані контролери, сенсори руху, системи візуалізації та інші технології, що сприяють оптимальному керуванню рухом крану та запобігають небезпечним ситуаціям.

Модернізація системи гальмування. Гальмовий механізм є важливою складовою електроприводу механізму пересування крану. Його модернізація може включати встановлення нових гальмових систем, використання електромагнітних гальм, автоматизацію процесу гальмування та інші технічні

рішення. Покращена система гальмування забезпечує надійне зупинення крану, запобігає нежеланим рухам або падінню вантажу, та підвищує загальний рівень безпеки експлуатації.

Застосування енергоефективних технологій. Одним з важливих аспектів реконструкції електроприводу механізму пересування крану є підвищення його енергоефективності. Це може бути досягнуто шляхом використання енергоефективних електродвигунів, встановлення систем рекуперації енергії, оптимізації процесів переміщення та інших заходів. Енергоефективні технології дозволяють знизити споживання електроенергії, зменшити витрати та сприяють сталому розвитку.

Підвищення безпеки експлуатації. Реконструкція електроприводу механізму пересування крану може включати заходи щодо підвищення безпеки його роботи. Це може включати встановлення додаткових систем безпеки, таких як системи виявлення перешкод, системи аварійного зупинення, системи контролю навантаження та інші. Застосування таких систем допомагає запобігти аварійним ситуаціям та забезпечити безпеку персоналу, який працює з краном.

Реконструкція електроприводу механізму пересування мостового крану є складним технічним процесом, який вимагає комплексного підходу та високої кваліфікації фахівців. Правильна реконструкція може покращити продуктивність, надійність та безпеку роботи крану, а також знизити витрати на обслуговування та ремонт. Крім того, вона може забезпечити використання сучасних технологій та енергоефективних рішень, що важливо для сталого розвитку та зниження негативного впливу на довкілля.

Узагальнюючи, реконструкція електроприводу механізму пересування мостового крану має велике значення для поліпшення його роботи. Застосування сучасних технологій, модернізація системи керування, підвищення енергоефективності та забезпечення безпеки експлуатації допомагають досягти оптимальної продуктивності та максимального використання потенціалу мостового крану.

Двигун механізму пересування крану керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Проект реконструкції полягає в інтеграції в існуючу систему керування асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором з

реостатним регулюванням програмованого логічного контролера Zelio компанії SchneiderElectric, фірми Telemecanique та безконтактних реле ZelioRelay серії SSRP. Мета даної реконструкції направлена на позбавлення від великогабаритних елементів схеми, які часто виходять з ладу і потребують постійного обслуговування. Таким чином, у роботі ставиться задача розробки електропривода змінного струму по системі асинхронний двигун з фазним ротором з керуванням за допомогою програмованого логічного контролера [4,5,6].

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 уцілому [4,5]. Завдяки відомим перевагам ПЛК таким як, малі габаритні розміри та площа розташування, дозволяється створити гнучку систему, яка звичайно буває доступною за допомогою великих платформ контролерів [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 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна

В таблиці 2.1 наведено початкові дані для розрахунку приводного двигуна.

Таблиця 2.1 Початкові данні для розрахунку

Параметр	Значення
Вантажопідйомність на крюку, кг Q;	10000
Маса моста, кг J_m ;	14000
Маса візка, кг $J_т$;	1920
Номінальна швидкість пересування $v_{ном}$ м/с ;	0,85
ККД механізму пересування: η;	0,85
Діаметр цапфи(підшипників) ходового колеса, м d;	0,15
Діаметр ходового колеса, D м;	0,6
Передавальне відношення механізму, i;	35,4
Передавальне відношення редуктора, $i_р$;	12,5
Передавальне відношення відкритої зубчатої зубної пари, $i_{зп}$;	2,82
Коефіцієнт тертя кочення колеса, μ;	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт тертя кочення реборди колеса, $k_р$;	2
Коефіцієнт форми ходового колеса, $к_{рб}$;	1,3
Коефіцієнт тертя в підшипнику, f;	0,015
Маховий момент ротора двигуна, J_d кг·м^2;	0,538
Маховий момент гальмівного шківа, J_{sh} кг·м^2 ;	0,065
Маховий момент муфти, J_{mf} кг·м^2;	0,7
Номінальна швидкість обертання ротора, n об/мин:	945
Необхідне прискорення при пуску, а м/с^2;	0,5
Час розгону, t с;	4
Сервіс-чинник(допустиме перевантаження двигуна при номінальній напрузі і частоті живлячої напруги) для електродвигунів приймаємо, λ;	1.1
Коефіцієнт запасу, з урахуванням впливу динамічних навантажень, приймаємо згідно [7], k_z	1,15
Коефіцієнт впливу мас механізму, δ	1,1
Коефіцієнт зниження моменту від температури навколишнього середовища, для температури навколишнього середовища, f_t	1
Коефіцієнт зниження моменту при висоті над рівнем моря вище 1000м , f_h	1
Коефіцієнт зниження моменту при просадках напруги живлення згідно [7] напруга живлення 380В, оскільки максимальний момент зменшується згідно квадрату напруги, при його зниженні на 10% значення коефіцієнта зниження моменту буде, fu	0,81
Число приводних коліс, n_{pr}	2
Загальне число коліс, n шт.;	4
Число механізмів пересування, nk;	2
Прискорення вільного падіння, g m/c ;	9,81
Маса редуктора, кг;	50
Маса ходового колеса, кг;	40

Коефіцієнт використання крана за вантажопідйомністю:

$$К_В = \frac{Q_{ср}}{Q_{ном}}, \quad (2.1)$$

де $Q_{ср}$=9400 кг – середнє значення вантажу, що піднімається, за зміну [7].

$$К_В = \frac{9400}{10000} = 0,94.$$

Розрахункова статична потужність для будь-яких типів кранів, визначається за формулою [7]:

$$P_{ст} = \frac{v_{ном}}{10^3 \cdot \eta}\left[\left(G_m + Q_{ср}\right)\left(\frac{f \cdot d + 2\mu}{D}k_{рб} + \beta\right) + 160\left(0,8\sqrt[3]{G} + 0,2\sqrt[3]{Q}\right)\right] \quad (2.2)$$

$$P_{ст} = \frac{0,85}{10^3 \cdot 0,85} \cdot \left[\left(15920 + 9400\right)\left(\frac{0,015 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,6}1,3 + 0,01\right) + 160\left(0,8\sqrt[3]{G} + 0,2\sqrt[3]{Q}\right)\right] =$$

$$= 8,9 кВт.$$

Розрахунок попередньої потужності проводиться за формулою [7]:

$$P_C \geq \frac{P_{ст.г}}{k_T} = \frac{8,9}{1,1} = 8,1 кВт.$$

Статичний момент на валу найбільш навантаженого двигуна дорівнює:

$$M_{st} = \frac{k_p\left(\frac{J_m}{2} + J_t + Q_{ср}\right)\left(f \cdot d + 2 \cdot \mu\right) \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta}. \quad (2.3)$$

$$M_{st} = \frac{2\left(\frac{14000}{2} + 1920 + 9400\right)\left(0,015 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}\right) \cdot 9,81}{2 \cdot 35,4 \cdot 0,85} = 83,7 Н \cdot м.$$

Статичний мінімальний момент на валу двигуна (без урахування вантажу) [8]:

$$M_{st.min} = \frac{k_p\left(\frac{J_m}{2} + J_t\right)\left(f \cdot d + 2 \cdot \mu\right) \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta}. \quad (2.4)$$

$$M_{st.min} = \frac{2\left(\frac{14000}{2} + 1920\right)\left(0,015 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}\right) \cdot 9,81}{2 \cdot 35,4 \cdot 0,85} = 49,8 Н \cdot м$$

Динамічний момент на валу двигуна дорівнює [7]:

$$M_d = \frac{\delta \cdot (J_d + J_{sh} + J_{mf}) \cdot n_{ном} \cdot g}{375 \cdot t} + \frac{0,975 \cdot \left(\frac{J_m}{2} + Q_l\right) \cdot v_{ном}^2 \cdot g}{n_{ном} \cdot t \cdot \eta}. \quad (2.5)$$

$$M_d = \frac{1,1 \cdot (0,538 + 0,065 + 0,7) \cdot 945 \cdot 9,81}{375 \cdot 4} +$$

$$+ \frac{0,975 \cdot (7000 + 9400) \cdot 0,85^2 \cdot 9,81}{945 \cdot 1,7 \cdot 0,85} = 172,3 Н \cdot м$$

Динамічний мінімальний момент на валу двигуна (без вантажу)[8]:

$$M_{d.min} = \frac{\delta \cdot (J_d + J_{sh} + J_{mf}) \cdot n_{ном} \cdot g}{375 \cdot t} + \frac{0,975 \cdot \left(\frac{J_m}{2}\right) \cdot v_{ном}^2 \cdot g}{n_{ном} \cdot t \cdot \eta} \quad (2.6)$$

$$M_{d.min} = \frac{1,1 \cdot (0,538 + 0,065 + 0,7) \cdot 945 \cdot 9,81}{375 \cdot 1,7} + \frac{0,975 \cdot 7000 \cdot 0,85^2 \cdot 9,81}{945 \cdot 1,7 \cdot 0,85} =$$

=103,5Нм.

Максимальний момент на валу електродвигуна при пуску механізму буде рівним:

$$M_{max} = \frac{M_{st} + M_d}{f_t \cdot f_h \cdot f_U \cdot f_\omega} \qquad (2.7)$$

$$M_{max} = \frac{83,7 + 102,3}{1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1} = 180,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Мінімальний момент на валу електродвигуна при пуску механізму буде рівним:

$$M_{min} = \frac{M_{st.min} + M_{d.min}}{f_t \cdot f_h \cdot f_U \cdot f_\omega} = \frac{103,5 + 49,8}{1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1} = 122,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \qquad (2.8)$$

Двигун вибирається по номінальному моменту по двом критеріям.

