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 підвищення ефективності електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана

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)
Сиващенко Ю.С.
(ініціали та прізвище)

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

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

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

Сиващенко Юлія Сергіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана
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 першого допоміжного підйому заливочного мостового крана
Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму першого допоміжного підйому заливочного 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 в п`ять ступенів та сім щаблів

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 першого допоміжного підйому заливочного 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 _____ _____ Ю.С. Сиващенко
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Сиващенко Юлія Сергіївна: Тема роботи: Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана

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 кваліфікаційній роботі виконано дослідження та реконструкцію електропривода механізму першого допоміжного підйому мостового крана вантажопідйомністю 15 т з метою підвищення надійності, енергоефективності та безпеки роботи підйомно-транспортного обладнання. Актуальність роботи обумовлена тим, що електроприводи мостових кранів працюють у важких умовах експлуатації, які характеризуються значними динамічними навантаженнями, повторно-короткочасними режимами роботи, високими температурами навколишнього середовища, вібраціями та впливом пилогазових сумішей. Надмірні динамічні навантаження під час пуску, реверсування та гальмування призводять до прискореного зношування елементів електропривода, механічних передач та металоконструкцій крана.

У роботі проведено детальний аналіз технологічного процесу функціонування механізму підйому, розглянуто конструктивні особливості мостового крана та режими його роботи. Встановлено, що цикл роботи механізму складається з етапів розгону, усталеного руху та гальмування, а експлуатація обладнання відбувається в умовах високих теплових навантажень. Для механізму

допоміжного підйому застосовується асинхронний двигун з фазним ротором типу МТН-612-10 потужністю 60 кВт та частотою обертання 600 об/хв. Максимальна висота підйому становить 28 м, швидкість підйому — 24 м/хв, а діаметр барабана механізму підйому — 0,44 м.

У процесі виконання роботи здійснено розрахунок основних параметрів електропривода. Визначено вагу номінального вантажу — 147150 Н та вагу вантажозахоплювального пристрою — 4905 Н. Номінальна швидкість руху механізму складає 0,4 м/с, швидкість обертання барабана — 69,48 об/хв, а кутова швидкість електродвигуна — 145,7 рад/с. Час розгону та гальмування механізму становить по 4 с, а повний цикл роботи — 840 с. Фактична тривалість вмикання механізму склала 40,48 %, що відповідає важкому повторно-короткочасному режиму роботи.

У результаті проведених розрахунків визначено статичний момент навантаження при підйомі вантажу — 491 Н·м, при опусканні — 344,2 Н·м, а еквівалентний момент навантаження — 307,4 Н·м. Розрахункова потужність приводного електродвигуна склала від 49,27 до 58,24 кВт. На підставі отриманих результатів обрано асинхронний двигун серії МТН потужністю 60 кВт, який повністю задовольняє вимоги щодо теплового режиму та перевантажувальної здатності.

Основною метою реконструкції стало підвищення надійності та довговічності системи керування електроприводом шляхом заміни застарілих релейно-контактних елементів сучасними безконтактними пристроями автоматизації. У роботі запропоновано використання програмованого логічного контролера Siemens Simatic S7-200, електромагнітних контакторів серії Sirius 3RT10 та одноосьового командоконтролера джойстикового типу. Використання програмованого контролера дозволяє реалізувати більш гнучку систему керування, зменшити габарити електрообладнання, підвищити швидкодію системи та значно скоротити витрати на технічне обслуговування.

