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 оптимізація системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 т із застосуванням програмованого логічного контролера

Виконала: студентка 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)
Кузнєцов Є.Г.
(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
Завідувач кафедри
к.т.н., доц. Д.М. Морозов
«_____» _____ 2026 року

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

Кузнєцов Євген Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Аналіз та оптимізація системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 т із застосуванням програмованого логічного контролера
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.
Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана
Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму підйому мостового крана 2) Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні 3) Охорона праці та захист навколишнього середовища.
3 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

4 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.		

5 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 підйому мостового крана	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.Г. Кузнєцов
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Кузнєцов Євген Геннадійович: Тема роботи: А Аналіз та оптимізація системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 т із застосуванням програмованого логічного контролера

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 сучасних умовах розвитку промислового виробництва особливого значення набуває проблема підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи підйомно-транспортного обладнання. Одним із найбільш поширених видів такого обладнання у металургійній галузі є мостові крани, які забезпечують переміщення великогабаритних вантажів, сировини, напівфабрикатів і готової продукції в межах виробничих цехів. Безперервність роботи кранових механізмів безпосередньо впливає на продуктивність підприємства, ритмічність технологічного процесу та економічні показники виробництва. Саме тому питання модернізації та автоматизації електроприводів механізмів підйому мостових кранів є актуальним напрямом розвитку сучасної електротехніки та електромеханіки.

У роботі розглянуто реконструкцію електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 тонн, що експлуатується в умовах металургійного виробництва. Необхідність модернізації обумовлена значним фізичним і моральним зношенням існуючого електрообладнання, а також недостатньою надійністю релейно-контакторних систем керування, які

потребують постійного технічного обслуговування та часто стають причиною аварійних простоїв обладнання. В умовах дії ударних навантажень, вібрацій, коливань температури та запиленості виробничого середовища традиційні системи керування не забезпечують необхідного рівня довговічності та ефективності.

У процесі дослідження було проведено детальний аналіз технологічного процесу роботи мостового крана, розглянуто конструктивні та експлуатаційні особливості механізму підйому, а також визначено основні параметри електропривода. Встановлено, що для забезпечення стабільної роботи механізму доцільним є використання асинхронного двигуна з фазним ротором, який характеризується високою надійністю, можливістю плавного пуску та ефективним регулюванням швидкості. У роботі наведено технічні характеристики мостового крана, параметри приводного двигуна типу MTF-311-6, а також досліджено принцип роботи існуючої системи керування механізмом підйому.

Особливу увагу приділено питанням реконструкції електропривода шляхом заміни застарілих релейно-контакторних елементів сучасними безконтактними засобами автоматизації. Запропоновано використання програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-200, який дозволяє значно підвищити надійність системи керування, забезпечити гнучкість налаштування режимів роботи та спростити процес технічного обслуговування. Використання програмованого контролера дає можливість реалізувати сучасні алгоритми керування електроприводом, здійснювати контроль параметрів роботи обладнання та підвищити рівень автоматизації технологічного процесу.

Крім того, у роботі запропоновано заміну кулачкового командоконтролера сучасним джойстиком типу VNSO фірми SPOHN&BURKHARD. Використання такого органа керування забезпечує більш комфортні умови праці оператора, зменшує фізичне навантаження під час керування краном та дозволяє реалізувати

плавніше регулювання швидкості механізму підйому. Завдяки цьому покращуються динамічні характеристики електропривода та знижуються механічні навантаження на елементи конструкції крана.

У ході виконання роботи були проведені розрахунки потужності приводного електродвигуна, визначені статичні моменти навантаження, розраховані параметри редуктора та досліджені режими пуску й гальмування механізму підйому. Встановлено, що обраний асинхронний двигун повністю задовольняє умови роботи за потужністю, нагрівом та перевантажувальною здатністю. Також були визначені часові характеристики перехідних процесів, прискорення механізму під час пуску та еквівалентні навантаження, що виникають у циклі роботи крана.

Важливим етапом дослідження стало математичне моделювання перехідних процесів асинхронного двигуна з фазним ротором. У роботі наведено систему диференціальних рівнянь електромеханічного стану двигуна у нерухомій системі координат α–β, досліджено механічні характеристики електропривода та виконано аналіз процесів реостатного пуску із сімома ступенями пускових резисторів. Проведені розрахунки дозволили визначити оптимальні параметри пускових опорів та оцінити вплив реконструкції на динамічні характеристики привода.

Отримані результати свідчать про те, що запропонована реконструкція електропривода забезпечує підвищення надійності роботи мостового крана, зменшення кількості аварійних відмов, покращення умов експлуатації та зниження витрат на технічне обслуговування обладнання. Використання сучасних засобів автоматизації сприяє підвищенню енергоефективності привода, забезпечує плавний пуск і гальмування механізму, а також підвищує рівень безпеки під час виконання вантажопідйомних операцій.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує доцільність модернізації електроприводів мостових кранів шляхом впровадження програмованих

логічних контролерів, сучасної релейно-контакторної апаратури та вдосконалених систем керування. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час реконструкції діючих кранових механізмів на промислових підприємствах, що дозволить підвищити ефективність виробництва та забезпечити стабільну роботу технологічного обладнання.

Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 тонн шляхом реконструкції системи керування із застосуванням програмованого логічного контролера та сучасних безконтактних засобів автоматизації.

Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є електропривод механізму підйому мостового крана, що працює в умовах металургійного виробництва.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є процеси керування, пуску, регулювання швидкості та автоматизації асинхронного електропривода з фазним ротором механізму підйому мостового крана.

Методи дослідження

У роботі використано такі методи дослідження:

- методи теоретичного аналізу електромеханічних систем;
- методи розрахунку параметрів електроприводів;
- математичне моделювання перехідних процесів асинхронного двигуна;
- методи аналізу механічних характеристик електропривода;
- методи автоматизації технологічних процесів;
- методи дослідження режимів роботи електричних машин;

- комп’ютерне моделювання електромеханічних процесів.

Завдання дослідження:

- Для досягнення поставленої мети у роботі були вирішені такі завдання:
- Провести аналіз технологічного процесу роботи мостового крана та умов експлуатації механізму підйому.
- Дослідити конструктивні та технічні характеристики електропривода мостового крана.
- Виконати аналіз існуючої релейно-контакторної системи керування механізмом підйому.
- Провести розрахунок потужності та вибір приводного асинхронного двигуна.
- Розрахувати параметри редуктора, статичні моменти та часові характеристики пуску.
- Розробити технічне рішення щодо реконструкції електропривода із застосуванням програмованого логічного контролера.
- Запропонувати використання сучасного джойстикового командоконтролера для покращення умов керування.
- Проведести математичне моделювання перехідних процесів асинхронного двигуна з фазним ротором.
- Дослідити механічні характеристики електропривода та процеси реостатного пуску.
- Оцінити технічну ефективність реконструйованого електропривода та перспективи його впровадження у промислових умовах.

Ключові слова: мостовий кран, електропривод, асинхронний двигун, фазний ротор, програмований логічний контролер, автоматизація, механізм підйому, релейно-контакторна схема, перехідні процеси, пускові резистори,

електромеханічна система, SIMATIC S7-200, джойстик VNSO, модернізація, металургійне виробництво.

ABSTRACT

Kuznetsov Yevhen Hennadiiovych: Thesis topic: Analysis and Optimization of the Control System of the Electric Drive of the Hoisting Mechanism of a 5-Ton Bridge Crane Using a Programmable Logic Controller.

Qualification bachelor's thesis for obtaining the higher education degree in specialty 141 Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, scientific supervisor PhD in Engineering, Associate Professor Dyachenko V.V., Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, correspondence form of education, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2026.

In modern conditions of industrial production development, the problem of increasing the efficiency, reliability, and safety of lifting and transport equipment operation becomes of particular importance. One of the most widespread types of such equipment in the metallurgical industry is bridge cranes, which ensure the transportation of large-sized loads, raw materials, semi-finished products, and finished products within production workshops. The uninterrupted operation of crane mechanisms directly affects enterprise productivity, the rhythm of the technological process, and the economic indicators of production. That is why the issues of modernization and automation of electric drives of bridge crane hoisting mechanisms are an актуальним direction of development of modern electrical engineering and electromechanics.

The work considers the reconstruction of the electric drive of the hoisting mechanism of a 5-ton bridge crane operated under conditions of metallurgical production. The necessity of modernization is caused by significant physical and moral wear of the existing electrical equipment, as well as insufficient reliability of relay-contactor control systems, which require constant maintenance and often become the

cause of emergency equipment downtime. Under conditions of shock loads, vibrations, temperature fluctuations, and dustiness of the production environment, traditional control systems do not provide the required level of durability and efficiency.

During the research process, a detailed analysis of the technological process of bridge crane operation was carried out, the design and operational features of the hoisting mechanism were considered, and the main parameters of the electric drive were determined. It was established that to ensure stable operation of the mechanism, it is advisable to use an induction motor with a phase rotor, which is characterized by high reliability, the possibility of smooth starting, and effective speed regulation. The work presents the technical characteristics of the bridge crane, the parameters of the MTF-311-6 drive motor, and also investigates the operating principle of the existing control system of the hoisting mechanism.

Special attention is paid to the issues of reconstruction of the electric drive by replacing outdated relay-contactor elements with modern contactless automation means. The use of the Siemens SIMATIC S7-200 programmable logic controller is proposed, which allows significantly increasing the reliability of the control system, ensuring flexibility of operating mode settings, and simplifying the maintenance process. The use of a programmable controller makes it possible to implement modern electric drive control algorithms, monitor equipment operating parameters, and increase the level of automation of the technological process.

In addition, the work proposes replacing the cam command controller with a modern VNSO joystick manufactured by SPOHN&BURKHARD. The use of such a control device provides more comfortable working conditions for the operator, reduces physical load during crane control, and allows smoother regulation of the hoisting mechanism speed. Due to this, the dynamic characteristics of the electric drive are improved and mechanical loads on the crane structural elements are reduced.

During the work execution, calculations of the drive electric motor power were carried out, static load moments were determined, reducer parameters were calculated,

and starting and braking modes of the hoisting mechanism were investigated. It was established that the selected induction motor fully satisfies the operating conditions in terms of power, heating, and overload capability. Time characteristics of transient processes, acceleration of the mechanism during starting, and equivalent loads arising during the crane operation cycle were also determined.

An important stage of the research was the mathematical modeling of transient processes of the induction motor with a phase rotor. The work presents a system of differential equations of the electromechanical state of the motor in a stationary α–β coordinate system, investigates the mechanical characteristics of the electric drive, and performs an analysis of rheostatic starting processes with seven stages of starting resistors. The performed calculations made it possible to determine the optimal parameters of starting resistances and assess the influence of reconstruction on the dynamic characteristics of the drive.

The obtained results indicate that the proposed reconstruction of the electric drive ensures an increase in the reliability of bridge crane operation, reduction in the number of emergency failures, improvement of operating conditions, and reduction of equipment maintenance costs. The use of modern automation means contributes to increasing the energy efficiency of the drive, ensures smooth starting and braking of the mechanism, and also increases the level of safety during load-lifting operations.

Thus, the conducted research confirms the expediency of modernization of bridge crane electric drives through the implementation of programmable logic controllers, modern relay-contactor equipment, and improved control systems. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results during the reconstruction of existing crane mechanisms at industrial enterprises, which will make it possible to increase production efficiency and ensure stable operation of technological equipment.

Purpose of the Research

The purpose of the research is to increase the efficiency, reliability, and safety of the electric drive operation of the hoisting mechanism of a 5-ton bridge crane by reconstructing the control system using a programmable logic controller and modern contactless automation means.

Object of the Research

The object of the research is the electric drive of the hoisting mechanism of a bridge crane operating under conditions of metallurgical production.

Subject of the Research

The subject of the research is the processes of control, starting, speed regulation, and automation of the induction electric drive with a phase rotor of the bridge crane hoisting mechanism.

Research Methods

- The following research methods were used in the work:
- methods of theoretical analysis of electromechanical systems;
- methods of calculating electric drive parameters;
- mathematical modeling of transient processes of an induction motor;
- methods of analysis of electric drive mechanical characteristics;
- methods of automation of technological processes;
- methods of studying operating modes of electrical machines;
- computer modeling of electromechanical processes.

Research Tasks

- To achieve the set purpose, the following tasks were solved in the work:
- To conduct an analysis of the technological process of bridge crane operation and operating conditions of the hoisting mechanism.
- To investigate the design and technical characteristics of the electric drive of the bridge crane.

- To perform an analysis of the existing relay-contactor control system of the hoisting mechanism.
- To calculate the power and select the drive induction motor.
- To calculate reducer parameters, static moments, and time characteristics of starting.
- To develop a technical solution for reconstruction of the electric drive using a programmable logic controller.
- To propose the use of a modern joystick command controller for improving control conditions.
- To carry out mathematical modeling of transient processes of the induction motor with a phase rotor.
- To investigate the mechanical characteristics of the electric drive and rheostatic starting processes.
- To evaluate the technical efficiency of the reconstructed electric drive and prospects for its implementation under industrial conditions.

Keywords: bridge crane, electric drive, induction motor, phase rotor, programmable logic controller, automation, hoisting mechanism, relay-contactor circuit, transient processes, starting resistors, electromechanical system, SIMATIC S7-200, VNSO joystick, modernization, metallurgical production.