Перший критерій - номінальний момент двигуна має бути більше статичного розрахункового моменту приведеного до валу одного двигуна:

$$M_н > \frac{M_{st} \cdot k_Z}{n \cdot \lambda}, \qquad (2.9)$$

де n – кількість двигунів.

$$M_н > \frac{83,7 \cdot 1,15}{2 \cdot 1} = 96,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для електродвигунів приймаємо кратність максимального моменту по відношенню до номінального:

$$\lambda_{дв} = \frac{M_{max}}{M_н} = 3$$

Тоді, згідно другому критерію номінальний момент одного двигуна має бути не менше моменту:

$$M_{н.дв} > \frac{M_{max}}{\lambda_{дв}}$$

$$M_{н.дв} > \frac{180,6}{3} = 60,2$$

Виходячи з двох умов:

$$M_{н.дв} > 60,2 \ \ Н \cdot м$$

Для даних умов підходять двигуни типу MTF – 121 – 6 потужністю 6,3кВт частотою обертання 945 об/хв. Номінальний момент двигуна MTF – 121 – 6 дорівнює:

$$M_{н.дв} = \frac{P_Н}{\omega_Н} = \frac{30 \cdot P_Н}{\pi \cdot n_Н} = \frac{6300 \cdot 30}{3,14 \cdot 1000} = 60,4 \ \ Н \cdot м \qquad (2.10)$$

$$M_{н.дв} = 60,4 Н \cdot м > 60,2 \ \ Н \cdot м$$

2.1.1 Перевірка електродвигуна по тепловому режиму

Проведемо розрахунок збільшення втрат на регулювальних характеристиках систем параметричного регулювання, яке враховується за допомогою коефіцієнта:

$$k_р = 1 - 1,2(\varepsilon_{р.р} - \varepsilon_{р.р.б}), \qquad (2.11)$$

де $\varepsilon_{р.р} = 0,1$ – тривалість включення при регулюванні [9]; $\varepsilon_{р.р.б}$ – базова тривалість включення при регулюванні, прийнята при розрахунку залежності $\eta_{екв.} = 0,94$ від числа включень.

$$\varepsilon_{р.р.б} = 0,05.\ k_р = 1 - 1,2(0,1 - 0,05) = 0,94\ ,$$

Знайдемо еквівалентний ККД, що характеризує енергетичні характеристики електроприводу крана :

$$\eta_{екв.} = \frac{\eta_{екв.б}}{1 + \frac{\eta_{екв.б} - \eta_{екв.N}}{\eta_{екв.N}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{1,2J_{дв}} \left(\frac{n_{макс}}{1000}\right)^2}\ , \qquad (2.12)$$

де $\eta_{екв.N}$ – еквівалентний ККД, при числі пусків $N_в$, приймемо [9] $\eta_{екв.N} = 0,78$ при $N_в = 120$; $n_{макс}$ – синхронна частота обертання двигуна, $n_{макс} = 1000 об/хв.$

$$\eta_{екв.} = \frac{0,94}{1 + \frac{0,94 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{10,2}{1,2 \cdot 0,213} \left(\frac{1000}{1000}\right)^2} = 0,5\ .$$

Загальна розрахункова формула для вибору потужності двигуна по тепловому режиму:

$$P_{ном.т} \geq \frac{k_з k_{екв} k_н \sqrt{\frac{\varepsilon_р}{\varepsilon_{ном}}}}{k_0 k_р} \cdot \frac{\eta_{екв.б}}{\eta_{екв.б} - k_д(\eta_{екв.б} - \eta_{екв.})} P_{ст.ном}, \qquad (2.13)$$

де $P_{ст.ном} = \frac{P_{ст.г}}{2} = \frac{8,9}{2} = 4,4кВт;\ \varepsilon_р = 0,4;\ \ k_0 = 1$ [8].

$$P_{ном.т} \geq \frac{1 \cdot 0,63 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{0,4}}}{1 \cdot 0,94} \cdot \frac{0,94}{0,94 - 1(0,94 - 0,5)} \frac{8,8}{2} = 5,6кВт.$$

Двигун задовольняє по теплу, оскільки $P_н > P_{ном.т} = 5,6кВт$

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні

2.2.1 Мета реконструкції

Основними цілями автоматизації технологічного процесу є підвищення ефективності функціонування виробничої системи, забезпечення стабільності роботи обладнання, зменшення впливу людського фактора на технологічний процес, а також підвищення рівня безпеки праці персоналу. У сучасних умовах розвитку промисловості автоматизація є одним із ключових напрямів технічного вдосконалення виробництва, оскільки дозволяє забезпечити безперервність технологічних операцій, оптимізувати використання енергетичних і матеріальних ресурсів та підвищити загальну продуктивність підприємства.

Важливим аспектом автоматизації є забезпечення надійного та ефективного керування технологічними процесами у режимах змінних навантажень, високої інтенсивності роботи обладнання та складних умов експлуатації. Автоматизовані системи керування дозволяють оперативно реагувати на зміни параметрів технологічного процесу, здійснювати контроль роботи виконавчих механізмів у реальному часі та підтримувати оптимальні режими функціонування обладнання. Це особливо важливо для електромеханічних систем, у яких необхідно забезпечити точність керування, плавність роботи та високу надійність усіх елементів системи.

Поставлена мета автоматизації досягається шляхом вирішення комплексу взаємопов’язаних завдань. Одним із головних завдань є підвищення якості регулювання технологічних параметрів і режимів роботи обладнання. Якісне регулювання дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу, мінімізувати коливання швидкості, струму, навантаження та інших параметрів, що позитивно впливає на довговічність механічних і електричних елементів системи.

Не менш важливим завданням є підвищення коефіцієнта готовності обладнання. Завдяки автоматизації зменшується кількість аварійних зупинок, скорочуються простої обладнання та підвищується надійність роботи технологічних механізмів. Сучасні системи автоматичного контролю та

діагностики дозволяють своєчасно виявляти несправності, контролювати технічний стан обладнання та попереджати виникнення аварійних ситуацій.

Одним із напрямів автоматизації також є поліпшення ергономічних умов праці операторів. Використання сучасних засобів керування, інформаційних панелей, програмованих логічних контролерів та автоматизованих систем моніторингу значно спрощує роботу обслуговуючого персоналу. Оператор отримує можливість контролювати основні параметри технологічного процесу, швидко реагувати на відхилення від нормального режиму роботи та здійснювати керування обладнанням із мінімальними фізичними та психологічними навантаженнями.

Важливе значення має також забезпечення функцій накопичення та зберігання інформації про хід технологічного процесу, режими роботи обладнання та аварійні ситуації. Автоматизовані системи дозволяють вести архівацію параметрів роботи, фіксувати відмови та порушення режимів функціонування, що створює умови для подальшого аналізу роботи системи, вдосконалення алгоритмів керування та підвищення ефективності технічного обслуговування обладнання.

Реалізація поставлених завдань автоматизації здійснюється шляхом впровадження сучасних методів та засобів автоматизації. До таких засобів належать програмовані логічні контролери, твердотільні реле, цифрові датчики, частотні перетворювачі, системи дистанційного моніторингу та мікропроцесорні системи керування. Використання сучасних технічних рішень дозволяє підвищити точність та швидкодію систем керування, забезпечити гнучкість налаштування режимів роботи та значно підвищити рівень енергоефективності виробничого обладнання [10].

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 пересування мостового

крана та схема кіл керування краном наведена на рисунках додатку А. Специфікація апаратів і пристроїв схем додатку А приведена в таблиці. 2.2 [2].

Таблица 2.2− Специфікація апаратів і пристроїв

Позиція/ позначення	Призначення	Кіль–кість	Примітка
1	2	3	4
M1..M4	Двигуни моста	2	P=6,3кВт
M5	Двигун візка	1	
M7	Двигун підйому	1	
M2;M3;M6; M8	Електродвигуни гальм	4	
KM1	Контактор лінійний КТ6023	1	
KM2; KM3	Контактор реверсу КТ6014	2	
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 здійснюється таким чином [2]:

Вибір напряму руху здійснюється зміною порядку чергування фаз живлення приводного двигуна. Перемикання проводиться безпосередньо по колах командоконтролера контактами SA3.9 та SA3.11.

Контактами 1-8 командоконтролера SA3 здійснюється комутація ступенів додаткових опорів R1,R2 в колах роторів приводних двигунів M1 та M4. 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 безконактне реле (твердотільне реле) і програмований логічний контролер. Крім того, для підвищення комфорту керування замінимо командоконтролер джойстиком з дискретними виходами [11].

2.2.3.1 Джойстик

Командоконтролер, 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.

Тому застосуємо орган керування нового покоління – джойстик, призначений для комутації слабкострумових кіл. Застосуємо одноосьовий командоконтролер S14 (джойстикового типу) фірми Gessman [12]. Контролер S14 має 5 положень и 14 контактів, тому він без принципових змін може бути інтегрований в існуючу систему керування. Для сполучення джойстика з системою керування застосуємо твердотільні реле і ПЛК.

2.2.3.2 Твердотільне реле

Твердотільним реле є напівпровідниковий комутаційний пристрій, призначений для безконтактного вмикання та вимикання електричних кіл без використання механічних контактів. На відміну від традиційних електромагнітних реле та контакторів, у твердотільних реле процес комутації здійснюється за допомогою силових напівпровідникових елементів, таких як

тиристори, симістори або транзистори. Завдяки відсутності механічних рухомих частин твердотільні реле характеризуються високою надійністю, великою швидкодією та значним ресурсом роботи. Їх застосування дозволяє суттєво зменшити зношування елементів системи керування та підвищити стабільність роботи електропривода.

Однією з головних переваг твердотільних реле є можливість виконання великої кількості комутаційних операцій без погіршення технічних характеристик. У процесі роботи такі реле не створюють електричної дуги, яка виникає під час перемикання механічних контактів у традиційних реле. Це дозволяє значно знизити рівень електромагнітних завад, підвищити пожежобезпечність системи та забезпечити більш стабільну роботу електрообладнання. Крім того, відсутність механічного контакту виключає підгорання контактних поверхонь, характерне для релейно-контактних систем керування.

Для реконструкції системи керування електроприводом механізму пересування мостового крану доцільно використати твердотільні реле серії SSRP виробництва Schneider Electric. Реле даної серії спеціально розроблені для роботи у промислових умовах та характеризуються високою надійністю, стійкістю до вібрацій, перепадів температури та електромагнітних завад. Конструктивно реле виконуються у компактному корпусі та встановлюються на спеціальному радіаторі охолодження, який кріпиться безпосередньо на монтажній панелі шафи керування [13]. Наявність радіатора забезпечує ефективне відведення тепла від силових напівпровідникових елементів та запобігає їх перегріванню під час тривалої роботи під навантаженням.

Твердотільні реле серії SSRP випускаються на номінальні струми до 125 А, що дозволяє використовувати їх у системах керування електроприводами різної потужності. Напруга керування реле може змінюватися у широкому діапазоні: від постійної напруги 3…32 В або змінної напруги 90…280 В, що забезпечує сумісність із сучасними програмованими логічними контролерами та мікропроцесорними системами автоматизації. Завдяки цьому твердотільні реле

можуть безпосередньо інтегруватися у систему керування на базі ПЛК без використання додаткових проміжних елементів.