У розділі охорони праці проведено аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів. Встановлено, що температура повітря на робочих місцях досягає 30,4 °С при нормативному значенні 18–20 °С, а рівень теплового випромінювання становить 2900 Вт/м² при допустимому значенні 140 Вт/м². Концентрація оксиду заліза досягає 11 мг/м³ при допустимій нормі 6 мг/м³, а концентрація діоксиду азоту — 3,4 мг/м³ при нормі 2 мг/м³. Також досліджено рівні шуму, вібрації та освітленості робочих місць. Для забезпечення безпечних умов праці запропоновано комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на зниження впливу шкідливих факторів та підвищення пожежної безпеки виробництва.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження модернізованої системи керування електроприводом у виробничих умовах для підвищення надійності роботи мостових кранів, зниження аварійності обладнання, скорочення експлуатаційних витрат та підвищення ефективності технологічного процесу. Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє підвищити точність керування механізмом підйому, зменшити динамічні навантаження на елементи конструкції та забезпечити більш плавний пуск і гальмування електропривода.

Ключові слова: електропривод, мостовий кран, механізм підйому, асинхронний двигун, фазний ротор, автоматизація, програмований логічний контролер, Siemens Simatic S7-200, безконтактна система керування, реконструкція, енергоефективність, динамічні навантаження, електропостачання, охорона праці, пожежна безпека.

ABSTRACT

Yuliia Serhiivna Syvashchenko: Thesis topic: Analysis and Improvement of the Efficiency of the Electric Drive of the First Auxiliary Lifting Mechanism of a Pouring Bridge Crane.

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

The qualification thesis investigates and reconstructs the electric drive of the first auxiliary lifting mechanism of a bridge crane with a lifting capacity of 15 tons in order to improve the reliability, energy efficiency, and operational safety of lifting and transport equipment. The relevance of the work is обусловлена тим, що electric drives of bridge cranes operate under severe conditions characterized by significant dynamic loads, intermittent duty cycles, high ambient temperatures, vibrations, and exposure to dust and gas mixtures. Excessive dynamic loads during starting, reversing, and braking lead to accelerated wear of electric drive components, mechanical transmissions, and crane metal structures.

The thesis provides a detailed analysis of the technological process of the lifting mechanism operation, examines the structural features of the bridge crane, and analyzes its operating modes. It was established that the operating cycle of the mechanism consists of acceleration, steady-state motion, and braking stages, while the equipment operates under conditions of high thermal loads. An asynchronous slip-ring motor of the MTH-612-10 type with a rated power of 60 kW and a rotational speed of 600 rpm

is used for the auxiliary lifting mechanism. The maximum lifting height is 28 m, the lifting speed is 24 m/min, and the drum diameter of the lifting mechanism is 0.44 m.

During the research, the main parameters of the electric drive were calculated. The nominal load weight was determined to be 147150 N, while the weight of the load-handling device amounted to 4905 N. The nominal speed of the mechanism is 0.4 m/s, the drum rotational speed is 69.48 rpm, and the angular velocity of the electric motor is 145.7 rad/s. The acceleration and braking times of the mechanism are 4 s each, and the total operating cycle duration is 840 s. The actual duty cycle of the mechanism was found to be 40.48%, corresponding to a heavy intermittent operating mode.

As a result of the performed calculations, the static load torque during lifting was determined to be 491 N·m, during lowering — 344.2 N·m, and the equivalent load torque — 307.4 N·m. The calculated power of the drive motor ranged from 49.27 to 58.24 kW. Based on the obtained results, an asynchronous motor of the MTH series with a power of 60 kW was selected, fully satisfying the requirements for thermal conditions and overload capacity.

The main objective of the reconstruction was to improve the reliability and durability of the electric drive control system by replacing obsolete relay-contact elements with modern contactless automation devices. The work proposes the use of a Siemens Simatic S7-200 programmable logic controller, Sirius 3RT10 electromagnetic contactors, and a single-axis joystick-type master controller. The use of the programmable controller makes it possible to implement a more flexible control system, reduce the dimensions of electrical equipment, increase system response speed, and significantly reduce maintenance costs.