ЗМІСТ

ВСТУП……16
1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму підйому мостового крана……...…19
1.1 Технологічний процес, використання електропривода механізму підйому мостового крану …….19
1.2 Характеристика обладнання мостового крану, електропривод механізму підйому якого реконструюється, за схемами……..22
1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана ……..22
1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану ……...23
1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму підйому мостового крану та формування вихідних даних……..26
2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні…….30
2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна……..30
2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно–контакторних елементів на безконтактні……38
2.2.1 Мета реконструкції……..38
2.2.2 Початкова релейно–контакторна схема і вимоги до реконструкції….40
2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції……41
2.2.3.1 Програмований логічний контролер (ПЛК)……43
2.2.3.2 Джойстик……44
2.2.3.3 Релейно-контакторна апаратура……45
2.2.3.3.1 Лінійний контактор ……46
2.2.3.3.2 Привод пересування моста……48
2.2.3.3.3 Привод пересування візка……..49
2.2.3.3.4 Привод механізму підйому……49

2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода…..50
2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором …….50
2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів……51
2.4 Розрахунок надійності систем керування електроприводом ……57
3 Охорона праці та захист навколишнього середовища…..……..66
3.1 Охорона праці……...66
3.1.1 Загальна характеристика умов праці……...66
3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……69
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ……72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……74
Додаток А Схема електрична принципова електропривода механізму підйому мостового крана до реконструкції……77
Додаток Б Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів……78
Додаток В Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів……79
Додаток Г Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна …….80

ВСТУП

Мостовий кран використовується для переміщення великої маси сировини, матеріалів, напівфабрикатів, готової продукції. Цей тип механізму отримав широке поширення в металургійній промисловості, як один із засобів механізації виробничих операцій та є досить ефективним пристроєм з переміщення вантажів різних категорій.

Задача підвищення надійності підйомно – транспортного обладнання в економічних умовах сьогодення є важливою і актуальною. Значна частина кранового парку, який експлуатується на підприємствах різних галузей, як правило зношена та застаріла.

Особливої уваги заслуговують механізми підйому та переміщення, які функціонують в умовах ударних навантажень, підвищеної вібрації, коливань температури, загазованості і т. ін. В більшості випадків це призводить до частих ремонтів та систематичних простоїв обладнання.

У зв’язку з цим до електрообладнання кранових механізмів висувається ряд основних вимог: висока відмовостійкість, простота в обслуговуванні, помірна ціна. Більшості даних вимог відповідають електроприводи змінного струму, що комплектуються асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором та перетворювачами частоти, що дозволяє отримати жорсткі механічні характеристики, великий діапазон регулювання швидкостей, захист двигуна по різним параметрам, високий ККД, високу надійність, економію електроенергії [1].

У зв’язку з цим особливо актуальним напрямком модернізації кранового електрообладнання є заміна застарілих контактних систем керування на сучасні безконтактні елементи. Традиційні релейно-контакторні схеми, які тривалий час застосовувалися у кранових механізмах, мають ряд суттєвих недоліків. Під час експлуатації контактні елементи піддаються інтенсивному механічному та електричному зношуванню, що призводить до підгоряння контактів, виникнення

дугових процесів, перегріву та частих відмов системи керування. В умовах металургійного виробництва, де обладнання працює при високій температурі, запиленості та вібраціях, ці недоліки проявляються особливо гостро.

Використання безконтактних елементів керування дозволяє значно підвищити надійність роботи електропривода мостового крана. Напівпровідникові пристрої, електронні реле, тиристорні та транзисторні комутаційні елементи не мають рухомих контактів, тому практично не піддаються механічному зношуванню. Це забезпечує стабільність роботи системи керування протягом тривалого часу та суттєво зменшує кількість аварійних зупинок обладнання.

Однією з важливих переваг безконтактних систем є підвищення швидкодії електрообладнання. Електронні елементи забезпечують більш точне та оперативне керування процесами пуску, гальмування та реверсування механізмів крана. Завдяки цьому зменшуються ударні навантаження на механічні вузли, покращується плавність роботи механізмів та знижується ймовірність виникнення аварійних режимів.

Крім того, застосування безконтактних систем керування дозволяє суттєво скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання. Відсутність великої кількості механічних контактів виключає необхідність їх регулярного очищення, регулювання та заміни. Це особливо важливо для підприємств із безперервним циклом виробництва, де навіть короткочасні простої кранового обладнання можуть призводити до значних економічних втрат.

Сучасні безконтактні системи також забезпечують розширені можливості захисту електродвигунів та силового обладнання. Вони дозволяють реалізувати захист від перевантаження, короткого замикання, перегріву, втрати фази, недопустимого зниження або підвищення напруги живлення. Наявність вбудованих засобів діагностики значно спрощує пошук несправностей та підвищує загальний рівень експлуатаційної надійності кранового електрообладнання.

Таким чином, заміна застарілих контактних систем керування на сучасні безконтактні елементи є ефективним напрямком модернізації мостових кранів. Реалізація таких технічних рішень дозволяє підвищити надійність і довговічність роботи обладнання, знизити експлуатаційні витрати, покращити безпеку праці та забезпечити стабільне функціонування кранових механізмів у важких умовах промислового виробництва.

Метою даної роботи є реконструкція електропривода механізму підйому мостового крану вантажопідйомністю 5 тон шляхом інтеграції в існуючу систему керування асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором з реостатним регулюванням програмованого логічного контролера.

1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму підйому мостового крана

1.1 Технологічний процес, використання електропривода механізму підйому мостового крану

Мостовий кран вантажопідйомністю 5 тон виконує підйомно-транспортні операції. Кран забезпечує вертикальний підйом вантажу і пересування його у горизонтальному положенні вздовж і поперек прольоту. Даний тип вантажопідіймального обладнання широко застосовується у виробничих цехах, складських приміщеннях, ремонтних дільницях, металургійній, машинобудівній та будівельній галузях промисловості. Використання мостового крана дозволяє значно підвищити продуктивність праці, механізувати процес переміщення важких вантажів та зменшити фізичне навантаження на обслуговуючий персонал.

Конструктивно мостовий кран складається з металевого моста, який переміщується по підкранових коліях, вантажного візка, механізму підйому, механізму пересування візка та механізму пересування самого моста. Основним робочим органом крана є вантажозахоплювальний пристрій, який може бути виконаний у вигляді гака, електромагніта або спеціального захвату в залежності від характеру вантажів, що транспортуються. Для крана вантажопідйомністю 5 тон найбільш поширеним є використання гакової підвіски, яка забезпечує універсальність та зручність виконання вантажопідйомних робіт.

Механізм підйому призначений для вертикального переміщення вантажу. До його складу входять електродвигун, редуктор, гальмівний пристрій, барабан та канатна система. Електродвигун приводить у рух редуктор, який знижує частоту обертання та збільшує крутний момент, необхідний для підйому вантажу. Обертання від редуктора передається на барабан, на який намотується сталевий канат. Під час обертання барабана здійснюється підйом або опускання вантажу. Для забезпечення безпечної експлуатації у механізмі передбачено електромагнітне гальмо, яке утримує вантаж у нерухомому стані після відключення електродвигуна.

Механізм пересування візка забезпечує переміщення вантажу поперек прольоту крана. Візок рухається по рейках, розташованих на верхній частині моста крана. До складу механізму входять електродвигун, редуктор, ходові колеса та система передачі руху. Завдяки роботі даного механізму забезпечується точне позиціонування вантажу у межах робочої зони крана. Це має особливо важливе значення при монтажних роботах або транспортуванні вантажів у виробничих цехах з великою кількістю технологічного обладнання.

Механізм пересування моста забезпечує рух усього крана вздовж виробничого приміщення або відкритого майданчика. Пересування здійснюється по підкранових рейках за допомогою ходових коліс. Робота механізму дозволяє транспортувати вантажі на значні відстані в межах обслуговуваної ділянки. Для забезпечення синхронної роботи приводів пересування використовуються спеціальні системи керування, які запобігають перекосу моста під час руху.

Особливістю роботи мостового крана є циклічний режим навантаження. У процесі експлуатації механізми крана часто працюють у режимах пуску, гальмування, реверсування та короткочасних перевантажень. Це створює значні динамічні навантаження на електропривод та механічні вузли обладнання. Тому до елементів кранового електрообладнання висуваються підвищені вимоги щодо надійності, міцності та довговічності.

Електрообладнання мостового крана включає силові та керуючі електричні кола, апаратуру захисту, освітлення та сигналізацію. Для приводу механізмів найчастіше використовуються асинхронні електродвигуни змінного струму, які відзначаються простотою конструкції, високою надійністю та невибагливістю в експлуатації. Система керування забезпечує пуск, зупинку, зміну напрямку руху механізмів, а також захист обладнання від аварійних режимів роботи.

Важливе значення для безпечної роботи крана мають системи захисту та блокування. До них належать кінцеві вимикачі, обмежувачі вантажопідйомності, пристрої аварійної зупинки та системи контролю положення механізмів. Кінцеві вимикачі запобігають виходу механізмів за допустимі межі руху, а обмежувачі вантажопідйомності не допускають підйом вантажів, маса яких перевищує номінальну вантажопідйомність крана. Це дозволяє уникнути аварійних ситуацій та пошкодження обладнання.

У сучасних умовах значна увага приділяється модернізації кранового обладнання. На багатьох підприємствах проводиться заміна застарілих контактних систем керування на сучасні безконтактні елементи та електронні пристрої. Це дозволяє підвищити надійність роботи крана, зменшити витрати на технічне обслуговування та покращити умови праці обслуговуючого персоналу. Використання сучасних систем керування також забезпечує більш плавну роботу механізмів та зменшує динамічні навантаження на металоконструкції крана.

Під час експлуатації мостового крана важливе значення має правильна організація технічного обслуговування. Регулярно проводяться огляди металоконструкцій, перевірка стану канатів, гальмівних пристроїв, редукторів, електродвигунів та системи керування. Особлива увага приділяється стану вантажного каната, оскільки його пошкодження може призвести до виникнення аварійної ситуації. Також контролюється стан ходових коліс та рейкових шляхів, від яких залежить плавність пересування крана.

Умови роботи мостового крана часто характеризуються підвищеною запиленістю, вібраціями, коливаннями температури та високою вологістю. У металургійній промисловості додатково діють фактори підвищеної температури та загазованості. Тому електрообладнання та механічні вузли повинні мати відповідний ступінь захисту та забезпечувати стабільну роботу у складних виробничих умовах.

Експлуатація мостового крана вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Машиніст крана повинен добре знати будову обладнання, правила безпечної експлуатації та порядок виконання вантажопідйомних робіт. Від правильності дій оператора значною мірою залежить безпека роботи та збереження вантажів. Перед початком роботи проводиться перевірка справності механізмів, гальм, системи сигналізації та захисних пристроїв.

Таким чином, мостовий кран вантажопідйомністю 5 тон є важливим елементом сучасного промислового виробництва, який забезпечує виконання підйомно-транспортних операцій у різних галузях промисловості. Надійна робота крана залежить від технічного стану механізмів, правильного вибору електрообладнання, своєчасного технічного обслуговування та дотримання

правил експлуатації. Використання сучасних технічних рішень та модернізація систем керування дозволяють підвищити ефективність роботи обладнання, покращити безпеку праці та знизити експлуатаційні витрати підприємства.

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

1.2.1 Основні технічні параметри мостового крана

В таблиці 1.1 представлено загальні технічні параметри мостового крана, в таблиці 1.2 − основні технічні дані й характеристики мостового крана.

Таблиця 1.1 − Загальні технічні параметри мостового крана

Параметр	Примітки
1	2
Тип крана	Кран мостовий спеціальний
Призначення крана	Обслуговування складів і відкритих навантажувально−розвантажувальних майданчиків
Тип привода	електричний
Навколишнє середовище, у якій може працювати кран: найбільша Температура − °С найменша	 Нормальна +40°С (313К) Забороняється робота крана при температурі нижче −20°С
Відносна вологість повітря Вибухо− і пожежезахищеність	98% при 25°С верхня межа не регламентується Виконання звичайне не вибухозахищене
Припустима швидкість вітру, м/с: для робочого стану крана для неробочого стану крана	 15 27
Припустимий ухил площадок установки крана, що розраховується на стійкість	Величина загального поздовжнього ухилу не більше 3%, суміщення не більше двох операцій крім сполучення головного й допоміжного підйому.
Обмеження одночасності виконання робочих операцій крана	Головний і допоміжний підйом
Рід електричного струму й напруги (коло: силове, керувння, робочого освітлення. ремонтного висвітлення)	Силове коло – змінна напруга 380/220В Кола керування – змінна напруга 220В Кола робочого освітлення – змінна напруга 220В Кола ремонтного освітлення – змінна напруга 220В

Таблиця 1.2 − Основні технічні дані й характеристики мостового крана

Параметр	Значення
1	2
Максимальна вантажопідйомність, т Головний підйом Допоміжний підйом	 5 1
Максимальна висота підйому, м Головний підйом Допоміжний підйом	 12 10
Проліт, виліт консолі, м	20,59
База, м	11,2
Колія, м	32
Швидкість підйому, м/хв Головний підйом Допоміжний підйом	 12 20
Швидкість опускання, м/хв Головний підйом Допоміжний підйом	 10 20
Швидкість пересування крана, м/хв	50
Швидкість пересування вантажного візка, м/хв	40
Місце керування:	Кабіна крановика
При роботі	Електричний
При монтажі й випробуванні	Гнучкий кабель
Момент утримуючий, Нм	60
Момент перекидаючий, Нм	14,8

1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів мостового крану

Живлення крану здійснюється від загальноцехової підстанції змінного струму, напругою 220/380 В. Механізм підйому крану вантажопідйомністю 5 т приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором типу MTF – 311 − 6 потужністю 15 кВт і частотою обертання 970 об/хв.

Двигун керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Параметри двигуна наведено в таблиці 1.3 [3].

Таблиця 1.3 − Номінальні параметри двигуна типу MTF – 311 − 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_μ'*
MTF 311−6	220	50	15	1000	0,229	6,5	83,5	0,81	0,048	0,084	0,079	0,11	2,2

Схема електрична принципова електроустаткування мостового крана представлена на слайді графічної частини проекту. Дана схема призначена для керування електродвигунами механізмів підйому, пересування моста і пересування візка.