Виходячи з номінального струму асинхронного електродвигуна механізму пересування мостового крану, для даної системи обирається твердотільне реле з відповідними номінальними параметрами, наведеними у таблиці 2.3 [12]. Використання обраного реле дозволить підвищити надійність системи керування, зменшити витрати на технічне обслуговування, забезпечити безшумність роботи комутаційних елементів та покращити загальну енергоефективність електропривода.

Таблиця 2.3 − Номінальні параметри реле

Параметр	Примітки
Артикул (Каталожний номер)	SSRPP8S125A3
Найменування	Твердотільне(напівпровідникове) реле ZelioRelay серії SSR
Виконання	ТВЕРДОТІЛЬНЕ РЕЛЕ, 3–32В DC, 48–660В AC, 125А
Переваги	безшумність роботи, відсутність рухомих контактів, висока частота комутацій, довговічність
Застосування	Для кіл керування постійного і змінного струму
Конфігурація контактів	1 замикаючий контакт (1 нормально відкритий, 1НО)
Напруга котушки керування	~240 В (напруга вхідного сигналу)
Номінальний вхідний струм	10 мА (при 5 В DC)
Струм навантаження	До 125 А
Тип виходу реле	Тиристорний вихід
Комутація(принцип)	Спрацьовування реле під час переходу напруги через нуль
Максимальний час включення	1/2 цикла
Максимальний час відключення	1/2 цикла
Індикація спрацьовування	За допомогою світлодіодного індикатора стану зеленого кольору
Приєднання провідників	За допомогою гвинтових затискачів

2.2.3.3 Програмований логічний контролер (ПЛК)

Для реконструкції релейно–контакторної схеми було прийнято рішення використовувати програмований модуль – Zelio компанії SchneiderElectric, фірми Telemecanique. У даній роботі використана програмна оболонка ZelioSoft 2, яка дозволяє написати необхідну програму за допомогою ПК (персонального компьютера), без наявності самого модуля, а також завантажити написану програму в програмований модуль Zelio, у якому передбачена можливість підключення ПК.

Комунікативні функції ZelioSoft 2 надають користувачеві наступні можливості: завантаження програми користувача до модуля із запуском або без запуску на виконання; прочитування програми з модуля; запуск/зупинка виконання модулем програми користувача; порівняння програми користувача, яка набрана на комп'ютері, із завантаженою до модуля програмою; очищення програмної пам'яті модуля; виставляння календарної дати і часу годинника модуля; діагностування модуля; завантаження мікропрограми в модуль; робота з модулем в режимі моніторингу [13].

Технічні характеристики моделі SR3B261BD на 26 входів/виходів та блоку розширення SR3XT43BD представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 − Технічні характеристики SR3B261BD та блоку розширення SR3XT43BD

Модель SR3B261BD	
Кількість входів/виходів	26
Кількість дискретних входів	10(6)
Кількість «релейних» або «транзисторних» виходів	10
Напруга живлення	– 24 В
Годинник	Є
Дисплей і кнопки програмування	Є
Блок розширення SR3XT43BD	
Кількість аналогових 10–бітових входів	2
Кількість аналогових 10–бітових виходів	2

На рисунку А.3 додатку А показана модернізована схема керування механізмом, що включає ПЛК і твердотільні реле. Контакти командоконтролера SA підключаються до дискретних входів ПЛК Зеліо. До кожного виходу ПЛК підключений модуль твердотільного реле SSR. Вихідні кола твердотільних реле включені в початкову схему крана, нумерація клем збережена. На рисунку А.4 додатку А показаний лістинг програми ПЛК на мові сходових діаграм.

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]:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}}; \quad u_{1\beta} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} \\ \mathrm{u}_{2\alpha} = R_2^{'} i_{2\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} + \omega_r p_n \psi_{2\beta}; \quad \mathrm{u}_{2\beta} = R_2^{'} i_{2\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} - \omega_r p_n \psi_{2\alpha}, \end{cases} \tag{2.14}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_\sigma (\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}), \quad k_\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}. \tag{2.15}$$

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]:

$$\overline{\psi}_1 = L_1\bar{i}_1 + L_m\bar{i}_2; \quad \overline{\psi}_2 = L_2'\bar{i}_2 + L_m\bar{i}_1 \tag{2.16}$$

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:

$$M - Mc = j\frac{d\omega_r}{dt}, \tag{2.17}$$

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]:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}} = u_{1\alpha} - \mathrm{R}_1\imath_{1\alpha}; \quad \frac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} = u_{1\beta} - \mathrm{R}_1\imath_{1\beta}; \frac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\alpha} - R_2'i_{2\alpha} - \omega_r p_n\psi_{2\beta}; \\ \frac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\beta} - R_2'i_{2\beta} + \omega_r p_n\psi_{2\alpha}; \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J} \end{cases} \tag{2.18}$$

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]:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= k_\sigma(L_2\psi_{1\alpha} - L_m\psi_{2\alpha}); i_{1\beta} = k_\sigma(L_2\psi_{1\beta} - L_m\psi_{2\beta}); \\ i_{2\alpha} &= k_\sigma(L_1\psi_{2\alpha} - L_m\psi_{1\alpha}); i_{2\beta} = k_\sigma(L_1\psi_{2\beta} - L_m\psi_{1\beta}). \end{aligned} \tag{2.19}$$

2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступенями пускових резисторів

Проведемо розрахунки щодо реостатного пуску АД з фазним ротором, номінальні параметри якого наведено в таблиці 1.2.

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:

$$u_{1\alpha} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi); u_{1\beta} = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (2.20)$$

Знаходимо номінальний струм:

$$\mathrm{I}_{1\phi} = \frac{\mathrm{P_n}}{3\mathrm{U}_{\text{фн}} \cdot \eta_н \cdot \cos\phi_н}., \quad (2.21)$$

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

$$\mathrm{I}_{1\phi} = \frac{6300}{3 \cdot 220 \cdot 0,79 \cdot 0,8} = 15,1A.$$

Отримаємо абсолютні значення опорів:

$$\mathrm{R}_1 = r_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}};\ \mathrm{R}_2 = r'^*_2 \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}; X_1 = X_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}; \quad (2.22)$$

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

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.

$$\mathrm{R}_1 = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 1,151\,Ом;\ \mathrm{R}_2 = 0,081 \cdot \frac{220}{15,1} = 1,18\,Ом;$$

$$X_1 = 0,079 \cdot \frac{220}{15,1} = 1,151\,\text{Ом};\ X'_2 = 0,012 \cdot \frac{220}{15,1} = 0,175\,Ом;$$

$$X_\mu = 1,9 \cdot \frac{220}{15,1} = 27,676\,Ом\ .$$

Частота мережі живлення

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_н . \tag{2.23}$$

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

За формулами знаходимо значення індуктивностей:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_0};\quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_0};\quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0}. \tag{2.24}$$

$$L_1 = \frac{1,151 + 27,676}{314} = 0,092\,\text{Гн};\quad L_2 = \frac{0,175 + 27,676}{314} = 0,089\,\text{Гн};$$

$$L_m = \frac{27,676}{314} = 0,088\,Гн .$$

Номінальний момент:

$$\mathrm{M}_н = \frac{3\mathrm{R}_2'}{s_н \cdot \omega_c} \cdot \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s_н})^2 + (X_1 + X_2')^2}. \tag{2.25}$$

$$M_{н} = \frac{3 \cdot 1,18}{0,055 \cdot 78,54} \cdot \frac{220^2}{(1,151 + \frac{1,18}{0,055})^2 + (1,151 + 0,175)^2} = 58 Нм.$$

Критичний момент:

$$M_{KP} = \frac{3}{2 \cdot \omega_c} \cdot \frac{U^2_{фн}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (2.26)$$

$$M_{KP} = \frac{3}{2 \cdot 104,72} \cdot \frac{220^2}{(1,151 + \sqrt{1,151_1^2 + (1,151 + 0,175)^2}} = 238,5 \text{Нм}.$$

Кількість пар полюсів:

$$p=3000/n_0. \quad (2.27)$$

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

Визначення коефіцієнта kσ:

$$k\sigma=\frac{1}{L_1 \cdot L_2 - L_m}. \quad (2.28)$$

$$k\sigma=\frac{1}{0,092 \cdot 0,089 - 0,088} = 2676.$$

Приймемо число ступенів пускових резисторів m=5, режим пуску форсований. Приймемо максимальним піковим моментом $M_1=0.85M_{Kp}$ та визначимо співвідношення піків моментів до моменту перемикання:

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{M_{пот}}{s_n M_1}}. \quad (2.29)$$

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{58}{0,055 \cdot 0,85 \cdot 238,565}} = 1,391.$$

Моменти перемикання:

$$M_1=0.85M_{Kp};\ M_2=M_1/\lambda. \qquad (2.30)$$

$$M_1=0,85\cdot 238,565=202,78\ \text{Нм};\ M_2=202,78/1,391=145,8\ \text{Нм}.$$

Розраховуємо повні активні опори кола ротора:

$$R_1=R'_2\cdot\lambda;\quad R_2=R_1\cdot\lambda;\quad R_3=R_2\cdot\lambda;\quad R_4=R_3\cdot(\lambda);\quad R_5=R_4\cdot(\lambda). \qquad (2.31)$$

Ковзання на природній характеристиці в момент перемикання M_2:

$$s_1=s_n\cdot\frac{M_1}{M_n\lambda}. \qquad (2.32)$$

$$s_1=0,055\cdot\frac{202,78}{58\cdot 1,391}=0,138.$$

Швидкість двигуна, при якій необхідно виводити відповідний додатковий опір, тобто переходити від однієї штучної характеристики двигуна до іншої:

$$\omega_1=\frac{\pi\cdot n_c\cdot(1-s_1\cdot\frac{R_1}{R_2'})}{30};\ \omega_2=\frac{\pi\cdot n_c\cdot(1-s_1\cdot\frac{R_2}{R_2'})}{30};\ \omega_3=\frac{\pi\cdot n_c\cdot(1-s_1\cdot\frac{R_3}{R_2'})}{30}; \qquad (2.33)$$

$$\omega_4=\frac{\pi\cdot n_c\cdot(1-s_1\cdot\frac{R_4}{R_2'})}{30};\ \omega_5=\frac{\pi\cdot n_c\cdot(1-s_1\cdot\frac{R_5}{R_2'})}{30}.$$

Результати розрахунків формул (2.31) та (2.33) зведемо до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Результати розрахунків формул (2.31) та (2.33)