In the occupational safety section, harmful and hazardous production factors were analyzed. It was established that the air temperature at workplaces reaches 30.4 °C at a standard value of 18–20 °C, while the level of thermal radiation reaches 2900 W/m² at a permissible value of 140 W/m². The concentration of iron oxide reaches 11 mg/m³ at a permissible level of 6 mg/m³, and the concentration of nitrogen dioxide

reaches 3.4 mg/m³ at a standard value of 2 mg/m³. Noise, vibration, and workplace illumination levels were also investigated. A set of organizational and technical measures aimed at reducing the impact of harmful factors and improving fire safety was proposed to ensure safe working conditions.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of implementing the modernized electric drive control system in industrial conditions in order to improve the reliability of bridge crane operation, reduce equipment failure rates, decrease operating costs, and increase the efficiency of the technological process. The use of modern automation tools makes it possible to improve the accuracy of lifting mechanism control, reduce dynamic loads on structural elements, and ensure smoother starting and braking of the electric drive.

Keywords: electric drive, bridge crane, lifting mechanism, asynchronous motor, slip-ring rotor, automation, programmable logic controller, Siemens Simatic S7-200, contactless control system, reconstruction, energy efficiency, dynamic loads, power supply, occupational safety, fire safety.

ЗМІСТ

ВСТУП……12

1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана ……..15

1.1 Аналіз технологічного процесу механізму першого допоміжного підйому заливочного крану……15

1.2 Характеристика обладнання мостового крану, електропривод механізму першого допоміжного підйому заливочного крану якого реконструюється, за схемами……17

1.2.1 Основні технічні параметри крана ……17

1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів . крану …….....21

1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного крану № 2 та формування вихідних даних……..24.

2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні…….27

2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна……27

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні…….....34

2.2.1 Мета реконструкції……34

2.2.2 Початкова релейно–контактна схема і вимоги до реконструкції……34

2.2.3 Технічне рішення щодо реконструкції……36

2.2.3.1 Програмований логічний контролер (ПЛК)……36

2.2.3.2 Джойстик……36

2.2.3.3 Релейно-контакторна апаратура……36

2.2.3.3.1 Лінійний контактор ……40

2.2.3.3.2 Привод пересування моста……41

2.2.3.3.3 Привод пересування візка……42

2.2.3.3.4 Привод механізму підйому……42

2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода…44
2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором ……44
2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів……45
2.4 Розрахунок надійності систем керування електроприводом ……..…52
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА……58
3.1 Загальна характеристика умов праці…….....58
3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……61
3.3 Захист навколишнього середовища……63
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ……67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……68
Додаток А Схема електрична принципова електропривода механізму підйому крана до реконструкції……71
Додаток Б Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів……72
Додаток В Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів……74
Додаток Г Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна ……75

ВСТУП

З усього різноманіття загальнопромислових механізмів, що функціонують на сучасних металургійних підприємствах, можна виділити окрему групу обладнання, для якої проблема надмірно високих динамічних навантажень є особливо актуальною. До цієї групи, насамперед, належать підйомно-транспортні механізми, які забезпечують безперервність технологічних процесів, транспортування матеріалів, металу, заготовок та готової продукції. Надійність і ефективність роботи таких механізмів безпосередньо впливають на продуктивність підприємства, безпеку виробництва та економічні показники експлуатації обладнання.

Серед усього комплексу підйомно-транспортних машин найбільш складні умови експлуатації мають мостові крани, які працюють у гарячих цехах металургійного виробництва. Особливо це стосується заливочних мостових кранів, що виконують операції транспортування ковшів із рідким металом. Робота таких механізмів супроводжується високими температурами навколишнього середовища, значним тепловим випромінюванням, наявністю пилу, газів, вібрацій та різких змін навантаження. Крім того, режими роботи мостових кранів характеризуються частими пусками, реверсуваннями, гальмуваннями та повторно-короткочасними циклами, що створює значні механічні та електромеханічні перевантаження для всіх елементів системи електропривода.