У її склад входять: схема керування електродвигунами механізмів крана; схема захисної панелі; схема освітлення, сигналізації і опалювання кабіни. Для керування механізмами пересування візка і головного підйому використовується кулачкові контролери типу ККТ–61А. Всі електродвигуни обладнані механічними гальмами типу ТКТГ з електрогідроштовхачами типу ТГМ [2].

Для підйому вантажу необхідно рукоятку контролера SA1 перевести в перше положення «підйом». При цьому замкнуться контакти контролера SA1.1 і SA1.5. Напруга подається на обмотки статора електродвигуна М7. Одночасно отримує живлення електродвигун гідроштовхача М8, який підключений паралельно статору.

Ротор електродвигуна М7 розгальмовується і починає обертатися. Всі контакти контролера в колі ротора розімкнені. Відбувається плавне рушання механізму підйому, оскільки в коло ротора у цей момент введені повністю ступені R4 (4–6) і R4 (7–6) пускового резистора R4.

Перше положення контролера забезпечує тільки плавний процес рушання, тому рукоятку контролера відразу ж необхідно перевести в друге положення «підйом». При цьому додатково до контактів 1 і 5 контролера SA1 замикається контакт SA1.2, який вводить в коло ротора ступінь R4 (1–3). Двигун працює на малій швидкості, здійснюючи підйом вантажу (перша штучна характеристика).

При переведенні рукоятки контролера в третє положення «підйом» додатково замикається контакт контролера SA1.4, який шунтує ступінь R4 (5–6) пускового резистора. Еквівалентний опір в колі ротора електродвигуна М7 зменшується.

Електродвигун переходить працювати на другу штучну характеристику. Швидкість підйому зростає. У четвертому положенні рукоятки контролера додатково замикається контакт SA1.6. В результаті шунтується ступінь R4 (2–3) пускового резистора. Двигун переходить працювати на третю штучну характеристику.

При переведенні рукоятки контролера в п'яте положення «підйом» замикається контакт SA1.8, внаслідок чого шунтується ступінь R4 (7–6) пускового резистора. Двигун переходить працювати на четвертую штучну характеристику. Швидкість підйому буде максимальною.

При цьому залишаються включеними мінімальні опори: секції R4 (1–2) і R4 (4–5), забезпечуючи м'яку механічну характеристику при роботі електродвигуна.

Для спуску вантажу рукоятка контролера SA1 плавно з нульового положення переводиться в положення п'ять «спуск». При цьому замикаються контакти SA1.3 і SA1.7 контролера SA1, змінюючи чергування підключення фаз статора до мережі. Пускові ступені резистора R4 в роторному колі вводяться в тій же послідовності, що і при пуску електродвигуна на «підйом»[2].

Під час роботи механізму підйому важливе значення має правильна послідовність перемикання ступенів пускового резистора, оскільки це дозволяє обмежити пускові струми та зменшити динамічні навантаження на механічні елементи привода. Плавна зміна швидкості забезпечує більш рівномірний розгін електродвигуна та запобігає різким ривкам вантажу під час підйому або опускання. Це позитивно впливає на довговічність редуктора, канатної системи та металоконструкцій мостового крана.

Для забезпечення безпечної експлуатації в схемі керування передбачено ряд електричних блокувань та захисних елементів. Захисна панель здійснює контроль стану силових кіл та забезпечує захист електродвигунів від коротких замикань, перевантажень та недопустимого зниження напруги живлення. У випадку виникнення аварійного режиму живлення електродвигунів автоматично відключається, що запобігає пошкодженню обладнання та виникненню аварійних ситуацій.

Особливу роль у роботі механізму відіграє електрогідравлічний гальмівний пристрій. Після вимкнення електродвигуна живлення електрогідроштовхача припиняється, унаслідок чого гальмо автоматично спрацьовує та надійно утримує вантаж у нерухомому стані. Такий принцип роботи забезпечує високий рівень безпеки під час експлуатації крана, особливо при роботі з важкими вантажами.

Схема освітлення та сигналізації призначена для створення безпечних умов праці машиніста крана. Освітлення кабіни та робочої зони забезпечує нормальну видимість при виконанні вантажопідйомних операцій, а звукова сигналізація використовується для попередження персоналу про початок руху механізмів крана. Наявність системи опалення кабіни дозволяє забезпечити нормальні умови роботи оператора у холодний період року.

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

Двигун механізму підйому крану керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Проект реконструкції полягає в заміни релейно–контактних елементів системи керування АД з фазним ротором з реостатним регулюванням безконтактними.

Мета даної реконструкції направлена на позбавлення від великогабаритних елементів схеми, які часто виходять з ладу і потребують постійного обслуговування.

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

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

Програмовані логічні контролери (ПЛК) на сьогоднішній день є одними з основних засобів автоматизації технологічних процесів у промисловості. За даними міжнародних досліджень у сфері промислової автоматизації, понад 75 % сучасних виробничих систем використовують ПЛК для керування обладнанням різного призначення. Найбільш широке застосування контролери отримали у металургійній, машинобудівній, транспортній, енергетичній та хімічній промисловості, де необхідно забезпечити високу точність, швидкодію та надійність роботи технологічного обладнання.

Програмовані логічні контролери дозволяють створювати системи керування будь-якої складності — від невеликих локальних установок до великих автоматизованих комплексів, що включають десятки або навіть сотні виконавчих механізмів. Сучасний ПЛК може обробляти від 32 до 2048 вхідних і вихідних сигналів залежно від конфігурації системи. При цьому час обробки однієї логічної операції становить у середньому від 0,1 до 1 мс, що забезпечує високу швидкодію систем автоматизації.

Особливе значення використання ПЛК має у системах керування мостовими кранами та підйомно-транспортними механізмами. У процесі роботи

крана необхідно одночасно контролювати режими підйому вантажу, пересування моста, рух вантажного візка, роботу гальмівної системи, кінцевих вимикачів, пристроїв сигналізації та захисту. Традиційні релейно-контакторні схеми керування містять значну кількість механічних контактів, які в умовах інтенсивної експлуатації швидко зношуються. Практика експлуатації показує, що до 40 % несправностей кранового електрообладнання пов’язані саме з пошкодженням контактної апаратури.

Використання програмованих контролерів дозволяє значно скоротити кількість контактних елементів у схемі керування. Завдяки цьому підвищується загальна надійність системи, зменшуються витрати на технічне обслуговування та скорочується час простою обладнання. За статистичними даними, модернізація кранового електрообладнання із застосуванням ПЛК дозволяє знизити кількість аварійних відмов на 25–35 %, а витрати на ремонт і обслуговування — до 30 %.

Сучасні програмовані контролери оснащуються мікропроцесорними системами діагностики та контролю. ПЛК забезпечує безперервний моніторинг параметрів роботи електродвигунів, струмів навантаження, температури, стану датчиків та виконавчих механізмів. У випадку виникнення аварійної ситуації контролер за частки секунди виконує відключення пошкодженої ділянки системи та формує сигнал попередження для оператора. Це дозволяє запобігти серйозним пошкодженням обладнання та підвищити безпеку експлуатації мостового крана.

Ще однією важливою перевагою ПЛК є можливість гнучкого перепрограмування системи. Для зміни алгоритму роботи не потрібно виконувати складний демонтаж електрообладнання або змінювати електричні з’єднання. Достатньо внести зміни у програму контролера, що суттєво скорочує час модернізації та спрощує процес налагодження системи керування.

У сучасних умовах більшість промислових ПЛК підтримують роботу з промисловими мережами та інтерфейсами зв’язку, такими як Modbus, Profibus, Ethernet/IP та Profinet. Швидкість обміну даними у таких мережах може досягати

100 Мбіт/с і більше. Це дозволяє інтегрувати мостові крани у загальну автоматизовану систему керування підприємством, здійснювати дистанційний контроль роботи обладнання та вести архів параметрів технологічного процесу.

Таким чином, застосування програмованих логічних контролерів у системах керування мостовими кранами є сучасним та ефективним напрямком модернізації електрообладнання. Використання ПЛК забезпечує підвищення надійності роботи механізмів, зменшення кількості аварійних відмов, покращення безпеки праці та зниження експлуатаційних витрат підприємства.

Переваги пристроїв: – малі габаритні розміри та площа розташування;
– більше 20 моделей модулів розширення, що дозволяють отримати найбільш економічну конфігурацію; – різноманіття розширень та опцій дозволяють створити гнучку систему, яка звичайно буває доступною за допомогою великих платформ контролерів. Контролери можуть бути конфігуровані додатковими модулями вводу–виводу[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 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні

2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна

При підйомі номінального вантажу потужність двигуна механізму підйому

$$N_{\text{р}} = \frac{Qv}{1020\eta_{\text{м}}} = \frac{50000 \cdot 0{,}2}{1020 \cdot 0{,}85} = 11{,}5 \text{ кВт} \quad , \qquad (2.1)$$

де $\eta_{\text{м}}$ – к.к.д. механізму, $\eta_{\text{м}} = 0{,}85$; Q =50000 Н – зусилля; V=0,2 м/с – швидкість підйому вантажу.

Заздалегідь, до перевірки потужності двигуна по нагріву, приймаємо найближчий по каталогу [3] двигун більшої потужності. Обираємо з довідникової літератури електродвигун змінного струму з фазним ротором типу MTF−311−6 потужністю $P_{\text{н}}$ = 15 кВт, частотою обертання n = 935 хв$^{-1}$, з моментом інерції $J_{\text{р}}$=0,14 Н·м·с^2.

Обраний електродвигун типу MTF−311−6 належить до спеціальної серії крановo-металургійних асинхронних двигунів з фазним ротором, призначених для роботи у важких режимах експлуатації. Двигуни даної серії широко використовуються у механізмах підйому, пересування мостових кранів, вантажних візків та іншого підйомно-транспортного обладнання, де характерними є часті пуски, реверси, короткочасні перевантаження та інтенсивні режими гальмування.

Номінальна потужність двигуна становить 15 кВт, що забезпечує необхідний запас потужності для надійної роботи механізму підйому у всіх експлуатаційних режимах. Частота обертання ротора n = 935 хв$^{-1}$ відповідає шестиполюсному виконанню двигуна та дозволяє отримати необхідні параметри швидкості підйому вантажу після редукування обертів через механічний

редуктор. Використання двигуна з фазним ротором дозволяє реалізувати плавний пуск механізму за рахунок введення додаткових резисторів у роторне коло, що особливо важливо для кранових механізмів, які працюють із великими інерційними навантаженнями.

Момент інерції ротора двигуна Jp = 0,14 Н·м·с² характеризує інерційні властивості електропривода та враховується при розрахунках перехідних процесів пуску і гальмування. Величина моменту інерції впливає на тривалість розгону механізму, динамічні навантаження у передачах та значення пускових струмів. Для кранових механізмів вибір двигуна з оптимальним моментом інерції має важливе значення, оскільки надмірно великі інерційні маси можуть призводити до збільшення часу пуску та підвищених навантажень на механічне обладнання.

Двигун серії MTF має підвищену механічну міцність конструкції, посилену ізоляцію обмоток та ефективну систему охолодження, що забезпечує його надійну роботу в умовах підвищеної запиленості, вібрацій та коливань температури. Допустима кратність пускового моменту для двигунів даного типу становить 2,2–2,8 від номінального значення, а кратність максимального моменту досягає 2,5–3,0, що дозволяє забезпечити впевнений пуск механізму навіть при значних навантаженнях.

Після попереднього вибору електродвигуна виконується перевірка його відповідності умовам роботи за нагрівом, перевантажувальною здатністю та допустимою тривалістю вмикання. Отримані результати дозволяють остаточно підтвердити правильність вибору електродвигуна для привода механізму підйому мостового крана.

Номінальний момент на валу двигуна:

$$M_н = 9{,}55 \cdot P_н/n = 9{,}55 \cdot 13000/935 = 132{,}7 \text{ Нм}. \quad (2.2)$$

Відношення максимального моменту до номінального :

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_н} = \frac{429}{132,7} = 3,1 \quad . \tag{2.3}$$

Передавальне число редуктора:

$$u_{р.р} = \frac{n}{n_б} = \frac{935}{21,96} = 42,6 \quad , \tag{2.4}$$

де $n_б$ = 21,96об/хв частота обертання барабана [2].

В приводі підйому використано редуктор редуктор типу Ц2−300 (сумарна міжосьова відстань А = 300 мм, передавальне число $u_р$=50,94, схема збірки 4, вал тихохідний з кінцем під зубчату муфту) [2]. Граничне консольне навантаження на кінці тихохідного валу редуктора Ц2−300 при середньому режимі роботи приймається 22500Н.

Допустима величина граничного моменту, що передає редуктор:

$$\mathrm{M_{пред}} = \psi \mathrm{M_{ред}} = \psi 9750 \frac{N_{ред}}{n} = 1,6 \cdot 9750 \cdot \frac{18}{935} = 300,3 \ \mathrm{Н \cdot м} \quad , \tag{2.5}$$

де $N_{ред}$=18 кВт − табличне значення потужності при середньому режимі ; $\mathrm{M_{ред}}$ − табличне значення моменту вибраного редуктора; Ψ − кратність пускового моменту середнього режиму роботи $\Psi = 1,6$.[8].

Середній момент електродвигуна в період пуску [9]:

$$\mathrm{M_{п.ср}} = \frac{\mathrm{M_{max}} + \mathrm{M}_{min}}{2} = \frac{2,32\mathrm{M_н} + 1,1\mathrm{M_н}}{2} \approx 240 \ \mathrm{Н \cdot м} \quad . \tag{2.6}$$

Для обраного двигуна кратність максимального пускового моменту:

$$\psi_{\text{max}} = \frac{\text{М}_{\text{п.max}}}{\text{М}_{\text{и}}} = 2{,}28;\ \psi_{min} = 1{,}1 \ldots 1{,}4. \tag{2.7}$$

Оскільки $\text{М}_{\text{п.ср}} = 240\text{Н} \cdot \text{м} < \text{М}_{\text{пред}} = 300{,}3\text{Н} \cdot \text{м}$, то редуктор задовольняє умовам перевантаження двигуна в період пуску.