R_1,Ом	R_2,Ом	R_3,Ом	R_4,Ом	R_5,Ом	ω_1,$с^{-1}$	ω_2,$с^{-1}$	ω_3,$с^{-1}$	ω_4,$с^{-1}$	ω_5,$с^{-1}$
1,641	2,282	3,174	4,414	6,138	84,5	76,72	65,78	50,57	29,4

Виконаємо аналогічні розрахунки для пуску асинхронного двигуна в сім ступенів за вищенаведеними формулами (2.26)-(2.29).

$$\lambda = \sqrt[7]{\frac{58}{0,055 \cdot 0,85 \cdot 238,565}} = 1,335.$$

Моменти перемикання:

$$M_1=0,85M_{Kp};\ M_2=M_1/\lambda.$$

$$M_1 = 0,85 \cdot 238,5 = 202,78 \text{ Нм};\ M_2 = 202,78/1,335 = 151,8 \text{ Нм}.$$

Ковзання на природній характеристиці в момент перемикання M_2:

$$s_1 = 0,055 \cdot \frac{202,78}{58 \cdot 1,335} = 0,15.$$

Результати розрахунків для семиступеневого пуску АД представлені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Результати розрахунків формул опорів та кутових швидкостей пускових резисторів для семиступеневого пуску

R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом	R_4, Ом	R_5, Ом	R_6, Ом	R_7, Ом	ω_1, c^{-1}	ω_2, c^{-1}	ω_3, c^{-1}	ω_4, c^{-1}	ω_5, c^{-1}	ω_6, c^{-1}	ω_7, c^{-1}	λ
1,57	2,102	2,8	3,74	4,997	6,67	8,9	90,8	86,19	79,9	71,2	60,6	45,9	26,2	1,335

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.

2.3.3 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 1.2., з числом ступіней пускових резисторів m=7 за методикою наведеною в підрозділах 2.3.1 – 2.3.2.

В додатку Г наведено програму розроблену в пакеті Mathcad 14 з реактивним моментом опору на валу M_H та початковою фазною напругою статора $\varphi = \pi/2$ рад. Графіки перехідних процесів M(t), ω(t), $i_1(t)$ наведені на рисунках Д.1 – Д.3 додатку Д.

2.4 Порівняльний аналіз втрат в електроприводі в перехідних режимах при пуску двигуна з п’ятьма та сьома ступенями пускових резисторів

Створення і дослідження систем керованого пуску двигунів змінного струму достатнє широко висвітлено у літературі [16, 17]. Застосування останніх дозволяє вирішити ряд актуальних завдань зменшення негативного впливу пускогальмівних режимів на ресурс роботи двигуна. Такі проблеми вирішуються шляхом плавного пуску за рахунок збільшення кількості ступенів пускових реостатів. З погляду економічної ефективності, найбільш виправданим є багатоступінчатий реостатний пуск, як спосіб формування пускових режимів [18]. При дослідженні енергопроцесів проводять аналіз комплексу показників: напруги U(t), струму *I(t)* та їх добутку – потужності *P(t)*. З урахуванням сказаного отримаємо вирази для множин:

$$U(t) \Rightarrow \{U_0, U_1 \ldots U_n; U_e; k_u\} = M_u \tag{2.34}$$

$$I(t) \Rightarrow \{I_0, I_1 \ldots I_m; I_e; k_I\} = M_i \tag{2.35}$$

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \Rightarrow \{P_0, P_1 \ldots P_k; P_e; k_p\} = M_p \qquad (2.36)$$

де M_u, M_i M_p – показники параметрів напруги, струму, потужності; U_0, U_1, ... U_n – гармонійні складові напруги; U_e, k_u – ефективне значення напруги і коефіцієнт викривлення.

При цьому активна потужність:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)dt \qquad (2.37)$$

де Т – тривалість перехідного процесу під час пуску.

Всі приведені у виразах компоненти є такими, що становлять, визначають сукупність показників енергопроцесу. Показники енергопроцесів, що включають оцінку параметрів сигналів компонент потужності (напруги і струму), винні доповняться оцінками потужності, що отримуються з множення компонент *U(t)* и *I(t)*[16–19].

На рисунках Е.1, Е.2 додатку Е наведено графіки функцій потужності під час пуску, які отримані за формулами (2.34–2.36) для m=5 та m=7 відповідно за допомогою програм, наведених в додатках Б та Г.

Розрахунок втрат енергії при пуску АД за рік роботи

$$W = \frac{[\frac{1}{t_{nn}} \cdot \int_0^{t_{пп}} P(t)dt] \cdot Nв \cdot Nг \cdot К}{3600 \cdot 1000}, \qquad (2.38)$$

де $t_{пп}$ – час перехідного процесу ; Nв=100 – кількість пусків двигуна за годину; Nг =300 – кількість робочих днів на рік; К – кількість годин роботи на добу; $\frac{1}{3600 \cdot 1000}$ – переводний коефіцієнт в кВт·год.

Таким чином розрахунки наведені в додатку А та В показали, що втрати енергії $W_{m=5}$ за рік роботи двигуна при п’ятиступеневому пуску складають 21,22 кВт·годин а при семиступеневому пуску $W_{m=7}$ складають 18,73 кВт·годин.

Збільшення кількості ступеней пускових резисторів з п’яти до семи, з технічної точки зору, дозволяє стверджувати, що зі зменшенням величини λ, яка характеризує відношення пускових моментів, при семиступеневому пуску зменшуються кидки пускового моменту та струму, що в свою чергу призводе до поліпшення роботи механічної частини електроприводу, а саме зменшення ривків в зубчатих зачепленнях, та втрати електроенергії під час пускових режимів, не збільшаться.

3 Охорона праці та захист навколишнього середовища

3.1 Охорона праці

У даній випускній кваліфікаційній роботі бакалавра виконана реконструкція електропривода механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 тон. У цьому розділі дипломного проекту розглядаються питання забезпечення безпеки робіт при обслуговуванні та експлуатації електроустаткування у даному цеху.

3.1.1 Загальна характеристика умов праці

Санітарними нормами встановлено п'ять класів підприємств, виробництв і об'єктів залежно від їх потужності, умов технологічного процесу, характеру та кількості шкідливих речовин, що виділяються в навколишнє середовище, та речовин, що мають неприємний запах, або шкідливих фізичних впливів, а також з урахуванням заходів, спрямованих на зменшення їх негативного впливу на довкілля.

Таблиця 3.1- Ширина санітарно-захисної зони підприємств, виробництв та об’єктів

Клас виробництва	I	II	III	IV	V
Ширина санітарно-захисної зони, м	1000	500	300	100	50

Згідно з ДСП 173-96 [24] металургійні, машинобудівні та металообробні підприємства і виробництва відносяться до Класу І. Санітарно-захисна зона 1000 м. Територія підприємства повинна бути відділена від житлового масиву санітарно-захисною зоною рівною 200 м^3 озелененням не менше 15%.

Устаткування цеху розташоване в трьох поздовжніх прольотах цеху. Загальна площа приміщення 17820 м^2, висота стелі 20 м.

Шкідливими виробничими факторами є: мікроклімат; електричні і магнітні поля; виробничий шум; вібрація; освітлення; небезпека ураження електричним струмом.

У відповідності до ДСН 3.3.6.042-99[25], ГОСТ 12.1.005-88 [26] роботи на мостовому крані в цеху за енерговитратами відносяться до категорії робіт IIб.

Оптимальні мікрокліматичні умови при тривалому і систематичному впливі на людину забезпечують нормальний тепловий стан організму без напруги і порушення механізму терморегуляції. У таблиці 3.2 згідно ДСН 3.3.6.042-99[25] приведені данні мікроклімату для виконання робіт середньої тяжкості IIб.

Таблиця 3.2 – Оптимальні і допустимі показники мікроклімату

Період року	Температура, ^{0}C			Відносна вологість, %		Швидкість повітря, м/с	
	Фактична	Допустима для робочих місць		Фактична	Допус-тима	Фактична	Допус-тима
		Пост.	Змін.				
Холод-ний	18-20	17-20	15-21	50-60	не більше 75	0,2	не більше 0,3
Теплий	22-25	18-27	17-28	40-55	не більше 65	0,3	0,2-0,4

Діапазон сприйняття людини звуків за частотою становить від 20 до 20000 Гц (20 кГц), найбільша чутливість шумового аналізатора звуків різної частоти знаходиться в межах від 1000 до 5000 Гц. У санітарних нормах і при шумовій характеристиці устаткування весь шумовий діапазон розбитий на 9 октав. Шумові октави становлять: 22,5-45; 45-90; 90-180; 180-360;360 - 720; 720 - 1400; 1400 - 2800; 2800 - 5600; 5600 – 11200 Гц.

Санітарно-гігієнічне нормування шумів на робочих місцях здійснюється згідно з ДСН 3.3.6.037-99[27]. В основу гігієнічних норм покладені наступні принципи: обмеження інтенсивності звукового тиску у межах октави; врахування характеру шуму; врахування особливостей трудової діяльності людини. Нормування шуму здійснюється двома методами: методом граничних спектрів (ГС) і методом рівня звуку.

Згідно ДСН 3.3.6.039-99 [28] вібрацію цеху відносять до 3 категорії, - технологічної вібрації, яка діє на людину на робочих місцях стаціонарних машин чи передається на робочі місця, які не мають джерел вібрації. До джерел технологічної вібрації в цеху відносяться, - металообробні верстати, мостові крани, електричні машини, стаціонарні електричні установки, насосні агрегати, вентилятори та ін.

Припустимі, оптимальні і фактичні значення шкідливих і небезпечних факторів в цеху приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Характеристика шкідливих і небезпечних факторів у цеху (середні значення)

Шкідливі й небезпечні фактори в цеху	Фактичне значення	ГДК	ГДР	Клас небезпеки за ГОСТ 12.1.005-88
Шум в умовах цеху, дБА	84	-	80	III
Запиленість в умовах цеху, мг/м^3	4,7	4	-	III
Азоту діоксид	1,4	2	-	III
Вуглецю оксид	16,8	20	-	III

Основні шкідливі компоненти, що забруднюють повітря - це пил, оксид вуглецю, діоксид кремнію, сірчана кислота. Порівняльна характеристика змісту цих речовин і їх ГДК у повітрі робочої зони наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Забруднення повітря робочої зони

Шкідливі речовини	Фактична концентрація, мг/м^3	ГДК, мг/м^3
Пил	5,7	4,0
Кремнію діоксид	2,13	4,0
Кислота сірчана	1,1	1,0
Азоту діоксид	1,12	2,0
Ангідрид сірчаний	8,4	10,0
Марганець оксид	0,23	0,3
Вуглецю оксид	12,4	20,0

Згідно ДБН В.2.5-28-2006[29] у цеху виконуються зорові роботи, які відносяться до IV розряду зорових робіт (здатність розрізняти деталі від 0.5 до 1

мм). Підрозряд зорових робіт - В, так як фон середній, а контраст об'єкта з фоном теж середній.