Основними причинами виникнення динамічних перевантажень механізмів мостових кранів є інтенсивні режими експлуатації, наявність пружних механічних зв’язків у кінематичних передачах, люфти в зубчастих з’єднаннях, коливання вантажу та недосконаліть традиційних систем керування електроприводами. Під час пуску та гальмування виникають значні ударні навантаження, які призводять до нерівномірного розподілу механічних зусиль у вузлах механізму. Особливо небезпечними є резонансні явища та пружні

коливання, що можуть викликати появу вібрацій, підвищеного шуму, деформацій металоконструкцій і зниження точності позиціонування вантажу.

Численними дослідженнями встановлено, що пружні механічні коливання негативно впливають на роботу електропривода та механічної частини мостового крана. Вони викликають збільшення динамічних моментів і струмів у двигунах, погіршення умов роботи редукторів, муфт, валів та канатних систем, а також призводять до зростання енергетичних втрат. У результаті цього знижується надійність роботи механізмів, збільшується кількість аварійних ситуацій, скорочується термін служби електрообладнання та підвищуються витрати на ремонт і технічне обслуговування. Особливо небезпечними є режими пуску та реверсу, при яких динамічні навантаження можуть у декілька разів перевищувати номінальні значення.

Високий рівень динамічних перевантажень, що виникає у процесі експлуатації мостових кранів, призводить до передчасного виходу з ладу елементів електропривода, механічних передач, гальмівних систем, контактної апаратури та металоконструкцій крана. Значні ударні навантаження негативно впливають не лише на механічну частину обладнання, а й на електричні системи керування, викликаючи перегрів контактів, прискорене зношування релейно-контактної апаратури та нестабільність роботи системи керування. У зв’язку з цим особливо актуальним є впровадження сучасних систем автоматизації та безконтактних засобів керування електроприводами мостових кранів.

У даній роботі на тему: «Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана» виконано дослідження режимів роботи механізму підйому та розроблено технічне рішення щодо модернізації системи керування. Основним напрямом реконструкції є заміна застарілих релейно-контактних елементів системи керування асинхронного двигуна з фазним ротором і реостатним регулюванням на сучасні безконтактні пристрої автоматизації.

Запропонована модернізація дозволяє суттєво підвищити надійність та довговічність електропривода, зменшити кількість аварійних відмов, забезпечити

плавні режими пуску та гальмування, а також знизити рівень динамічних навантажень на елементи механізму. Використання сучасних програмованих логічних контролерів і безконтактної комутаційної апаратури забезпечує підвищення точності керування механізмом підйому, зменшення енергетичних втрат та покращення умов експлуатації обладнання. Крім того, модернізована система керування дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування, підвищити рівень електробезпеки та створити передумови для подальшої автоматизації виробничих процесів у металургійній промисловості.

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

1.1 Аналіз технологічного процесу механізму першого допоміжного підйому заливочного крану

Заливочний мостовий кран працює в надзвичайно складних та важких умовах металургійного виробництва, де на його роботу постійно впливають високі температури навколишнього середовища, інтенсивне теплове випромінювання від розпеченого металу, а також підвищена запиленість і загазованість повітря. Під час виконання технологічних операцій кран здійснює транспортування ковшів із рідким металом, температура якого може досягати декількох сотень градусів. У результаті цього елементи металоконструкції крана, механічні передачі та електрообладнання піддаються значним тепловим навантаженням, що негативно впливає на їхній технічний стан та довговічність.

Особливо складними умовами характеризується робота машиніста крана, оскільки оператор змушений тривалий час перебувати в зоні дії високих температур та теплового випромінювання. З метою забезпечення безпечних та комфортних умов праці кабіна керування мостовим краном повинна мати ефективну теплоізоляцію, яка дозволяє зменшити вплив зовнішніх теплових потоків. Для підтримання допустимих параметрів мікроклімату в кабіні встановлюються системи вентиляції та кондиціонування повітря, які забезпечують охолодження повітря, його очищення від пилу та підтримання оптимальної температури для роботи оператора. Наявність систем кондиціонування не лише підвищує комфорт праці, але й сприяє зменшенню втомлюваності машиніста, підвищенню точності керування механізмами та загальному рівню безпеки експлуатації крана.