Так як передавальне число обраного редуктора відрізняється від розрахункового, то знаходимо фактичну швидкість підйому вантажу:

$$V_{\text{ф}} = \frac{\text{П} \times D_{\text{б}} \times n_{\text{б}}}{60 \times u} = \frac{3{,}14 \times 0{,}348 \times 18{,}35}{60 \times 2} = 0{,}167\text{м/с}, \tag{2.8}$$

де $n_{\text{б}} = \frac{n}{u_p} = \frac{935}{50{,}94} = 18{,}35$ хв$^{-1}$ – фактична частота обертання барабана.

Статичний момент на валу двигуна при підйомі вантажів, різних по вазі, визначають за формулою:

$$\text{М}_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п}} a D_{\text{б}}}{2 u_p \eta_{\text{м}}},$$

де $S_{\text{п}}$ – зусилля в навиваному на барабан канату при підйомі вантажу, $S_{\text{п}}$ =12690 Н [2]; a– число гілок, що навиваються на барабан, а=2; Dб=0,348м – діаметр барабана [2].

При підйомі номінального вантажу визначуваний статичний момент на валу двигуна:

$$\text{М}_{\text{п1}} = \frac{12690 \cdot 2 \cdot 0{,}348}{2 \cdot 50{,}94 \cdot 0{,}85} = 102\,\text{Н} \cdot \text{м} \tag{2.9}$$

Зусилля в канаті, звиваного з барабана, при опусканні вантажу Q:

$$S_{\text{оп.1}} = \frac{Q}{2}\frac{1-\eta_{\text{б}}}{1-\eta_{\text{б}}^{u}}\eta_{\text{б}}^{u-1} = \frac{50000}{2}\cdot\frac{1-0{,}97}{1-0{,}97^{2}}\cdot 0{,}97 \quad = 12310\ \text{Н} \tag{2.10}$$

Статичний момент на валу двигуна при опусканні номінального вантажу:

$$\text{М}_{\text{оп.1}} = \frac{S_{\text{оп.1}} a D_{\text{б}}}{2u_{p}}\eta_{\text{м}} = \frac{12310\cdot 2\cdot 0{,}348\cdot 0{,}85}{2\cdot 50{,}94} = 71{,}5\ \text{Н}\cdot\text{м} \tag{2.11}$$

Час пуску приводу при підйомі і опусканні вантажу:

$$t_{\text{п}} = \frac{J_{\text{пр}}\omega}{\text{М}_{\text{п.ср}} \pm \text{М}_{\text{ст}}}, \tag{2.12}$$

де $J_{\text{пр}}$ – момент інерції рухомих мас приведених до валу двигуна, при підйомі або опусканні вантажу; ω – кутова швидкість двигуна; $\text{М}_{\text{ст}}$ – статичний момент на валу двигуна при підйомі або опусканні вантажу; $\text{М}_{\text{ст}} = \text{М}_{\text{п}}$.

Момент інерції рухомих мас механізму, приведений до валу двигуна, при підйомі вантажу

$$J_{\text{пр.п}} = \delta\left(J_{\text{р}} + J_{\text{м}}\right) + m\frac{R_{\text{б}}^{2}}{u_{\text{м}}{}^{2}\eta_{\text{м}}}, \tag{2.13}$$

де $J_{\text{р}}$=0,229 Н·м·с^2– момент інерції ротора двигуна [3]; $J_{\text{м}}$=0,0763 Н·м·с^2 – момент інерції зубчатої муфти з гальмівним шківом, δ =1,2 – коефіцієнт, що враховує моменти інерції мас деталей, що обертаються повільніше, ніж вал двигуна [9]; m – маса вантажу, що піднімається; $m_1 = 5097$ кг; $m_2 = 2549$кг,

$m_з = 1274$кг; $u_м = u_р \cdot u$ = 50,94·2=101,88; $R_б = 0,174$м – радіус барабана по центру намотуваного каната.

При підйомі номінального вантажу:

$$J_{пр.1} = 1,2 \cdot 0,3053 + 5097\frac{0,174^2}{101,88^2 \cdot 0,85} = 0,38\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 \quad (2.14)$$

Час пуску при підйомі вантажу Q відповідно дорівнює:

$$t_{п.1} = \frac{J_{пр.1}\omega}{\text{М}_{п.ср} - \text{М}_{п.1}} = \frac{0,38 \cdot 97,9}{240 - 102} = 0,27 \text{ с} \quad (2.15)$$

$$t_{оп.1} = \frac{J_{пр.1}\omega}{\text{М}_{п.ср} + \text{М}_{оп.1}} = \frac{0,38 \cdot 97,9}{240 + 71,5} = 0,119 \text{ с} \quad (2.16)$$

Прискорення при пуску піднімаємого номінального вантажу:

$$a_{п1} = \frac{\vartheta_ф}{t_{п.1}} = \frac{0,167}{0,27} = 0,62 \text{ м}/\text{с}^2 \quad (2.17)$$

Таке прискорення задовольняє рекомендаціям для перевантаження масових вантажів.

Середньоквадратичний момент, еквівалентний по нагріву дійсному змінному моменту, що виникає від заданого завантаження електродвигуна механізму підйому протягом циклу, в загальному випадку визначають по формулі:

$$M_э = \sqrt{\frac{M_{п.ср}{}^2 \sum t_п + \sum M_{ст}^2 \sum t_у}{\beta \sum t_п + \sum t_у + \beta_0 \sum t_0}} \quad , \tag{2.18}$$

де $\sum t_у -$ загальний час сталого руху, с; $\sum t_п -$ сумарний час пуску протягом одного циклу, с; $\sum t_0 -$ загальний час пауз, с; β – коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолоджування при пуску і гальмуванні:

$$\beta = \frac{1 + \beta_0}{2} \quad , \tag{2.19}$$

де β_0 =0,7 – коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолоджування під час пауз.

$$\beta = \frac{1 + 0{,}7}{2} = 0{,}85.$$

Для мостового крана, що транспортує готову продукцію, середню висоту підйому вантажу приймемо H_c=3м .

Час сталого руху:

$$t_у = \frac{Hc}{v_ф} = \frac{3}{0{,}167} = 18\,с \tag{2.20}$$

Сумарний час за цикл роботи:

- сталого руху

$$\sum t_у = 8t_у = 8 \cdot 18 \; = 144с \tag{2.21}$$

- несталого руху

$$\sum t_{\text{п}} = 2 \cdot 0{,}27 + 0{,}119 \cdot 2 + 0{,}19 + 0{,}13 + 0{,}17 + 0{,}141 = 1{,}409 \text{ с} \quad (2.22)$$

Робочий час:

$$t_{\text{р}} = \sum t_{\text{у}} + \sum t_{\text{п}} = 144 + 1{,}409 = 145{,}409 \text{ с} \quad (2.23)$$

Час пауз за цикл роботи при ТВ=25%:

$$\sum t_0 = \frac{t_{\text{р}}(100\% - \text{ПВ}\%)}{\text{ПВ}\%} = \frac{145{,}409 \cdot (100 - 25)}{25} = 436{,}2 \text{ с} \quad (2.24)$$

Час циклу

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + \sum t_0 = 145{,}409 + 436{,}2 \approx 582 \text{ с}. \quad (2.25)$$

Число включень в годину:

$$n_{\text{в}} = \frac{3600}{582} \cdot 8 \approx 50 \quad (2.26)$$

Еквівалентний момент:

$$\text{М}_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{240^2(1{,}409) + 18 \times \begin{pmatrix} 2 \times 102^2 + 51^2 + 25{,}5^2 + \\ 2 \times 71{,}5^2 + 36^2 + 18^2 \end{pmatrix}}{0{,}85(1{,}409) + 144}} = 70{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.27)$$

Еквівалентна потужність по нагріву:

$$P_e = \frac{M_e \cdot n}{9550} = \frac{70.8 \cdot 935}{9550} = 6,8 кВт .$$

Отже, обраний двигун задовольняє умові нагріву

$$P_e = 6,8 кВт \le P_н = 15 кВт \qquad (2.28)$$

Умова виконується, двигун типу MTF − 311− 6 потужністю 15 кВт і частотою обертання 935 об/хв обираємо як привод механізму підйому.

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно –контакторних елементів на безконтактні

2.2.1 Мета реконструкції

Основами автоматизації технологічного процесу є: підвищення ефективності виробничого процесу та підвищення безпеки виробничого процесу.

Задана мета досягається за допомогою вирішення наступних завдань автоматизації технологічного процесу: поліпшення якості регулювання; підвищення коефіцієнта готовності устаткування; поліпшення ергономіки праці операторів процесу; зберігання інформації про хід технологічного процесу і аварійні ситуації.

Вирішення завдань автоматизації технологічного процесу здійснюється за допомогою: впровадження сучасних методів автоматизації; впровадження сучасних засобів автоматизації [10].

Сучасні системи автоматизації технологічних процесів дозволяють забезпечити стабільність роботи обладнання, підвищити продуктивність праці та

значно знизити вплив людського фактору на функціонування виробничих механізмів. Особливо важливого значення автоматизація набуває у підйомно-транспортних системах, де від точності та надійності роботи обладнання залежить не лише ефективність виробничого процесу, але й безпека обслуговуючого персоналу.

Одним із основних напрямків автоматизації є впровадження мікропроцесорних систем керування та програмованих логічних контролерів, які забезпечують автоматичний контроль параметрів роботи технологічного обладнання. За допомогою сучасних засобів автоматизації здійснюється контроль швидкості електродвигунів, положення механізмів, навантаження, температури, стану захисних пристроїв та інших технологічних параметрів. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Автоматизація технологічного процесу також забезпечує підвищення точності керування механізмами. При використанні сучасних систем керування зменшуються динамічні навантаження на механічне обладнання, покращується плавність пуску та гальмування електроприводів, знижується рівень вібрацій та механічного зношування вузлів. У результаті цього збільшується термін служби електрообладнання та скорочуються витрати на ремонт і технічне обслуговування.

Важливим аспектом автоматизації є створення систем технічної діагностики та архівування інформації. Сучасні автоматизовані системи дозволяють накопичувати дані про режими роботи обладнання, кількість пусків, аварійні зупинки, перевантаження та інші параметри. Отримана інформація використовується для аналізу технічного стану механізмів, прогнозування можливих несправностей та планування профілактичних ремонтів.

Значну роль автоматизація відіграє і в підвищенні рівня безпеки праці. Системи автоматичного захисту забезпечують оперативне відключення обладнання при виникненні коротких замикань, перевантажень, перегріву або порушення нормального режиму роботи механізмів. Крім того, автоматизовані

системи сигналізації та блокування дозволяють попереджати персонал про небезпечні режими роботи та запобігати помилковим діям оператора.

Таким чином, впровадження сучасних засобів автоматизації є необхідною умовою підвищення ефективності, надійності та безпеки сучасного виробництва. Використання автоматизованих систем керування дозволяє забезпечити стабільну роботу технологічного обладнання, покращити умови праці персоналу та підвищити економічну ефективність роботи підприємства.

2.2.2 Початкова релейно–контакторна схема і вимоги до реконструкції

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

Таблиця 2.1− Специфікація апаратів і пристроїв

Позіція/ позначення	Призначення	Кіль–кість	Примітка
M1..M4	Двигуни моста	2	
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 SA1 контактами 1,3,5,7.

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

2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції

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

Застосування програмованого логічного контролера у системі керування електроприводом мостового крана дозволяє суттєво підвищити надійність, функціональність та безпеку роботи обладнання. У порівнянні з традиційними релейно-контакторними схемами керування, які містять значну кількість механічних контактів, програмований контролер забезпечує виконання логічних операцій програмним способом, що дозволяє зменшити кількість комутаційної апаратури та підвищити експлуатаційну довговічність системи.

У процесі експлуатації мостових кранів кулачкові контролери типу ККТ-62 піддаються значному механічному зношуванню внаслідок великої кількості перемикань. Зношування контактних поверхонь призводить до підгоряння контактів, погіршення електричного контакту, виникнення іскріння та збільшення ймовірності аварійних відмов. Особливо інтенсивно дані недоліки проявляються в умовах підвищеної запиленості, вібрацій та коливань температури, характерних для промислових підприємств. Використання програмованого логічного контролера дозволяє мінімізувати вплив зазначених факторів та забезпечити більш стабільну роботу системи керування.

Для реалізації реконструкції пропонується використання джойстика типу VNSO з дискретними виходами замість кулачкового контролера ККТ-62. Джойстик VNSO є сучасним командоапаратом промислового виконання, спеціально

призначеним для систем керування підйомно-транспортними механізмами. Конструкція джойстика забезпечує високу точність подачі команд та покращує ергономічні умови роботи машиніста крана. Керування механізмами здійснюється плавними рухами рукоятки, що значно зменшує фізичне навантаження на оператора у процесі тривалої роботи.

Дискретні виходи джойстика формують електричні сигнали, які надходять на входи програмованого логічного контролера. ПЛК виконує обробку команд відповідно до заданого алгоритму та формує сигнали керування виконавчими апаратами електропривода. Такий принцип побудови системи дозволяє реалізувати необхідні блокування, захисти та контроль послідовності виконання операцій.

Важливою перевагою використання програмованого контролера є можливість впровадження додаткових функцій автоматизації без суттєвої зміни електричної схеми. У системі можуть бути реалізовані захист від перевантаження електродвигунів, контроль кінцевих положень механізмів, обмеження одночасного виконання небезпечних операцій, контроль справності гальмівної системи та аварійна сигналізація. Крім того, ПЛК дозволяє вести діагностику роботи обладнання та реєструвати аварійні режими для подальшого аналізу.

Використання джойстикового керування також позитивно впливає на точність виконання вантажопідйомних операцій. Завдяки компактності та зручності конструкції оператор отримує можливість більш плавного і точного керування механізмами підйому та пересування крана. Це особливо важливо при роботі з великогабаритними або відповідальними вантажами, де необхідна висока точність позиціонування.