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення обтяжує проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і гостроти зору, що може бути причиною травматизму і захворювань очей. Характеристику зорової роботи у приміщенні цеху приведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Характеристика приміщення по характеру зорової роботи і необхідної освітленості

Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Освітленість, лк		КПО, %
		Фактичне значення	ГДР	
IV	в	195	200	1,5

Відповідно за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу ГН 3.3.5-8-6.6.1 2002 [30] умови праці (УП) даного підприємства відносять до 2 класу, а саме – допустимі умови праці. До показників напруженості трудового процесу відносяться такі, як інтелектуальні навантаження (за показником УП, - допустимі), навантаження на зорові органи (за показником УП, - шкідливі 1 ступеня), емоційне перенапруження (за показником УП, - допустимі), монотонність роботи (за показником УП, - допустимі), режим роботи (за показником УП, - оптимальний).

3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

У зв'язку з тим, що однією з істотних причин виробничого травматизму є недостатнє знання працюючими безпечних методів і прийомів роботи на заводі проводяться наступні заходи.

При прийомі на роботу робітників і службовців, а також при переведенні на іншу роботу або при зміні характеру роботи адміністрація підприємства зобов'язана ознайомити працівників з питаннями безпеки праці, виробничої санітарії та протипожежної профілактики шляхом проведення спеціального інструктажу та навчання. Без цього допуск до роботи не дозволяється [35].

Проводяться такі види інструктажу:

а) вступний інструктаж, який полягає в тому, що осіб, знову прийнятих на роботу знайомлять із загальними вимогами техніки безпеки і виробничої санітарії;

б) первинний інструктаж на робочому місці, що полягає у детальному ознайомленні працівника з вимогами техніки безпеки і виробничої санітарії стосовно до виконуваної роботи. Інструктаж проводиться майстром цеху або іншою особою технічного персоналу, під керівництвом якого працюватиме працівник;

в) інструктаж на робочому місці необхідно проводити при зміні умов роботи і при переході працівників на іншу роботу. Для придбання необхідних навичок виконання роботи новоприйняті робочі прикріплюються на 6-10 робочих змін до досвідченим працівникам.

Поряд із вступним інструктажем і інструктажем на робочому місці проводяться періодичний повторний інструктаж та позаплановий інструктаж. Повторний інструктаж проводиться щоквартально, а позаплановий у міру потреби при зміні умов роботи, а також при виникненні нещасних випадків внаслідок порушення встановлених правил безпеки. Поточний інструктаж здійснюється керівниками робіт для засвоєння знань з охорони праці і в разі порушення працюючими вимог безпеки.

Після закінчення інструктажу організується перевірка знань робітників з техніки безпеки і видаються відповідні посвідчення. Повторна перевірка знань проводиться не рідше одного разу на рік. Робочим всіх професій видаються інструкції з техніки безпеки, складені з урахуванням місцевих умов і особливостей роботи.

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [31] виробничий процес у цеху з вибухо- і пожежобезпеки відноситься до категорії Г, тому що виробляються негорючі

речовини і матеріали у гарячому, розпеченому або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор та полум'я; горючі гази (ГГ), рідини та тверді речовини, що спалюються або утилізуються як паливо.

Згідно ДБН В.1.1-7-2002 [32] будівля цеху по вогненебезпечності відноситься до ІІ ступеню, оскільки побудовано з матеріалів, що не згорають (цеглина, розчин, залізобетонні конструкції).

Згідно ГОСТ 27331-87 „Пожежна техніка. Класифікація пожеж” [33] в даному цеху пожежі відносяться до класу Е (пожежі пов’язані з горінням електроустановок).

Джерелами підвищеної пожежної небезпеки є:

– невиконання і незабезпечення технологічних режимів роботи;

– несправність електроустаткування, освітлення, електропроводів і порушення правил їх експлуатації;

– несправність електропроводки, перевантаження в електромережі, перегрів чи коротке замикання;

– невиконання і недодержання на виробництві режиму системи опалення і вентиляції.

Для виключення і зниження можливості виникнення пожежі електроустаткування забезпечене тепловими реле, плавкими запобіжниками, автоматами струмового захисту. Для попередження перегріву електродвигунів, застосовується: примусова вентиляція.

Для попередження пожежі проводяться такі заходи: організаційні, технічні, експлуатаційні, режимного характеру.

До організаційних заходів відноситься: навчання працюючих пожежної безпеки; проведення бесід, лекцій, інструктажів.

Експлуатаційні заходи передбачають правильну експлуатацію машин, обладнання, заводського та цехового транспорту, своєчасні регулярні огляди установок і апаратів, їх ремонт і випробування, правильне утримання будівель, споруд і території.

До технічних заходів відноситься: додержання протипожежних правил і норм при проектуванні будівель і споруд, упорядкування електричних мереж і

електрообладнання, систем освітлення, вентиляції, опалення, кондиціювання і т.п.

До заходів режимного характеру відносяться: заборона проведення електрозварювальних і інших вогневих робіт в пожежонебезпечних зонах, приміщеннях; заборона паління у невстановлених місцях.

Небезпека виникнення пожежі на ділянці зменшена в роботі наступними розробленими заходами: оснащенням систем управління електрообладнанням автоматами максимального струмового захисту та плавкими запобіжниками; обмеженням кількості паливно-мастильних матеріалів добовою потребою (решта ПММ зберігаються на складі, спеціально обладнаному в протипожежному відношенні); головні двигуни електроприводів оснащені системою замкнутої примусової вентиляції з очищенням повітря від пилу і охолодженням його; маслопідвали обладнані системою припливно-витяжної вентиляції, що видаляє пари масла і зменшує їх концентрацію в повітрі, електрообладнання та освітлення маслопідвалів виконано в іскро- вибухобезпечному виконанні; статичний заряд відводиться в землю по мережі заземлення.

Для гасіння пожеж водою використовується пожежний водопровід, об'єднаний з виробничим. Для гасіння можливих пожеж в цеху передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначені на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004[34]. В таблиці 3.6 наведені нормативні [34] та фактичні показники належності вогнегасників.

Таблиця 3.6 – Нормативні та фактичні показники належності вогнегасників для виробничих і складських будинків та приміщень промислових підприємств

Захищувана площа, кв. м	Клас можливої пожежі	Мінімальна кількість порошкових вогнегасників							
		Переносний вогнегасник (з газом-витискувачем у балоні) із зарядом вогнегасної речовини, кг				Пересувний вогнегасник (з газом-витискувачем у балоні), із зарядом вогнегасної речовини, кг			
		5 кг		9кг		20 кг		50 кг	
		норма	факт	норма	факт	норма	факт	норма	факт
Більше 500 до 1000 включно	А (Е)	6	5	4	3	2	2	1	-

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра на тему: «Аналіз та вдосконалення системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 т на базі ПЛК ZELIO» виконана реконструкція електропривода шляхом заміни релейно-контактних елементів системи керування АД з фазним ротором з реостатним регулюванням безконтактними. В основній частині роботи проведено розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна. Було обрано електродвигун змінного струму з фазним ротором типу MTF-121-6 потужністю 6,5 кВт, частотою обертання n = 945 хв-1, з моментом інерції Jр=0,13 Н·м·с2.

Було розроблено технічне рішення з реконструкції схеми управління механізмом. Застосування нового органу управління – одноосьового командоконтролера S14 (джойстикового типу) фірми Gessman заміст існуючого командоконтролера. Контролер S14 має 5 положень и 14 контактів, тому він без принципових змін може бути інтегрований в існуючу систему управління. Також застосування твердотільного реле серії SSRP виробництва Schneider Electric і програмованого логічного контролеру модуль - Zelio компанії SchneiderElectric, фірми Telemecanique підвищує ергономічность пульта управління оператора, а також забезпечує надійну і безпечну експлуатацію.

Проведено дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з числом ступіней пускових резисторів m=5 та m=7. За обраним критерієм втрат потужності в електродвигуні в пускових режимах, з погляду економічної ефективності, найбільш виправданим є багатоступінчатий реостатний пуск, як спосіб формування пускових режимів. Розрахунки показали, що втрати потужності за рік роботи двигуна при п’ятиступеневому пуску складають 21,229 кВт·год а при семиступеневому пуску складають 18,734 кВт·год. При цьому зменшуються кидки пускового моменту та струму, що в свою чергу призводе до поліпшення роботи механічної частини електроприводу,

а саме зменшення ривків в зубчатих зачепленнях, та втрати електроенергії під час пускових режимів, не збільшаться.

У розділі охорона праці та захист навколишнього середовища розглянуті основні шкідливі та небезпечні фактори цеху і запропоновані заходи щодо їх зниження. Метою охорони праці є виявлення технічних, економічних, організаційних і соціальних можливостей поліпшення умов безпеки праці, збереження здоров'я й працездатності людини.

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 //III 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 Zelio Logic.-Електронний ресурс.-Режим доступу: http://www.is-com.ru/files/zelio_logic_2_katalog.pdf/

14. Черний А. П. Моделювання електромеханічних систем / А. П. Черний, А. В. Луговий, Д. І. Родькін. – Кременчук, 2002. – 204 с.

15. Черний А. П., Гладир А. І., Осадчук Ю. Г., Курбанов І. Р., Вошун А. М. Пускові системи нерегульованих електроприводів : монографія. – Кременчук, 2006. – 280 с.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.

16. Загірняк М.В. Напрями розвитку теорії миттєвої потужності та її застосування в задачах електромеханіки // Міжнар. наук.–техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.

17. Родькин Д.И. Актуальні питання теорії та практики енергоресурсозберігаючих електромеханічних систем // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 3/2008(50). – Ч. 1. – С. 8–17.

18. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система складових повної потужності та енергетичних коефіцієнтів на основі p–q–r теорії потужності // Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. –2004. – Ч. 1. – С. 69–74.

19. 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. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Запоріжжя 2016. – 45 с.

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

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

25. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Повітря робочої зони. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги. – К. : Видавництво стандартів, 1990.

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

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

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

29. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу – Режим доступу: https://dnaop.com/html/1709/doc-ГН_3.3.5-8.6.6.1-2002.

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

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

32. ГОСТ 27331-87 Пожарна техніка.– Режим доступу: http://online.budstandart.com//catalog/doc-page?id_doc=48706.