Робота заливочного крана має циклічний характер і безпосередньо пов’язана з технологічним процесом металургійного виробництва. Кожен цикл роботи механізму складається з декількох послідовних операцій: підхоплення

вантажу, підйому ковша, горизонтального переміщення мосту або візка, точного позиціонування вантажу у визначеній точці, опускання ковша та повернення механізму у вихідне положення для виконання наступного циклу. Такий режим роботи характеризується частими пусками, реверсуваннями та гальмуваннями, що створює значні динамічні навантаження на елементи механічної та електричної частин крана.

Кожний процес руху механізму можна умовно поділити на декілька основних етапів. Першим етапом є розгін, під час якого електропривод забезпечує прискорення механізму до необхідної швидкості. Саме в цей момент виникають найбільші пускові струми та динамічні навантаження на двигун, редуктор, канатну систему та металоконструкції. Другим етапом є рух з усталеною швидкістю, при якому механізм працює у відносно стабільному режимі та забезпечує транспортування вантажу по заданій траєкторії. Завершальним етапом є уповільнення та гальмування механізму, під час яких відбувається плавне зниження швидкості та точне позиціонування вантажу.

Через циклічний характер роботи електропривод мостового крана функціонує у повторно-короткочасному режимі, для якого характерні постійні зміни навантаження, часті перехідні процеси та підвищені вимоги до надійності системи керування. У процесі розгону та гальмування виникають значні механічні коливання та ударні навантаження, що можуть призводити до розгойдування вантажу, появи вібрацій та збільшення навантажень на елементи конструкції крана. Особливо небезпечними є різкі пуски та гальмування, які можуть викликати перевантаження електродвигуна та передчасне зношування механічних вузлів.

У зв’язку з цим до систем електропривода заливочних кранів висуваються підвищені вимоги щодо плавності регулювання швидкості, точності керування та забезпечення надійної роботи в умовах високих теплових і механічних навантажень. Використання сучасних систем автоматизованого керування дозволяє значно знизити рівень динамічних навантажень, забезпечити плавний

розгін і гальмування механізмів, зменшити розгойдування вантажу та підвищити ефективність роботи мостового крана в цілому.

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

1.2.1 Основні технічні параметри крана

Заливочний кран забезпечує вертикальне і горизонтальне транспортування чаш з розплавленим металом в цеху. Кран має багатомоторний електричний привод, що живиться від мережі змінного струму. Висота підйому головного і допоміжного крюків відповідно рівна 25/28 метрів.

Заливочний кран є складною вантажопідйомною машиною, призначеною для транспортування рідкого металу, металевих заготовок та інших важких вантажів у межах металургійного виробництва. Основним вантажозахоплювальним органом такого крана служить крюк або спеціальний вантажозахоплювальний пристрій, за допомогою якого здійснюється підйом, переміщення та опускання вантажів. Конструкція заливочного крана забезпечує можливість виконання технологічних операцій у складних виробничих умовах, де необхідна висока точність позиціонування вантажу та надійність роботи всіх механізмів.

Переміщуючись по підкранових шляхах, розташованих значно вище рівня підлоги виробничого приміщення, мостовий кран забезпечує транспортування вантажу в трьох взаємно перпендикулярних напрямах. Перший напрям руху здійснюється вздовж підкранових колій шляхом пересування самого мосту крана по рейкових шляхах. Другий напрям забезпечується переміщенням вантажного візка по мосту крана, що дозволяє змінювати положення вантажу в поперечному напрямі. Третій напрям руху реалізується механізмом підйому, який виконує

вертикальне переміщення вантажу. Завдяки такій конструкції кран може забезпечувати подачу вантажу практично в будь-яку точку робочої зони цеху.