Таким чином, запропонована реконструкція системи керування мостового крана із застосуванням програмованого логічного контролера та джойстика VNSO дозволяє підвищити надійність роботи електропривода, покращити умови праці оператора, зменшити витрати на технічне обслуговування та забезпечити більш високий рівень безпеки експлуатації обладнання.

2.2.3.1 Програмований логічний контролер (ПЛК)

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

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

• з живленням = 24В і транзисторними вихідними каскадами,

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

Всі центральні процесори позволяют проводити підключення модулів розширення .

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

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

Напруга живлення центрального процесора	230В
Споживаний струм	320 мА
Споживана потужність	17Вт
Кількість дискретних входів	24

Кількість дискретних виходів	16
Тип вихідних каскадів	реле(сухой контакт)
Вихідна напруга	250В
Тривалий струм одного виходу, не більш	2,0А

Центральні процесори S7 - 200 забезпечені вбудованим блоком живлення напругою -24В для живлення вхідних кіл контроллерів. Залежно від модифікації центрального процесора вихідний струм блоку живлення може складати 180, 280 або 400мА.

Якщо потужності цих блоків живлення недостатньо, то спільно з контроллерами S7 - 200 можуть бути використані зовнішні блоки живлення сімейства SITOP power.

Блоки живлення SITOP Power 24В/3.5А призначені для живлення центральних процесорів і модулів програмованих контроллерів SIMATIC S7 - 200, а також їх зовнішніх кіл. Вони виконують перетворення вхідної однофазної напруги змінного струму промислової частоти в стабілізовану вихідну напругу - 24В і забезпечують електронний захист від коротких замикань в колі навантаження.

Для програмування всіх типів центральних процесорів SIMATIC S7-200 може бути використано програмне забезпечення STEP 7 Micro / WIN. н

Розробка програм виконується на мовах LAD (Ladder Diagram- діаграми сходовій логіки), STL (Statement List -список інструкцій) і FBD (Function Block Diagram - діаграми функціональних блоків).

2.2.3.2 Джойстик

Кулачковий командоконтролер ККТ-62, що було використано в початковій схемі здійснює безпосередню комутацію силових кіл.

Необхідність комутації великих струмів обумовлює відповідні габарити контактів, зусилля пружин і, таким чином, від оператора потрібні значні зусилля для перемикання ступенів. Враховуючи це, зявляється доцільним застосування органа керування нового покоління – джойстика.

До установки пропонується одноосьовий командоконтролер VNSO (джойстикового типу) фірми SPOHN&BURKHARD [12], призначений для промислового застосування в вантажопідьомних механізмах, електричної гідравліці, підйомно-транспортном устаткуванні, навантажувачах.

Основні технічні дані командоконтролера VNSO: номінальна робоча напруга 230В, номінальний робочий струм 16А, кількість позицій напрямків 7-0-7 з фіксацією у кожному положенні.

Для визначення положення рукоятки командоконтролера передбачена прозора гравірувальна пластина.

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

2.2.3.3 Релейно-контакторна аппаратура

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

Контактори серії Sirius 3RT10 характеризуються високою надійністю, компактними габаритами та значним ресурсом роботи, що дозволяє ефективно використовувати їх у системах керування електроприводами промислового обладнання. Дані контактори призначені для комутації асинхронних електродвигунів у режимах частих пусків, реверсів та гальмувань, характерних для підйомно-транспортних механізмів. Конструкція апаратів забезпечує високу

електричну та механічну зносостійкість, а також стійкість до вібрацій і температурних коливань. Контактори Sirius 3RT10 підтримують можливість встановлення додаткових допоміжних контактів, теплових реле та електронних модулів керування, що значно розширює функціональні можливості системи автоматизації та підвищує рівень захисту електрообладнання.

2.2.3.3.1 Лінійний контактор

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

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

Для живлення електромаенитних приводів напруга подається на клеми А1/А2 бічного електронного модуля.Керуючі входи контактора виведени на 7-полюсний штекерний роз'єм.

Потужність, яку споживає електромагнитний привод при включенні 280ВА, при утримані 4,4ВА.

Контактор типу 3RT1055 належить до серії силових комутаційних апаратів промислового призначення, які широко застосовуються у системах керування електроприводами підйомно-транспортного обладнання, вентиляційних установок, насосних агрегатів та інших електромеханічних систем. Даний контактор має типорозмір S6 та розрахований на комутацію значних струмів навантаження, що дозволяє використовувати його у колах живлення потужних асинхронних електродвигунів.

Номінальний робочий струм контактора становить 185 А при категорії застосування АС-3, що забезпечує можливість комутації електродвигунів

потужністю до 90 кВт при напрузі мережі 380–400 В. Номінальна ізоляційна напруга контактора складає 1000 В, а допустима імпульсна напруга досягає 8 кВ. Такі технічні характеристики забезпечують високий рівень електричної міцності та надійності роботи апарата у важких умовах експлуатації.

Контактор обладнаний електромагнітним приводом з електронним модулем керування, який забезпечує стабільне спрацьовування при коливаннях напруги живлення. Живлення котушки здійснюється змінною напругою в діапазоні 200–277 В через клеми A1/A2 електронного модуля. Наявність електронної системи керування дозволяє зменшити енергоспоживання привода та підвищити довговічність електромагнітної системи.

Потужність споживання електромагнітного привода у момент включення становить 280 ВА, що забезпечує необхідне тягове зусилля для надійного замикання силових контактів. Після спрацьовування контактора електронний модуль автоматично переводить привід у режим утримання, при якому споживана потужність зменшується до 4,4 ВА. Завдяки цьому значно знижуються теплові втрати, нагрівання котушки та загальне енергоспоживання системи керування.

Контактор 3RT1055 має три головні силові контакти та допоміжні контакти для реалізації схем блокування, сигналізації та дистанційного контролю стану апарата. Механічна зносостійкість контактора становить понад 10 мільйонів циклів комутації, а електрична зносостійкість — до 1 мільйона циклів у режимі AC-3. Це забезпечує тривалий термін експлуатації обладнання навіть в умовах інтенсивної роботи.

Конструкція контактора передбачає можливість швидкого монтажу на монтажну панель або DIN-рейку, а також підключення додаткових модулів захисту та допоміжних контактних блоків. Ступінь захисту контактів відповідає класу IP20, що забезпечує безпечну експлуатацію при дотриманні вимог електробезпеки.

Застосування контактора типу 3RT1055 у системі керування мостового крана дозволяє забезпечити надійну комутацію силових кіл електропривода,

підвищити довговічність електрообладнання та покращити загальну надійність роботи системи керування механізмами крана.



Рисунок 2.1 Лінійний контактор (КМ) триполюсний типа 3RT1055

2.2.3.3.2 Привод пересування моста

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

Для комутації пускових опорів кола ротора приводу руху моста (К3.1-К3.7) вибраний чотириполюсний контактор 3RT1325(S0) живляча напруга

керування 230В, робочий струм 35А, потужність включення/утримання 61/9,8ВА.

2.2.3.3.3 Привод пересування візка

Коммутація пускових опорів (КМ4,КМ5,К2.1-К2.7) здійснюється триполюсними контакторами 3RT1025(типоразмер S0), живляча напруга керування 230В, робочий струм 17А.

Потужність, споживана електромагнитнім приводом на включення / утримання 61 /7,8ВА.

2.2.3.3.4 Привод механізму підйому

Коммутація пускових опорів (КМ6, КМ7,К1.1- К1.7) здійснюється триполюсними контакторами 3RT1054 (типорозмір S6), живляча напруга керування 230В, рабочий ток 150А.

Потужність, споживана електромагнитнім приводом на включення / утримання 300 /5,8ВА.

Контактори типу 3RT1054 серії Sirius виробництва концерну Siemens призначені для роботи у силових колах електроприводів з інтенсивними режимами комутації та високими пусковими навантаженнями. Застосування даних контакторів у колах комутації пускових резисторів забезпечує надійне та своєчасне шунтування ступенів пускового опору під час розгону електродвигуна. Контактори мають високу механічну та електричну зносостійкість, що особливо важливо для кранових механізмів із частими пусками та реверсами. Конструкція апаратів забезпечує стійкість до вібрацій, електродинамічних навантажень і

коливань температури. Наявність електронного модуля керування дозволяє зменшити енергоспоживання котушки, знизити нагрів та підвищити довговічність комутаційного обладнання.

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]:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}}; \quad u_{1\beta} = \mathrm{R}_1 \imath_{1\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} \\ \mathrm{u}_{2\alpha} = R_2^{'} i_{2\alpha} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} + \omega_r p_n \psi_{2\beta}; \quad \mathrm{u}_{2\beta} = R_2^{'} i_{2\beta} + \dfrac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} - \omega_r p_n \psi_{2\alpha}, \end{cases} \tag{2.29}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_\sigma (\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}), \quad k_\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}. \tag{2.30}$$

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]:

$$\bar{\psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2; \quad \bar{\psi}_2 = L_2^{'} \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1 \tag{2.31}$$

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:

$$M - Mc = j\frac{d\omega_r}{dt}, \tag{2.32}$$

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]:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\psi_{1\alpha}}{\mathrm{dt}} = u_{1\alpha} - \mathrm{R}_1\imath_{1\alpha}; \quad \frac{\mathrm{d}\psi_{1\beta}}{\mathrm{dt}} = u_{1\beta} - \mathrm{R}_1\imath_{1\beta}; \frac{\mathrm{d}\psi_{2\alpha}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\alpha} - R_2^{'}i_{2\alpha} - \omega_r p_n \psi_{2\beta}; \\ \frac{\mathrm{d}\psi_{2\beta}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{u}_{2\beta} - R_2^{'}i_{2\beta} + \omega_r p_n \psi_{2\alpha}; \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J} \end{cases} \tag{2.33}$$

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

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

Таблиця 2.2 − Номінальні параметри двигуна типу MTF – 311 − 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_μ'*
MTF 311−6	220	50	15	1000	0,229	6,5	83,5	0,81	0,048	0,084	0,079	0,11	2,2

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:

$$u_{1\alpha} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi); u_{1\beta} = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (2.34)$$

Знаходимо номінальний струм:

$$\mathrm{I}_{1\phi} = \frac{\mathrm{P_n}}{3\mathrm{U}_{\text{фн}} \cdot \eta_н \cdot \cos\phi_н}. \quad (2.35)$$

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

$$\mathrm{I}_{1\phi} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0,835 \cdot 0,81} = 33,603A.$$

Отримаємо абсолютні значення опорів:

$$\mathrm{R}_1 = r_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}};\ \mathrm{R}_2 = r'^*_2 \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}; X_1 = X_1^* \cdot \frac{U_{1номф}}{\mathrm{I}_{1\phi}}; \quad (2.36)$$

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

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.

$$\mathrm{R}_1 = 0,048 \cdot \frac{220}{33,603} = 0,314\ Ом;\ \mathrm{R}_2 = 0,079 \cdot \frac{220}{33,603} = 0,517\ Ом;$$

$$X_1 = 0,084 \cdot \frac{220}{33,603} = 0,55 \text{ Ом}; X'_2 = 0,11 \cdot \frac{220}{33,603} = 0,72 \, Ом;$$

$$X_\mu = 2,2 \cdot \frac{220}{33,603} = 14,404 \, Ом \ .$$

За формулами знаходимо значення індуктивностей:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0}. \tag{2.37}$$

$$L_1 = \frac{0,55 + 14,404}{314} = 0,048 \text{ Гн}; \quad L_2 = \frac{0,72 + 14,404}{314} = 0,048 \text{ Гн};$$

$$L_m = \frac{14,404}{314} = 0,046 Гн \, .$$

Номінальний момент:

$$\mathrm{M}_н = \frac{3\mathrm{R}_2'}{s_n \cdot \omega_c} \cdot \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s_n})^2 + (X_1 + X_2')^2}. \tag{2.38}$$

$$\mathrm{M}_н = \frac{3 \cdot 0,517}{0,065 \cdot 104,72} \cdot \frac{220^2}{(0,314 + \frac{0,517}{0,065})^2 + (0,55 + 0,72)^2} = 158,2 Нм.$$

Критичний момент:

$$\mathrm{M}_{КР} = \frac{3}{2 \cdot \omega_c} \cdot \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \tag{2.39}$$

$$\mathrm{M}_{КР} = \frac{3}{2 \cdot 104,72} \cdot \frac{220^2}{(0,314 + \sqrt{0,314_1^2 + (0,55 + 0,72)^2}} = 427 \text{ Нм}.$$

Визначення коефіцієнта kσ

$$k\sigma=\frac{1}{L_1\cdot L_2-L_m}=\frac{1}{0,048\cdot 0,048-0,046}=5281.$$

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

Номінальна частота обертання: $n_н = п_0 (1-s) =1000(1-0,065)=935$ об/хв.

Номінальний момент: $M=9550\frac{P_H}{n_H}=9550\frac{15}{935}$ =153 Нм

Максимальний момент: M_{max} =153×2,8=429 Нм

Приймаємо для форсованого пуску величину пікового моменту:

M_1 =0,7M_{max} =0,7 ×429= 300 Нм.

Відношення пікового й перемикаючого моментів (0,7×2,8=1,96):

$$\lambda=\sqrt[6]{\frac{1}{S_{\text{ном}}\times M_1'}}=\sqrt[6]{\frac{1}{0,065\times 1,96}}=1,4. \qquad (2.40)$$

Перемикаючий момент:

$$M_2=\frac{M_1'}{\lambda}=\frac{1,96}{1,4}=1,4\ . \qquad (2.41)$$

Внутрішній опір ротора:

$$r_p=\frac{U_{рном}S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{\text{рном}}}=\frac{172\times 0,065}{\sqrt{3}\times 42}=0,154\ \text{Ом}. \qquad (2.42)$$

Повні опори кола ротора на кожному ступені:

$R_6=\lambda r_p$ =1,4×0,154=0,216 Ом;

$R_5=\lambda^2 r_p$ =1,4^2×0,154=0,3 Ом;

$R_4=\lambda^3 r_p$ =1,4^3×0,154=0,42 Ом;

$R_3=\lambda^4 r_p$ =1,4^4×0,154=0, 6 Ом;

$R_2=\lambda^5 r_p=1,4^5\times0,154=0,83$ Ом;

$R_1=\lambda^6 r_p=1,4^6\times0,154=1,15$ Ом.