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

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

Додаток А

Схема електрична принципова електропривода механізму пересування мостового крана до та після реконструкції

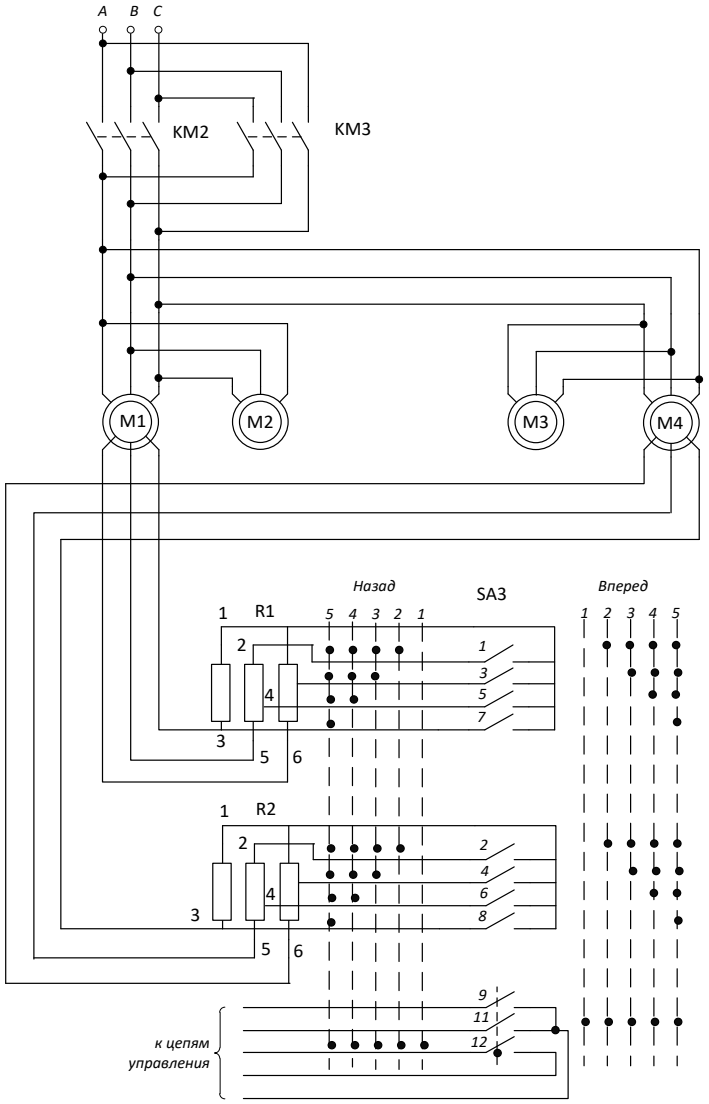


Рисунок А.1 − Фрагмент силової схеми живлення привода пересування мосту

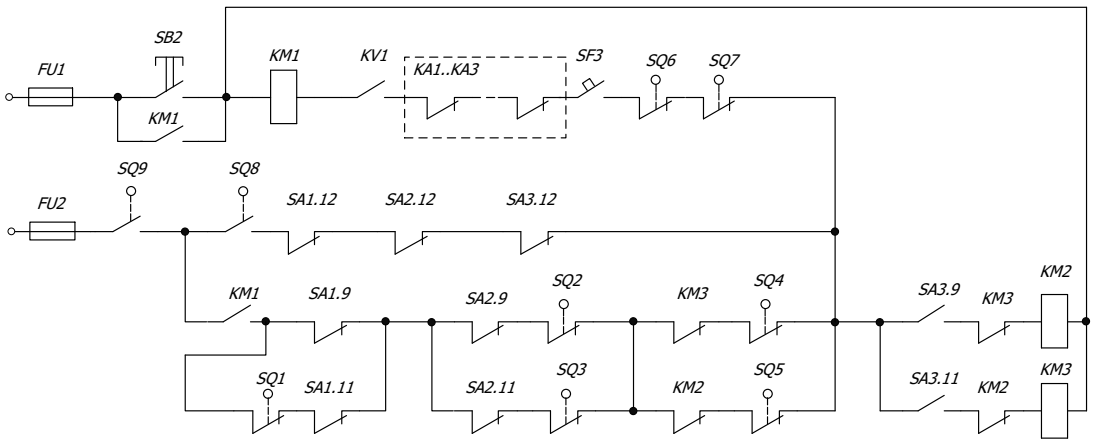


Рисунок А.2 − Схема кіл управління краном

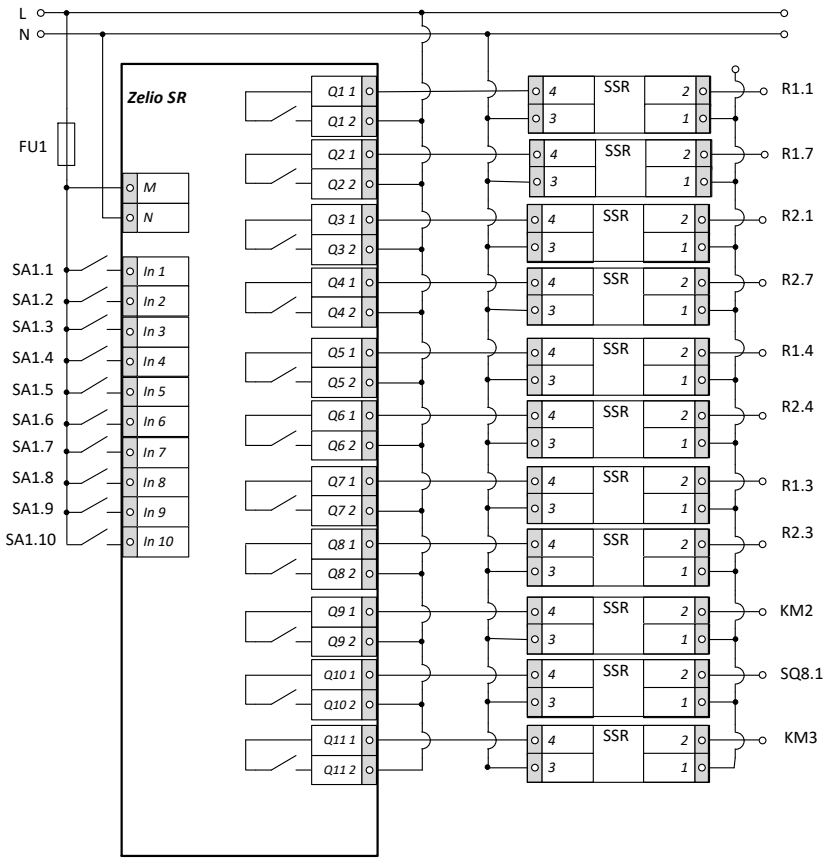


Рисунок А.3 − Модернізована схема керування

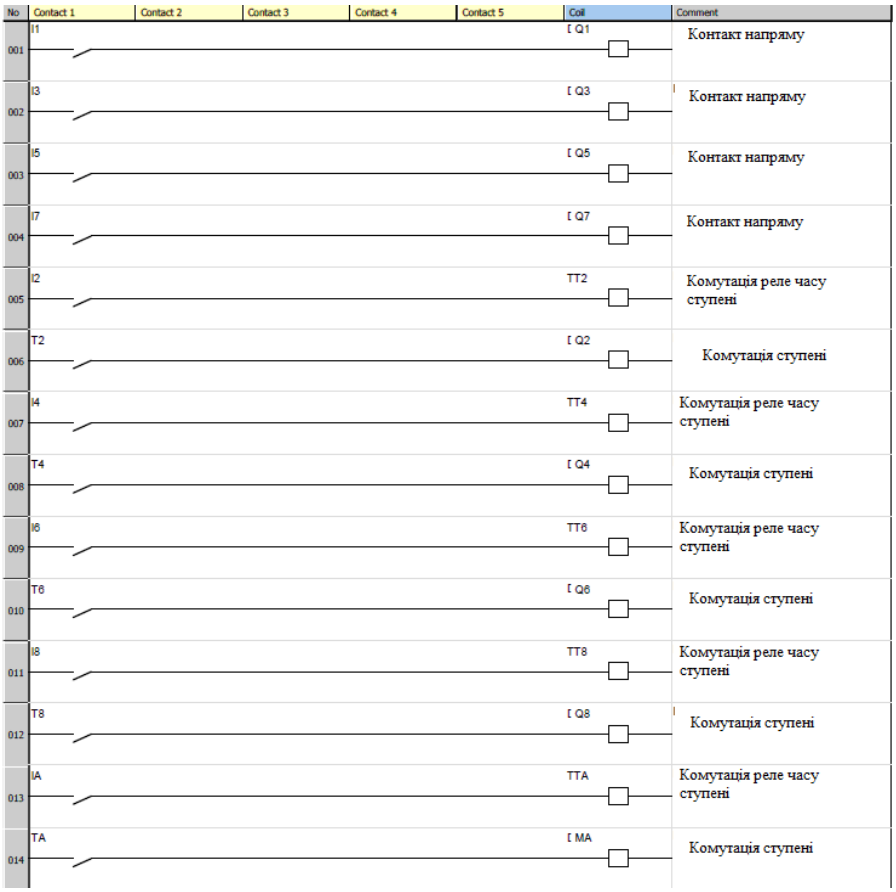


Рисунок А.4 − Лістинг програми ПЛК

Додаток Б

Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступенями пускових резисторів

Выходные данные

$Pn \equiv 6300 \quad Un \equiv 220 \quad \cos\phi \equiv 0.8 \quad \eta \equiv 0.79 \quad sn \equiv 0.055 \quad r1o \equiv 0.079$

$x1o \equiv 0.079 \quad x\mu o \equiv 1.9 \quad fn \equiv 50$

$r2o \equiv 0.081 \quad x2o \equiv 0.012 \quad no \equiv 1000 \quad Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn}$

$R2 \equiv r2o \cdot Zb \quad x2 \equiv x2o \cdot Zb$

$Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 15.104 \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn} = 14.566 \quad R2 \equiv r2o \cdot Zb = 1.18$

$x2 \equiv x2o \cdot Zb = 0.175$

$r1 \equiv r1o \cdot Zb \quad r1 \equiv r1o \cdot Zb = 1.151 \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb = 1.151 \quad x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb$

$x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb = 27.676 \quad J \equiv 0.1 \quad \phi \equiv \frac{\pi}{2} \quad p \equiv \frac{3000}{no} \quad p \equiv \frac{3000}{no} = 3 \quad \omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn$

$\omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn = 314.159 \quad \omega = 314.159 \quad Icn = 15.104 \quad Zb = 14.566 \quad R2 = 1.18 \quad x2 = 0.175$