Опори окремих секцій пускового реостата:

$r_6=R_6-r_p=0,216-0,154=0,062$ Ом;

$r_5=R_5-R_6=0,3-0,216=0,084$ Ом;

$r_4=R_4-R_5=0,42-0,3=0,12$ Ом;

$r_3=R_3-R_4=0,6-0,42=0,18$ Ом;

$r_2=R_2-R_3=0,83-0,6=0,23$ Ом;

$r_1=R_1-R_2=1,15-0,83=0,32$ Ом.

Загальний опір пускового реостата:

$R=r_1+r_2+r_3+r_4+r_5+r_6=0,32+0,23+0,18+0,12+0,084+0,062=0,996$ Ом .

Критичне ковзання:

$$S_{\hat{e}\eth}=S_i\left(\lambda+\sqrt{\lambda^2-1}\right)=0,065\left(2,8+\sqrt{2,8^2-1}\right)=0,35.$$

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

$$S_{\mathring{a}1}=\frac{S_{\hat{E}\eth}}{\frac{M_{\max}}{M_1}+\sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{M_1}\right)^2-1}}=\frac{0,35}{\frac{1}{0,7}+\sqrt{\left(\frac{1}{0,7}\right)^2-1}}=0,14,$$

$n_e=n_0(1-Se_1)=1000(1-0,14)=860$ об/хв.

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

$$S_{p1} = S_{e1}\frac{R_1}{r_p} = 0{,}14\frac{1{,}15}{0{,}154} = 0{,}99;$$

$n_1 = n_0(1-Sp_1) = n_0(1-0{,}99) = 1000\times 0{,}01 = 10$ об/хв;

$$S_{p2} = S_{å1}\frac{R_2}{r_p} = 0{,}91\times 0{,}83 = 0{,}75;$$

$n_2 = n_0(1-Sp_2) = n_0(1-0{,}75) = 1000\times 0{,}25 = 250$ об/хв;

$$S_{p3} = S_{å1}\frac{R_3}{r_p} = 0{,}91\times 0{,}6 = 0{,}55;$$

$n_3 = n_0(1-Sp_3) = n_0(1-0{,}55) = 1000\times 0{,}45 = 450$ об/хв;

$$S_{p4} = S_{å1}\frac{R_4}{r_p} = 0{,}91\times 0{,}42 = 038;$$

$n_4 = n_0(1-Sp_4) = n_0(1-0{,}38) = 1000\times 0{,}62 = 620$ об/хв;

$$S_{p5} = S_{å1}\frac{R_5}{r_p} = 0{,}91\times 0{,}3 = 0{,}27;$$

$n_5 = n_0(1-Sp_5) = n_0(1-0{,}27) = 1000\times 0{,}73 = 730$ об/хв;

$$S_{p6} = S_{å1}\frac{R_6}{r_p} = 0{,}91\times 0{,}216 = 0{,}196;$$

$n_6 = n_0(1-Sp_6) = n_0(1-0{,}196) = 1000\times 0{,}803 = 803$ об/хв.

Перепад швидкостей на відповідних ступенях:

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

$\Delta n_2 = n_2 - n_1 = 250\text{-}10 = 240$ об/хв;

$\Delta n_3 = n_3 - n_2 = 450\text{-}250 = 200$ об/хв;

$\Delta n_4 = n_4 - n_3 = 620\text{-}450 = 170$ об/хв;

$\Delta n_5 = n_5 - n_6 = 730\text{-}620 = 110$ об/хв;

$\Delta n_6 = n_6 - n_5 = 803\text{-}7300 = 73$ об/хв;

$\Delta n_7 = n\ e\text{-}_e - n_6 = 860\text{-}803 = 57$ об/хв..

Час пуску на відповідних ступенях:

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

$$t_1 = 0{,}229\frac{10}{300-214}\ln\frac{1{,}96-1}{1{,}4-1} = 0{,}023\text{c};$$

$$t_2 = 0{,}0023\times240 = 0{,}56\text{c};$$

$$t_3 = 0{,}0023\times200 = 0{,}47\text{c};$$

$$t_4 = 0{,}0023\times170 = 0{,}4\text{c};$$

$$t_5 = 0{,}0023\times110 = 0{,}26\text{c};$$

$$t_6 = 0{,}0023\times73 = 0{,}17\text{c};$$

$$t_7 = 0{,}0023\times57 = 0{,}13\text{c}.$$

В додатку Б наведено програму розроблену в пакеті Mathcad 14 з реактивним моментом опору на валу M_H та початковою фазною напругою статора $\varphi = \pi/2$ рад.

У програмі змінна "n" визначає кількість точок для побудови графіків, t_d – крок розрахунку. Графіки перехідних процесів M(t), ω(t), i_1(t) наведені на рисунках В.1–В.3 додатку В. На рисунку Г.1 додатку Г наведено графіки функцій напруги, струму та потужності під час пуску АД.

2.4 Розрахунок надійності систем керування електроприводом

Значення експлуатаційної інтенсивності відмов λ_e більшості груп елементів розраховуються по математичній моделі [14]:

$$\lambda_e = \lambda_б \prod_{i=1}^{m} K_i , \qquad (2.43)$$

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

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

m – число чинників, що враховуються.

Значення експлуатаційної інтенсивності відмов λе для більшості груп елементів визначається не тільки базовими параметрами надійності, але й умовами експлуатації обладнання, режимами роботи та впливом зовнішніх факторів. Базова інтенсивність відмов λб характеризує середнє значення кількості відмов елемента за одиницю часу у нормальних умовах експлуатації, які встановлені заводом-виробником або нормативною документацією. Однак у реальних умовах роботи електрообладнання мостового крана значення інтенсивності відмов може суттєво відрізнятися від базового.

Для врахування впливу умов експлуатації у математичній моделі використовуються поправочні коефіцієнти Кі. Дані коефіцієнти враховують температуру навколишнього середовища, вологість, вібрації, запиленість, режим навантаження, частоту комутацій та інші фактори, які впливають на надійність роботи елементів системи. Наприклад, при роботі електрообладнання у важких умовах металургійного виробництва значення коефіцієнтів можуть збільшуватися у 1,5–2 рази у порівнянні з нормальними умовами експлуатації.

Для контактної апаратури кранового електропривода одним із найбільш важливих факторів є кількість комутацій за одиницю часу. Часті пуски, реверси та гальмування призводять до інтенсивного зношування контактних поверхонь, виникнення електричної дуги та перегріву елементів. У результаті цього експлуатаційна інтенсивність відмов контакторів, реле та контролерів значно зростає. Саме тому при реконструкції системи керування доцільно застосовувати сучасні безконтактні елементи та програмовані логічні контролери, які мають значно більший ресурс роботи.

Важливий вплив на значення λе також має температурний режим роботи обладнання. Підвищення температури на кожні 10 °С може збільшувати інтенсивність відмов електронних компонентів у 1,3–1,8 раза. Особливо чутливими до перегріву є напівпровідникові елементи, ізоляція обмоток

електродвигунів та електромагнітні котушки контакторів. Тому для забезпечення необхідної надійності електрообладнання важливе значення мають ефективне охолодження та правильний вибір апаратури за потужністю і струмом.

Після визначення значень експлуатаційної інтенсивності відмов для окремих елементів виконується розрахунок загальної надійності системи керування. На основі отриманих результатів визначаються найбільш ненадійні вузли системи та оцінюється ефективність запропонованих заходів щодо реконструкції електропривода. Це дозволяє обґрунтувати вибір сучасних засобів автоматизації та підвищити загальний рівень експлуатаційної надійності мостового крана.

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

$$\lambda_e=(\lambda_{кр}k_t+\lambda_{кор}k_E)\,k_Q\,k_{L.}. \qquad (2.44)$$

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

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

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

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

$$\lambda_e=\lambda_б\cdot k_t\,k_E\,k_П.$$

Математична модель прогнозування значень експлуатаційної інтенсивності відмов кулачкового командоконтролера:

$$\lambda_e = (\lambda_б^{(ки)\cdot} k_F k_к + \lambda_б^{(вкл)} NF) \cdot k_Р k_П k_E .$$

Пояснення коефіцієнтів, що входять до математичної моделі:

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

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

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

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

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

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

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

k_L – тривалість промислового виробництва ІМС;

F –середня частота перемикань, F=600;

k_t – коефіцієнт температурного режиму, враховує значення температури елемента.

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

$$k_t = 0{,}1 \exp\left[\frac{-E_a}{8{,}617 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{T_{êð} + 273} - \frac{1}{298}\right)\right],$$

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

$T_{кр}$ –температура кристала.

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

$$k_t=0,1\exp\left[\frac{-0,4}{8,617\cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{52+273}-\frac{1}{298}\right)\right]=0,1e^{1,294}=0,1\cdot 3,65=0,365.$$

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

k_F – коефіцієнт, що враховує число комутацій на годину:

$$k_F=0,5+0,25\lg F=0,5+0,25\lg 600=1,2;$$

$k_П$ – коефіцієнт приймання;

k_K – коефіцієнт, що залежить від кількості задіяних контактів;

N – кількість контактів.

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

Експлуатаційна інтенсивність відмов програмованого логічного контролера:

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

Експлуатаційна інтенсивність відмов електронної плати (командоконтролер VNSO):

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

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

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

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

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

$$k_k = 0{,}42 + 0{,}24N = 0{,}42 + 0{,}24 \cdot 4 = 1{,}38;$$

$$\lambda e = 0{,}01 \cdot 6 \cdot 0{,}26 \cdot 3 + 0{,}007 \cdot 600 \cdot 0{,}26 \cdot 1{,}38 \cdot 3 = 4{,}56 \cdot 10^{-6} \text{ 1/годину.}$$

Експлуатаційна інтенсивність відмов модуля (проектний варіант):

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

Наработка модуля на відмову:

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

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

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

Експлуатаційна інтенсивність відмов кулачкового командоконтролера (базовий варіант):

$\lambda e = (0{,}075 \cdot 1{,}27 \cdot 2 + 0{,}0027 \cdot 14 \cdot 600)\, 10^{-6} \cdot 1{,}34 \cdot 15 \cdot 1{,}2 = 395 \cdot 10^{-6}$,

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

Наработка елемента на відмову:

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

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

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

Результати розрахунків коефіцієнтів надійності електричної принципової схеми та імовірність безвідмовної роботи системи керування приводом у базовому та проектному варіантах наведемо у таблицях 2.3 та 2.4.

Таблиця 2.3 – Результати визначення коефіцієнтів надійності електричної принципової схеми

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

Таблиця 2.4 – Імовірність безвідмовної роботи системи керування приводом в базовому та проектному варіантах

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

Результати розрахунків, наведені у таблиці 2.3, дозволяють оцінити рівень надійності елементів електричної принципової схеми та визначити вплив окремих компонентів на загальну безвідмовність системи керування електроприводом мостового крана. Для кожного елемента були враховані базові значення інтенсивності відмов λб, а також поправочні коефіцієнти, що

характеризують вплив умов експлуатації, навантаження, температури, режиму роботи та інших факторів.

Аналіз отриманих результатів показує, що найменше значення експлуатаційної інтенсивності відмов має програмований логічний контролер. Незважаючи на відносно високе базове значення інтенсивності відмов електронних компонентів, використання сучасної елементної бази та відсутність механічних контактів забезпечують достатньо високий рівень надійності ПЛК у процесі експлуатації. Для контролера значення експлуатаційної інтенсивності відмов становить $\lambda e = 226 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

Для електромагнітних контакторів типу Sirius 3RT10 значення інтенсивності відмов становить $\lambda e = 4{,}56 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Невелике значення даного параметра пояснюється високою механічною та електричною зносостійкістю контактної апаратури, а також використанням сучасної електромагнітної системи керування. Разом з тим, через значну кількість контакторів у схемі їх загальний внесок у імовірність відмов системи залишається суттєвим.

Для джойстика VNSO експлуатаційна інтенсивність відмов складає $9{,}3 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Використання джойстикового керування дозволяє значно підвищити надійність у порівнянні з традиційними кулачковими командоконтролерами. Це пояснюється меншою кількістю механічних комутаційних елементів та більш досконалою конструкцією сучасного командоапарата.

Найбільше значення експлуатаційної інтенсивності відмов має кулачковий командоконтролер, для якого $\lambda e = 395 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Основною причиною є інтенсивне механічне зношування контактної системи, виникнення електричної дуги при комутації та значна кількість циклів перемикання у процесі роботи крана. Саме цей елемент є одним із найбільш ненадійних вузлів базової системи керування.

Результати розрахунку імовірності безвідмовної роботи системи керування, наведені у таблиці 2.4, демонструють переваги проектного варіанта реконструкції. Аналіз показує, що протягом усього періоду експлуатації проектна схема має вищі показники безвідмовності у порівнянні з базовою

системою. Наприклад, через 5000 годин роботи імовірність безвідмовної роботи проектної схеми становить 0,145, тоді як для базової схеми даний показник дорівнює 0,138.

Зі збільшенням тривалості експлуатації різниця між показниками безвідмовності стає більш помітною. Це свідчить про позитивний вплив використання програмованого логічного контролера та джойстикового керування на загальну надійність системи. Зменшення кількості механічних контактів та використання сучасних елементів автоматизації дозволяє знизити інтенсивність відмов і підвищити експлуатаційну надійність електропривода мостового крана.

Таким чином, результати розрахунків підтверджують доцільність проведення реконструкції системи керування. Запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення безвідмовності роботи обладнання, зниження кількості аварійних зупинок та покращення експлуатаційних характеристик електропривода.

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

3 Охорона праці та захист навколишнього середовища

3.1 Охорона праці

Дана випускна кваліфікаційна робота передбачає реконструкцію електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 тон для прокатного цеху.

Тому в даному розділі випускної кваліфікаційної роботи бакалавра розглянуто основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори машинного відділення цеху, узагальнені питання техніки безпеки, пожежної профілактики та захисту навколишнього середовища.

3.1.1 Загальна характеристика умов праці

Цех складається з наступних ділянок:

1) склад заготівель;
2) ділянка нагрівальних печей;
3) ділянка робочих ліній;
4) ділянка пили гарячого різання;
5) ділянка холодильників;
6) ділянка сортообробки;
7) ділянка холодного різання й виправлення;
8) ділянка стелажів огляду;
9) ділянка сортоукладки;
10) верстат з дисковою пилкою;
11) склад готової продукції.

Основне устаткування прокатного цеху №1 ДМЗ: блюмінг «1050», рельсобалочний стан «800», товстолистовий стан «3000». Площа машинного

відділення, де встановлений мостовий кран № 9 – 2210 м^2, технологічний проліт 11520 м^2.

Системи опалювання та кондиціювання спроектовані у цеху відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [22] (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристики систем опалення

Приміщення	Система опалення (теплопостачання), опалювальні прилади, теплоносій, максимально допустима температура теплоносія або тепловіддавальної поверхні
Виробничі категорій Г та Д з виділенням горючих пилу та аерозолів	Повітряна. Водяна та парова з радіаторами та гладкими трубами за температури теплоносія: води не більше ніж 120 °С, не більше ніж 130 °С для фонової або чергової системи; пари – не більше ніж 110 °С. Водяна з нагрівальними елементами, вбудованими в огороджувальні конструкції (згідно з 6.6.5, 6.7.19, 6.7.20 і додатком С). Електрична кабельна згідно з ДБН В.2.5-24.

Цех згідно з норм ДСП 173-96 [23] відноситься до підприємств І класу небезпеки виробництва тому розмір санітарно-захисної зони повинен бути не менш 1000 метрів.

Виробничий процес по характеру роботи, що виконується згідно ДСН 3.3.6.042-99 [24] та ГОСТ 12.1.005-88 [25] відноситься до категорії середньої тяжкості IIа, при яких витрата енергії дорівнює 176-232 Вт (151-200 ккал/год.).

Допустимі і фактичних величини метеоумов в робочій зоні відповідно до [24] приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Метеорологічні умови в робочій зоні (факт/доп)

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

Висока запиленість повітря призводить до легеневих захворювань – пневмоконіоз. Рівень запиленості повітря робочої зони не повинен перевищувати 6 мг/м^3 [25]. Вміст пилу в робочій зоні машинного відділення склав 8,9 мг/м^3 (див. табл. 3.3).

Таблиця 3.3-Значення припустимих і фактичних параметрів забруднення повітряного середовища у робочій зоні виробничих приміщень

Шкідливі речовини	ГДК, мг/м^3	Фактичні значення, мг/м^3	Клас небезпечності
Окис вуглецю	20	25	IV
Пил металева	6,0	8,9	IV
Сірчистий ангідрид	1,0	1,6	III

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

Фактичні і допустимі значення параметрів транспортно-технологічної вібрації згідно ДСН 3.3.6.037-99 [26] наведені в таблиці 3.4. Категорія вібрації: транспортно-технологічна, вона діє на людину на робочих місцях машин з обмеженою рухливістю та таких, що рухаються тільки по спеціально підготовлених поверхнях виробничих приміщень (крани промислові).

Таблиця 3.4 – Фактичні і допустимі значення параметрів вібрації

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

Вібрація, відповідає допустимим параметрам і не перевищує критичних параметрів.

Основним джерелом шуму при роботі крана є працюючий двигун. Згідно ДСН 3.3.6.037-99 допустимий рівень звукового тиску 65 дБ, фактичний рівень шуму – 55 дБ.

Згідно ДБН В.25-28-2006 [27] робота наладчика крану відноситься до V розряду зорової роботи, який характеризується роботою малої точності.

Параметри природного і штучного освітлення приведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Параметри природного і штучного освітлення

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

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

3.1.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

Згідно із НПАОП 0.00-4.12-05 [28], робітники, які не пройшли навчання та інструктаж та перевірку знань із питань охорони праці, не допускаються до роботи. Саме роботодавець є відповідальною особою з приводу організації та здійснення інструктажів з питань охорони праці, а також перевірки працівників.

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

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

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

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

Згідно ПУЕ [29] прийнято, що напруг в силових електричних ланцюгів в машинному приміщенні не 660 В, у виробничих приміщеннях – не вище 220 В. Електропроводка виконана ізольованими проводами. Кабелі й шланги трубопроводу розміщені і укріплені таким чином, щоб при русі візка виключалася можливість їх зачеплення за конструкції, які знаходяться в прокатному цеху. для захисту електродвигуна крана від короткого замикання застосовані автоматичні вимикачі з електромагнітними і тепловими розцепителями. Кола керування, освітлення і сигналізації крана мають захист від коротких замикань.

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

Причинами ураження електричним струмом є: дія електричного струму через дугу; дотик до відкритих струмопровідних частин, ізоляція яких пошкоджена; дотик до струмопровідних частин через предмети з низьким опором ізоляції; дія крокової напруги і інше.

Виробничий процес в прокатному цеху за вибуховою, вибухопожежною і пожежною небезпекою згідно з НАПБ Б.03.002-2007 відноситься до категорії «Г», тому що обробці піддаються негорючі матеріали в розпеченому стані [30].

Будівлю цеху побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій, цегли, залізобетону, скла і ін.) і, згідно ДБН В.1.1-7-2002, вона має II ступінь вогнестійкості [31].

Пожежі в цеху можуть виникнути в результаті: загоряння електрообладнання при перевантаженнях, перегрівах і коротких замиканнях (клас пожежі − Е); загоряння паливно-мастильних матеріалів при попаданні в них іскор електричного або механічного походження, впливу тепла від нагрітих предметів, під впливом відкритого вогню (клас пожежі − В); самозаймання промасленого ганчір'я (клас пожежі − А); дії статичного чи грозового розряду.

Для гасіння можливих пожеж в цеху передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначаються на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004 [32]. У таблиці 3.6. показана нормативна та фактична кількість первинних засобів пожежогасіння у деяких приміщеннях прокатного цеху

Пожежною сигналізацією обладнанні всі приміщення цеху.

Таблиця 3.6 – Нормативна та фактична кількість первинних засобів пожежогасіння у деяких приміщеннях прокатного цеху

Приміщення	Площа, $м^2$	Вогнегасники Вуглекислотні, шт / Ручні ВВ-5		ВХП-10, шт		УП-2М, шт		Ящики з піском емністю 0,5 $м^3$, шт	
		норма	факт	норма	факт	норма	факт	норма	факт
Технологічний проліт	11520	3	3	9	8	2	2	12	12
Машинний зал	2210	8	7	4	3	11	9	4	3

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра на тему: Реконструкція системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 5 тон на базі програмованого логічного контролеру SIMATIC S7-200 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−311−6 потужністю 15 кВт, частотою обертання $n = 935$ хв$^{-1}$, з моментом інерції $J_р$=0,14 Н·м·с^2. Виконана перевірка його на перегрів, показала що, обраний двигун задовольняє умові нагріву.

Було розроблено технічне рішення з реконструкції схеми управління механізмом. Було прийнято рішення використовувати програмований логічний контролер сімейства Simatic S7-200 компанії Siemens, а також до установки пропонується одноосьовий командоконтролер VNSO (джойстикового типу) фірми SPOHN&BURKHARD замість існуючого командоконтролера. Контролер без принципових змін може бути інтегрований в існуючу систему управління. Для комутації силових кіл застосовани електромагнитни контактори серії Sirius 3RT10 виробництва концерну SIEMENS.

У розділі охорона праці та захист навколишнього середовища розглянуті основні шкідливі та небезпечні фактори цеху і запропоновані заходи щодо їх зниження.

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.-Електронний ресурс

14. Черный А. П. Моделирование электромеханических систем / А. П. Черный, А. В. Луговой, Д. И. Родькин. – Кременчуг, 2002. – 204 с.

15. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография. – Кременчуг: 2006. – 280 с.

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

17. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Коренькова Т.В. Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики // Міжнар. наук.–техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.

18. Родькин Д.И. Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 3/2008(50). – Ч. 1. – С. 8–17.

19. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе p–q–r теории мощности //

Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. –2004. – Ч. 1. – С. 69–74.

20. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Навчальний посібник. – 2-ге вид. перероб. та доповнене/В.Г. Рудницький. – Київ:Освіта України, 2013.-287 с.

21. 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.

22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. –Режим доступу: https://dnaop.com/html/32609/doc -ДБН_В.2.5-67_2013

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. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. − М.: Изд-во стандартов, 1990.

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

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

28. НПАОП 0.00–4.12.05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/32368/doc -НПАОП_0.00–4.12.05

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

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

33. Сайт ЕВРАЗ ДМЗ им. Петровского – Электронный ресурс. – Режим доступа. - https://www.ukrrudprom.ua/reference/factory/dmzimpetr.html.

Додаток А

Схема електрична принципова електропривода механізму підйому мостового крана до реконструкції

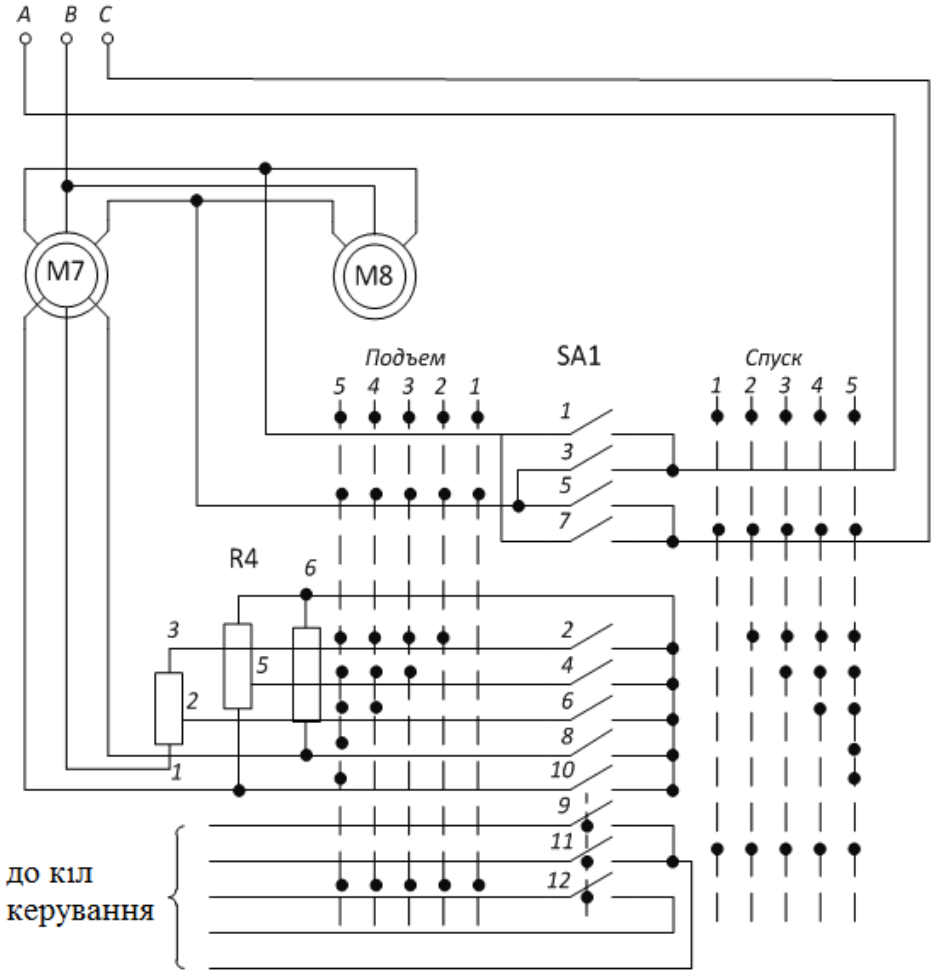


Рисунок А.1 − Фрагмент силової схеми живлення привода підйому

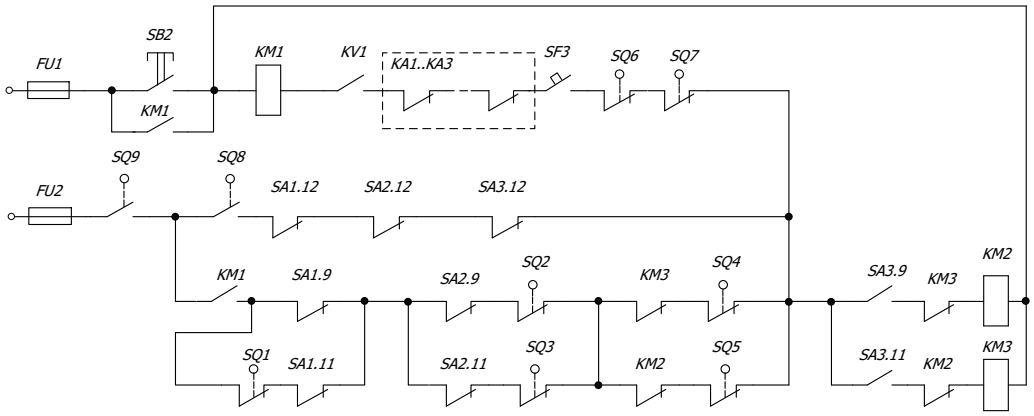


Рисунок А.2 − Схема кіл керування краном

Додаток Б

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

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 7 \quad M1 \equiv 0.85 \cdot Mkr \quad M1 = 363.154 \quad \lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn \cdot M1}} \quad \lambda = 1.312 \quad M2 \equiv \frac{M1}{\lambda} \quad M2 = 276.897$