$r1 = 1.151 \quad x1 = 1.151 \quad x\mu = 27.676 \quad p = 3 \quad \omega n \equiv \frac{\pi \cdot no \cdot (1 - sn)}{30} \quad \omega o \equiv \frac{\pi \cdot no}{30}$

$L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} \quad L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} = 0.092 \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} = 0.089$

$Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} \quad Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} = 0.088 \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} = 311.127$

$k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} \quad k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} = 2.676 \times 10^3 \quad \omega n = 98.96 \quad \omega o = 104.72$

$L1 = 0.092 \quad L2 = 0.089 \quad Lm = 0.088 \quad Um = 311.127 \quad k\sigma = 2.676 \times 10^3$

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right]$$

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right] = 58.022$$

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2 \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{r1 + \sqrt{(r1)^2 + (x1 + x2)^2}}\right]$$

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2 \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{r1 + \sqrt{(r1)^2 + (x1 + x2)^2}}\right] = 238.565$$

$td \equiv 0.0005$ $tmax \equiv 0.9$ $n \equiv 2000$ $Mr \equiv Mn$ $Mn = 58.022$ $Mkr = 238.565$

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 5$ $M1 \equiv 0.85 \cdot Mkr$ $M1 = 202.78$ $\lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn \cdot M1}}$ $\lambda = 1.391$ $M2 \equiv \frac{M1}{\lambda}$ $M2 = 145.809$

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

$Rr1 = 1.641$ $Rr2 = 2.282$ $Rr3 = 3.174$ $Rr4 = 4.414$ $Rr5 = 6.138$ $s1 = 0.138$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

$$\omega 1 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr1}{R2}\right)}{30} \quad \omega 2 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr2}{R2}\right)}{30} \quad \omega 3 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr3}{R2}\right)}{30}$$

$$\omega 4 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr4}{R2}\right)}{30} \quad \omega 5 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr5}{R2}\right)}{30}$$

$\omega 1 = 84.591$ $\omega 2 = 76.726$ $\omega 3 = 65.788$

$\omega 4 = 50.576$ $\omega 5 = 29.421$

Додаток В

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п’ять ступенів

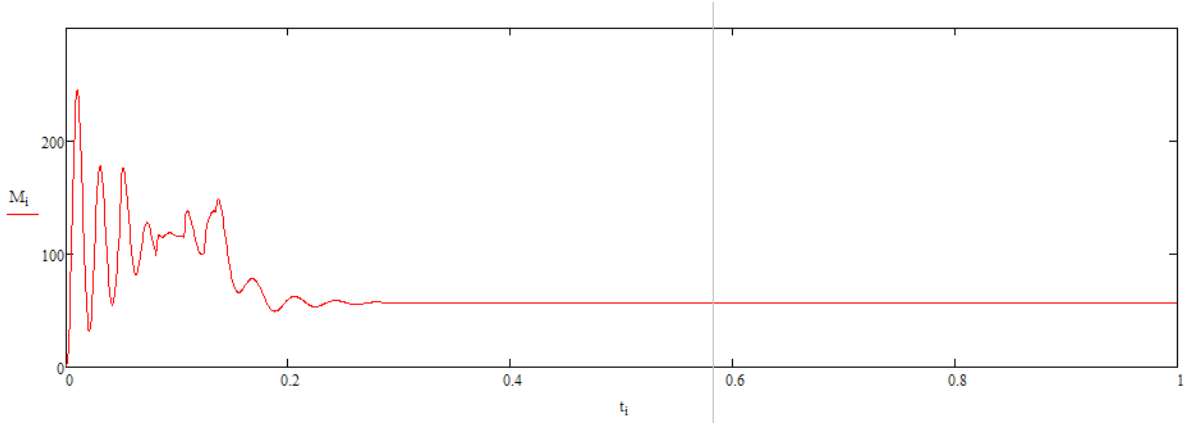


Рисунок В.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

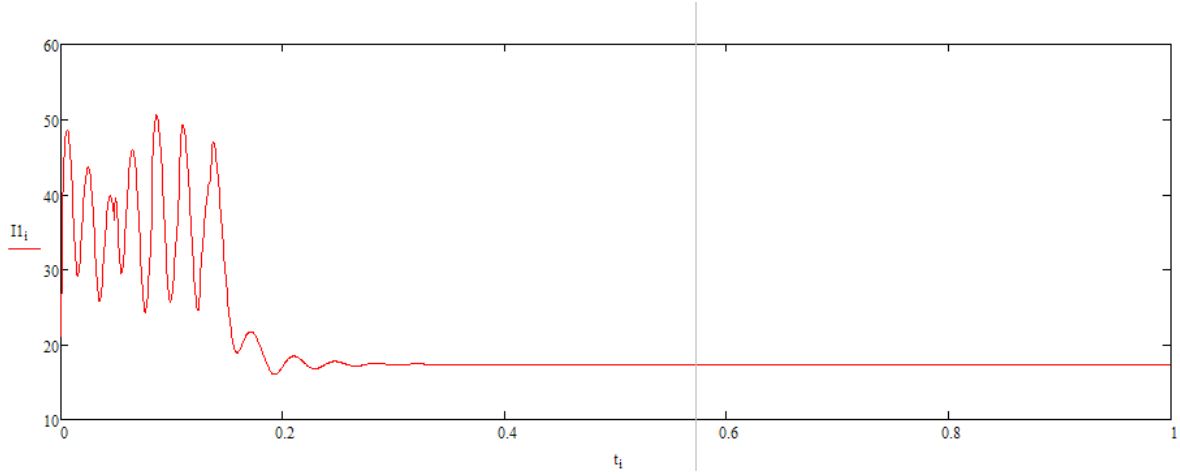


Рисунок В.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

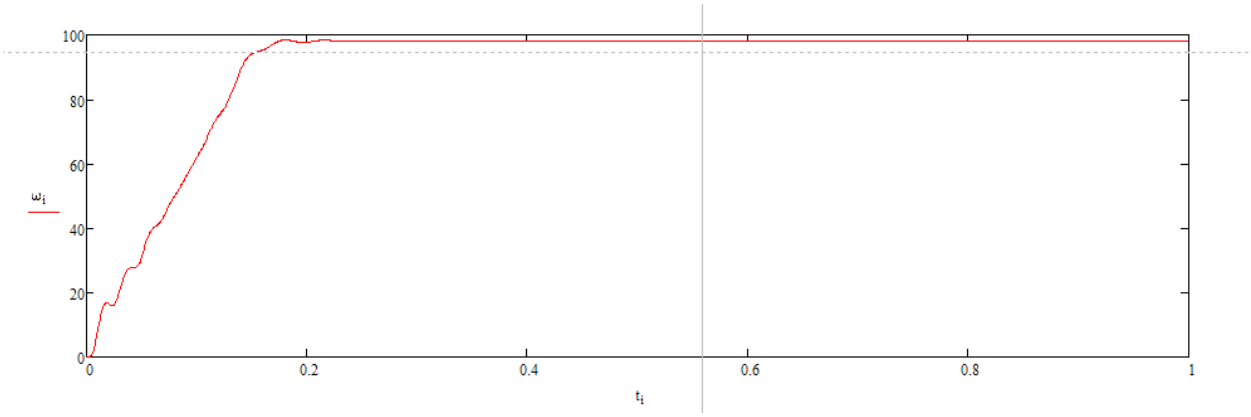


Рисунок В.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Г

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

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right] = 57.28$$

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2 \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left[r1 + \sqrt{(r1)^2 + (x1 + x2)^2}\right]}\right]$$

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2 \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left[r1 + \sqrt{(r1)^2 + (x1 + x2)^2}\right]}\right] = 162.382$$

$td \equiv 0.0005$ $tmax \equiv 0.9$ $n \equiv 2000$ $Mr \equiv Mn$ $Mn = 57.28$ $Mkr = 162.382$

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 7$ $M1 \equiv 0.85 \cdot Mkr$ $M1 = 138.025$ $\lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn \cdot M1}}$ $\lambda = 1.335$ $M2 \equiv \frac{M1}{\lambda}$ $M2 = 103.413$

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

$Rr1 = 1.575$ $Rr2 = 2.102$ $Rr3 = 2.805$ $Rr4 = 3.744$ $Rr5 = 4.997$ $Rr6 = 6.67$ $Rr7 = 8.902$ $s1 = 0.099$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

$$\omega 1 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr1}{R2}\right)}{30} \quad \omega 2 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr2}{R2}\right)}{30} \quad \omega 3 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr3}{R2}\right)}{30}$$

$$\omega 4 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr4}{R2}\right)}{30} \quad \omega 5 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr5}{R2}\right)}{30} \quad \omega 6 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr6}{R2}\right)}{30} \quad \omega 7 \equiv \frac{(\pi \cdot no) \cdot \left(1 - s1 \cdot \frac{Rr7}{R2}\right)}{30}$$

$\omega 1 = 90.841$ $\omega 2 = 86.196$ $\omega 3 = 79.996$ $\omega 4 = 71.721$ $\omega 5 = 60.677$ $\omega 6 = 45.935$ $\omega 7 = 26.26$

$$U1\alpha(u) \equiv Um \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) \qquad U2\alpha(u) \equiv 0 \qquad M(u) \equiv \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot Lm \cdot k\sigma \cdot (u_2 \cdot u_3 - u_1 \cdot u_4)$$

$$U1\beta(u) \equiv Um \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi) \qquad U2\beta(u) \equiv 0$$

$$I1\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_1 - Lm \cdot u_3) \qquad I2\alpha(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_3 - Lm \cdot u_1) \qquad Mc(u) \equiv \begin{cases} Mr & \text{if } u_5 > 0 \\ -Mr & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$I1\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L2 \cdot u_2 - Lm \cdot u_4) \qquad I2\beta(u) \equiv k\sigma \cdot (L1 \cdot u_4 - Lm \cdot u_2)$$