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

$Rr1 = 0.678 \quad Rr2 = 0.89 \quad Rr3 = 1.167 \quad Rr4 = 1.53 \quad Rr5 = 2.007 \quad Rr6 = 2.632 \quad Rr7 = 3.452 \quad s1 = 0.114$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

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

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

$\omega 1 = 89.03 \quad \omega 2 = 84.142 \quad \omega 3 = 77.732 \quad \omega 4 = 69.325 \quad \omega 5 = 58.299 \quad \omega 6 = 43.839 \quad \omega 7 = 24.873$

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

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

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

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

Расчет статической механической характеристики $so := 0$

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

$Rr(u) \equiv$ Rr7 if $u_5 < \omega 7$; Rr6 if $\omega 7 \le u_5 < \omega 6$; Rr5 if $\omega 6 \le u_5 < \omega 5$; Rr4 if $\omega 5 \le u_5 < \omega 4$; Rr3 if $\omega 4 \le u_5 < \omega 3$; Rr2 if $\omega 3 \le u_5 < \omega 2$; Rr1 if $\omega 2 \le u_5 < \omega 1$; R2 otherwise

Додаток В

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів

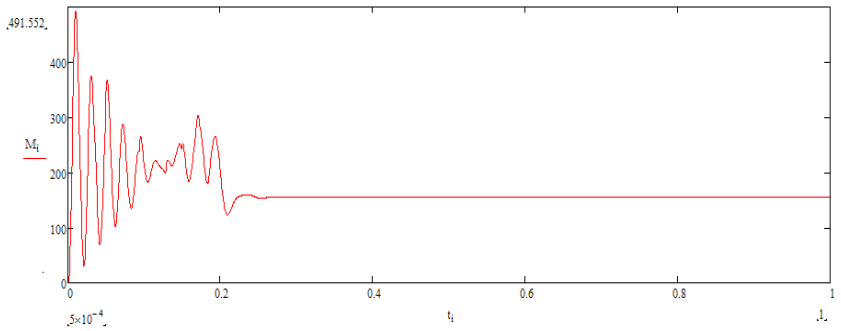


Рисунок В.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

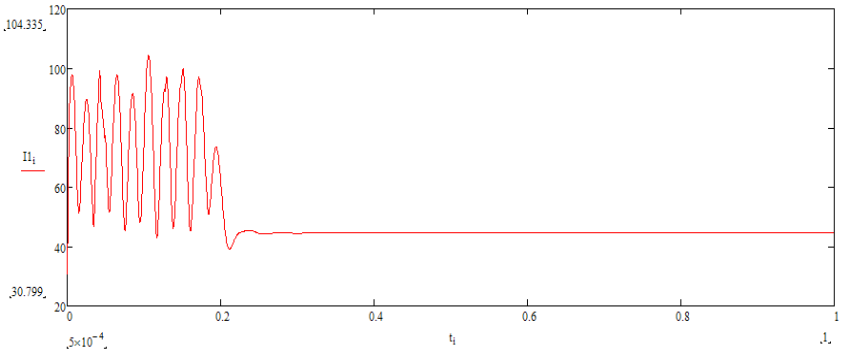


Рисунок В.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

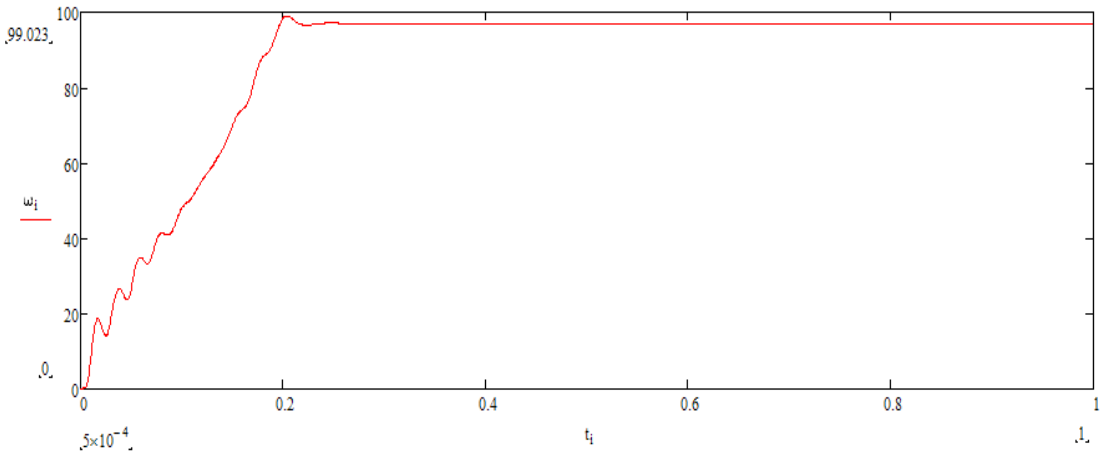
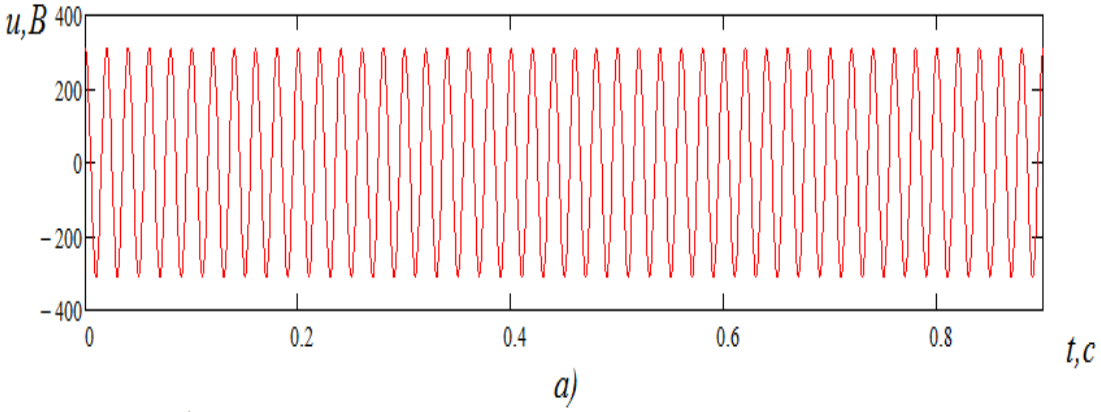


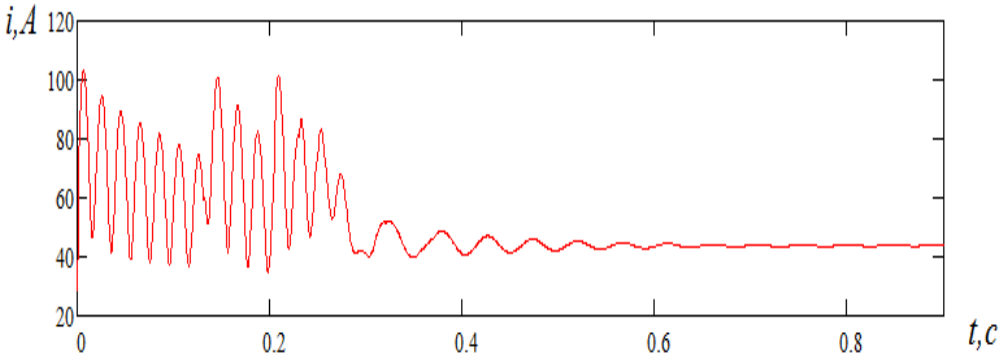
Рисунок В.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Г

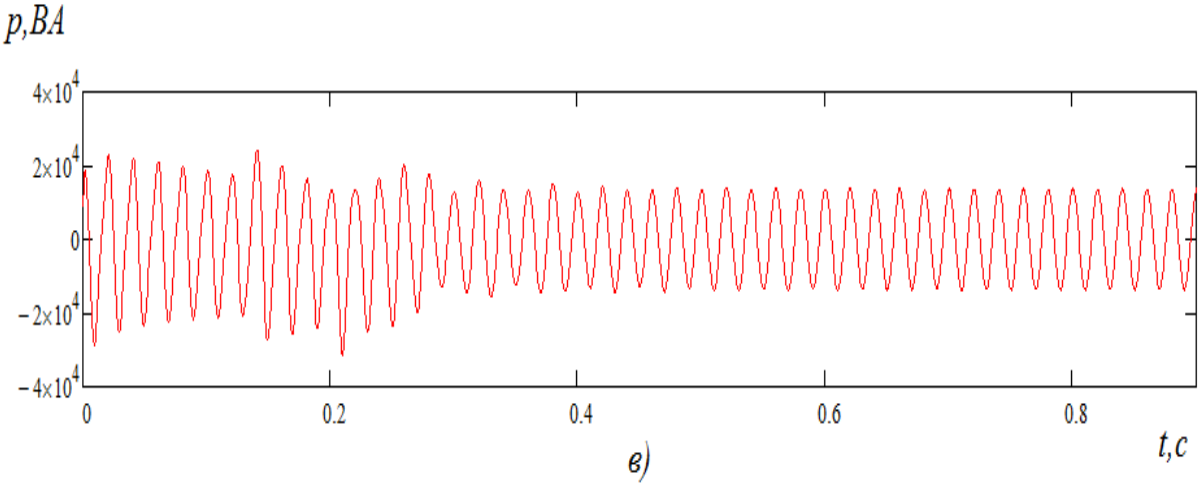
Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна



а)



б)



в)

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

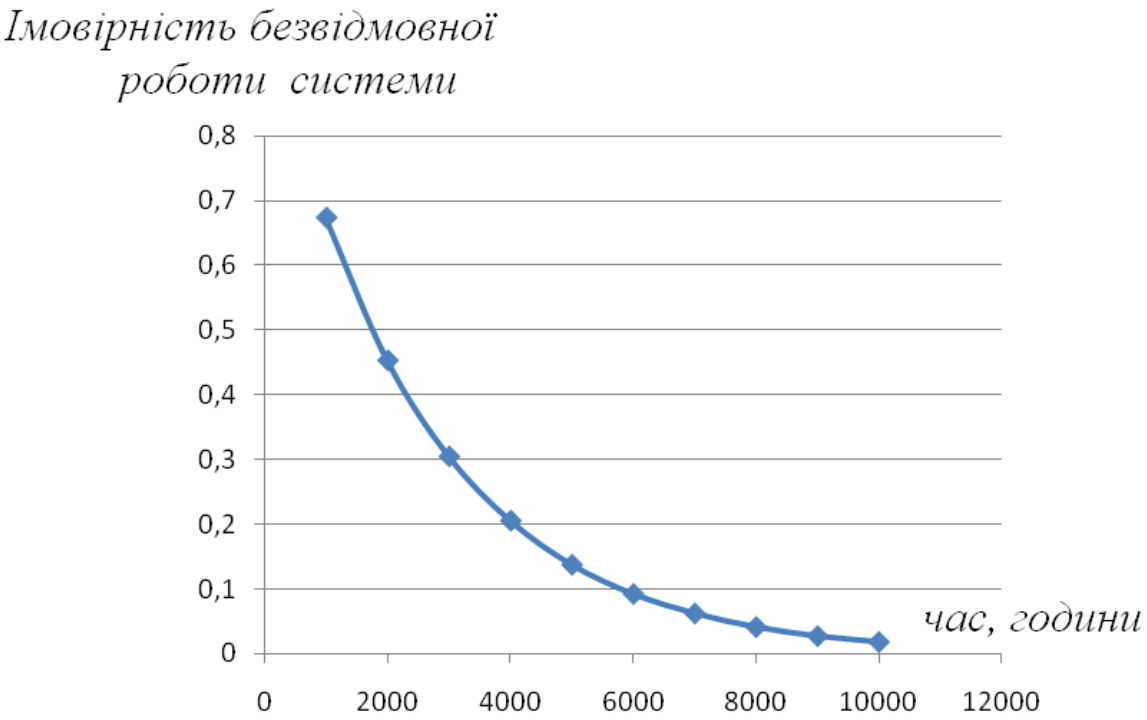


Рисунок Г.2 (а) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у базовому варіанті

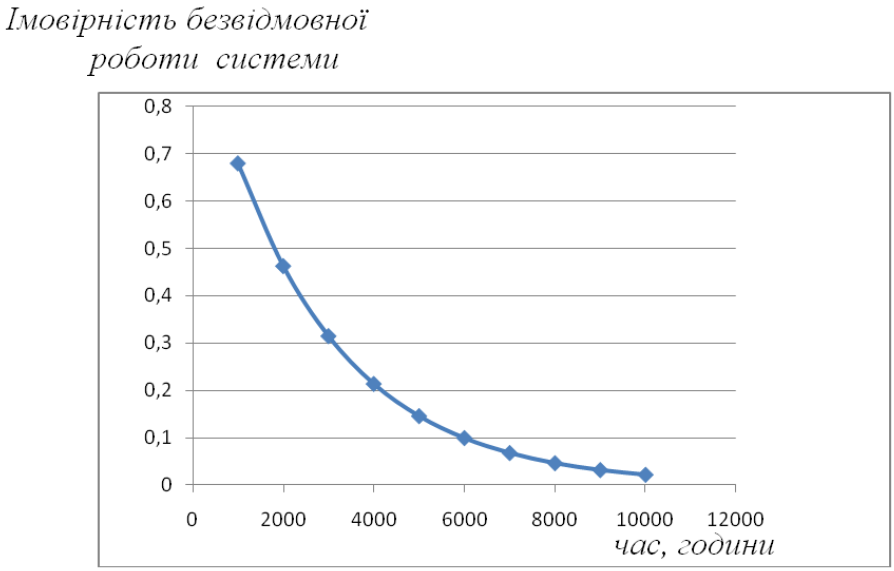


Рисунок Г.2 (б) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у проектному варіанті