Расчет статической механической характеристики $so := 0$

$$statica(so) := \begin{cases} s_{0,0} \leftarrow so \\ V_{0,0} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad s_{i,0} \leftarrow \frac{i}{n} \\ \quad V_{i,0} \leftarrow \frac{\pi \cdot (1 - s_{i,0}) \cdot no}{30} \\ \quad Rr \leftarrow \begin{cases} Rr7 & \text{if } V_{i,0} < \omega 7 \\ Rr6 & \text{if } \omega 7 \le V_{i,0} < \omega 6 \\ Rr5 & \text{if } \omega 6 \le V_{i,0} < \omega 5 \\ Rr4 & \text{if } \omega 5 \le V_{i,0} < \omega 4 \\ Rr3 & \text{if } \omega 4 \le V_{i,0} < \omega 3 \end{cases} \end{cases}$$

$$Rr(u) \equiv \begin{cases} Rr7 & \text{if } u_5 < \omega 7 \\ Rr6 & \text{if } \omega 7 \le u_5 < \omega 6 \\ Rr5 & \text{if } \omega 6 \le u_5 < \omega 5 \\ Rr4 & \text{if } \omega 5 \le u_5 < \omega 4 \\ Rr3 & \text{if } \omega 4 \le u_5 < \omega 3 \\ Rr2 & \text{if } \omega 3 \le u_5 < \omega 2 \\ Rr1 & \text{if } \omega 2 \le u_5 < \omega 1 \\ R2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Додаток Д

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів

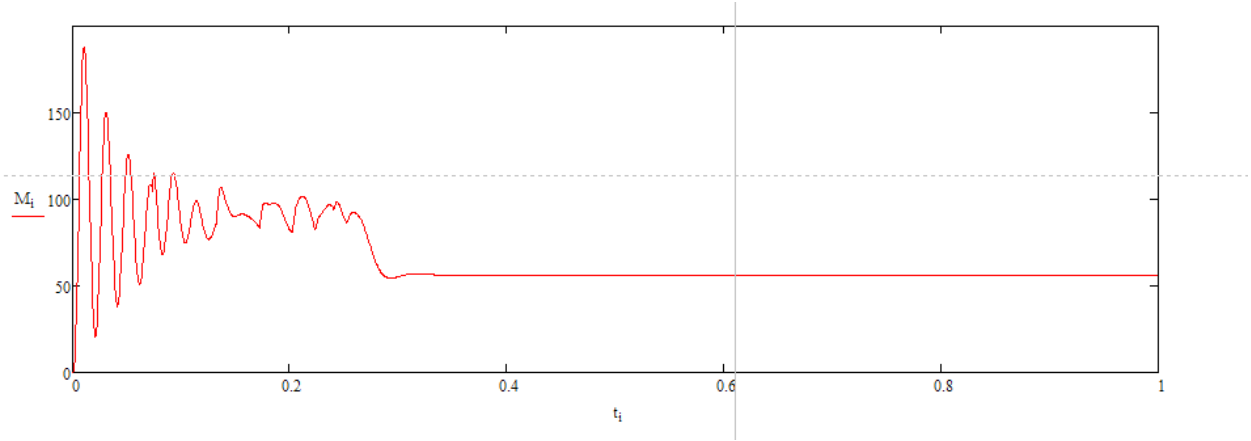


Рисунок Д.1 – Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

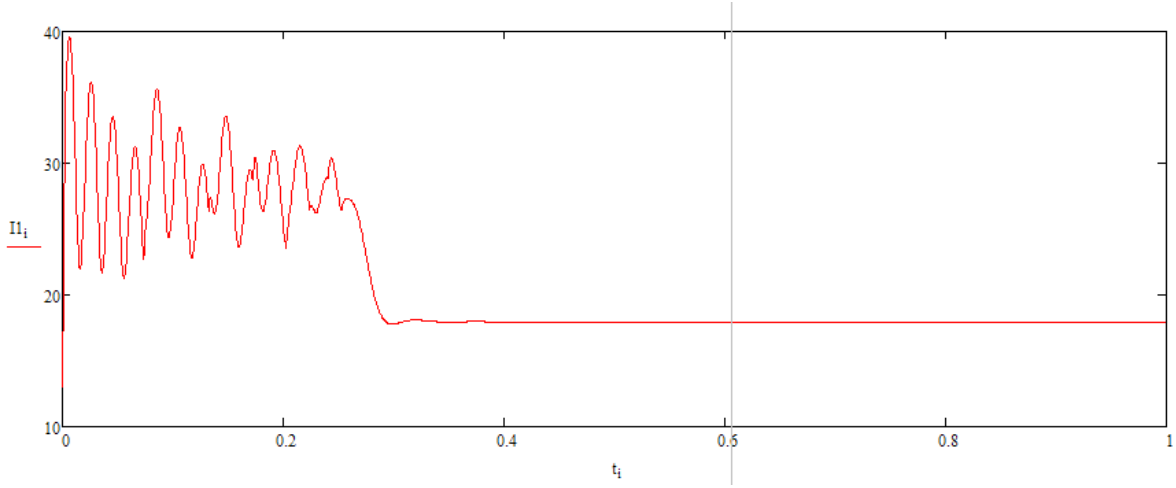


Рисунок Д.2 – Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

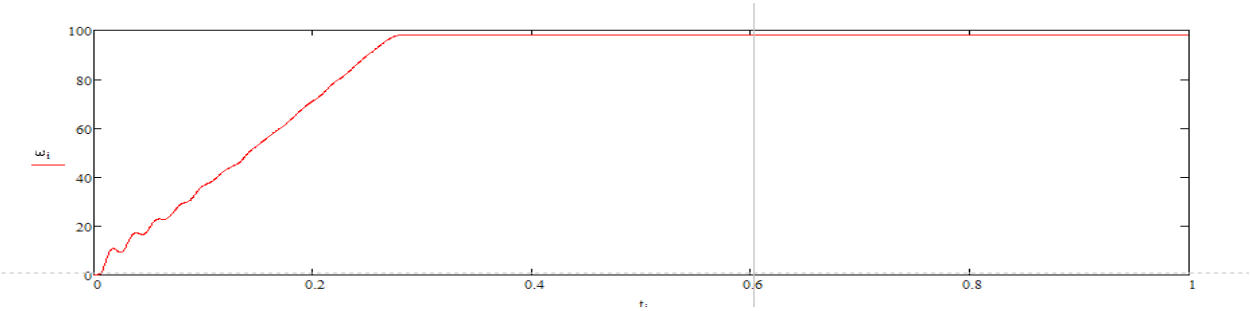


Рисунок Д.3 – Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Е

Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна

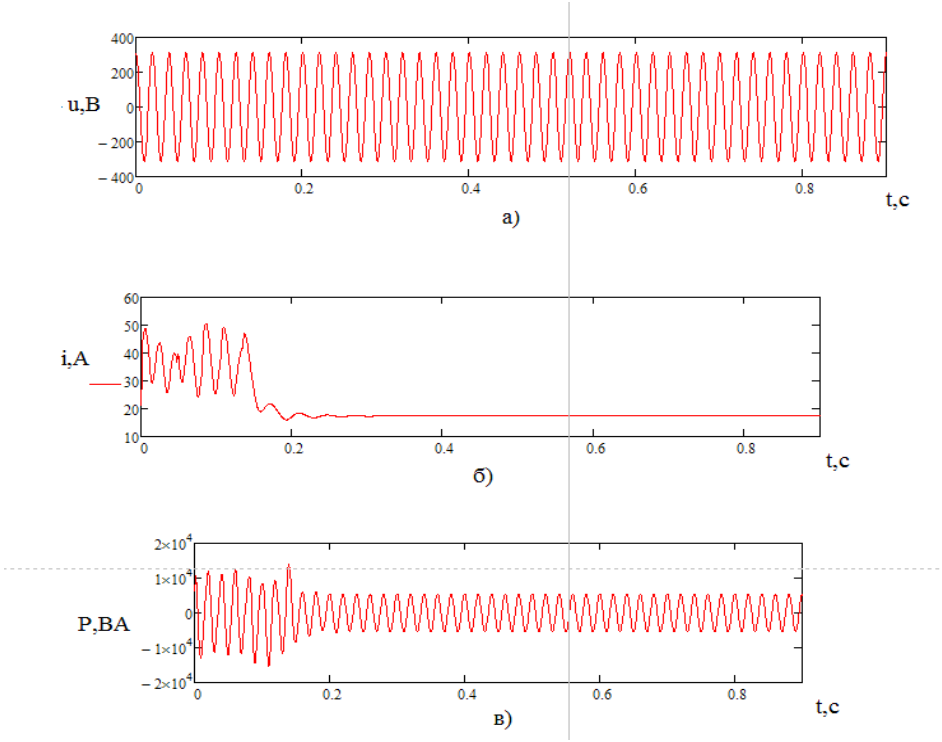


Рисунок Е.1− Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=5

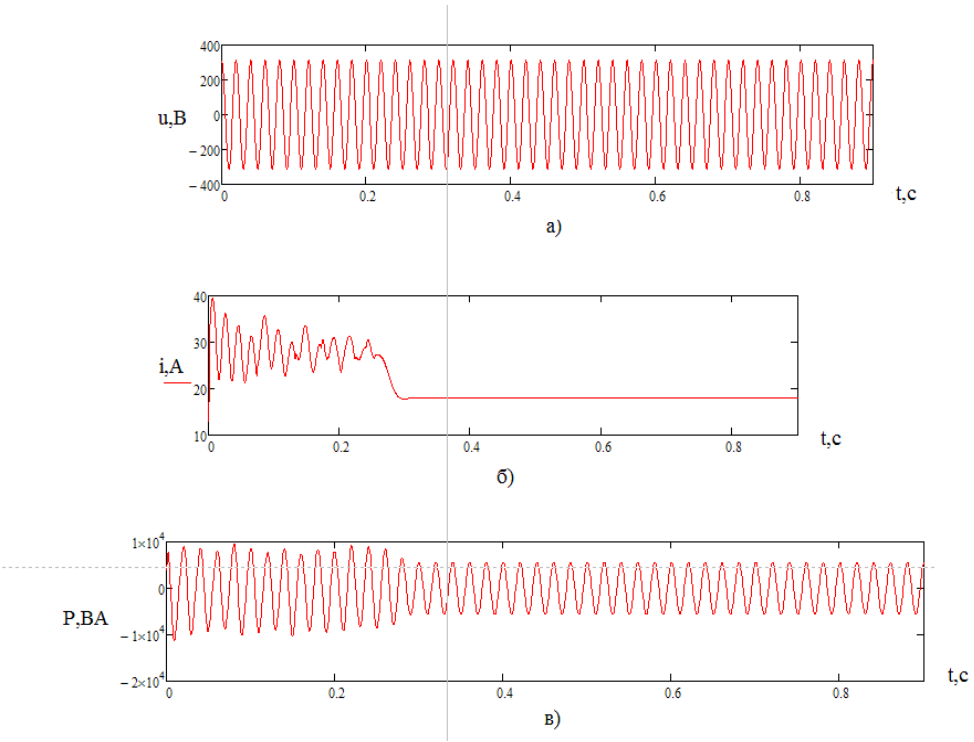


Рисунок Е.2 − Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=7