Заливочні крани широко використовуються в металургійній промисловості для виконання відповідальних технологічних операцій, пов’язаних із транспортуванням ковшів із розплавленим металом. У процесі роботи кран виконує завантаження, переміщення та точне позиціонування вантажів великої маси, що потребує високої надійності механічних вузлів та електроприводів. Особливістю таких механізмів є необхідність забезпечення плавного руху без різких ривків і коливань, оскільки транспортування рідкого металу пов’язане з підвищеною небезпекою для персоналу та обладнання.

На кранах даного типу можуть встановлюватися різні конструкції вантажних візків і кабін керування, які відрізняються між собою кількістю, типом та розташуванням механізмів і електрообладнання. Залежно від технологічного призначення кран може оснащуватися одним або декількома механізмами підйому, допоміжними візками, спеціальними захватними пристроями та різними системами керування. Вантажні візки можуть мати різну конструкцію та компоновку, що визначається умовами експлуатації, вантажопідйомністю та особливостями виробничого процесу.

Кабіна керування крана, як правило, розташовується безпосередньо на мосту або візку та забезпечує оператору можливість контролю всіх робочих операцій. У сучасних конструкціях кранів застосовуються ергономічні кабіни з підвищеним рівнем тепло- та шумоізоляції, обладнані системами вентиляції, кондиціонування та сучасними засобами керування. Розташування апаратури керування та електрообладнання вибирається таким чином, щоб забезпечити зручність обслуговування, безпечну експлуатацію та мінімізацію часу на проведення ремонтних робіт.

Таким чином, заливочний мостовий кран є складним електромеханічним комплексом, ефективність роботи якого залежить від узгодженої роботи механічних систем, електроприводів та систем автоматизованого керування. Надійність роботи крана має вирішальне значення для забезпечення

безперервності технологічного процесу та безпеки виробництва в умовах металургійного підприємства.

На рисунку 1.1 зображено загальний вид заливочного крана.



Рисунок 1.1 – Загальний вид заливочного крана

В таблиці 1.1 наведено основні характеристики електродвигунів, що застосовуються в електроприводах механізмів заливочного крана.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики електродвигунів, що застосовуються в електроприводах механізмів заливочного крана

Найменування механізму	Тип електродвигуна	Кількість електродвигунів	Потужність на валу при ТВ=40%	Частота обертання, об/хв	Струм статора, А	Струм ротора, А	Напруга між кільцями ротора, В	Максимальний момент, кг·м
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пересування допоміжного	МТF-311-6	1	27	945	30,5	79	172	32
Пересування крана	МТF-411-6	4	22	965	55	60	235	65
Пересування головного візка	МТН-414-6	1	45	960	33	42	186	43
Допоміжний підйом	МТН-612-10		60	565	145	154	248	320

В таблиці 1.2 наведено основні технічні дані й характеристики крана [2].

Таблиця 1.2 − Основні технічні дані механізму допоміжного підйому крана

Параметр	Значення	Позначення
1	2	
Максимальна вантажопідйомність, т	15	$m_в$
Маса підвісу,кг	500	m_0
Максимальна висота підйому, м	28,0	
Гальмо механізму підйому: Тип Гальмівний момент, Нм	 ТКТГ-320 800	
Діаметр колеса,м	0,44	$D_б$
Швидкість підйому, м/хв	24	$V_{ном}$
Швидкість пересування крана, м/с	2,5	

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Швидкість пересування вантажного візка, м/с	2	
Максимальне прискорення, м/с^2	0,1	
Електродвигун механізму підйому: Потужність, кВт Частота обертання, об/хв	МТН-612-10 60 600	
Редуктор механізму підйома вантажу: Тип Передатне число	 1Ц2У-355 25	

1.2.2 Опис електричної принципової схеми електроприводів механізмів . крану

Механізм першого допоміжного підйому крану вантажопідйомністю 15 т приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю 60 кВт і частотою обертання 600 об/хв. Двигун керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Параметри двигуна наведено в таблиці 1.2 [3].

Таблиця 1.2 − Номінальні параметри двигуна

Тип	$U_ф$, В	f, Гц	$P_н$, кВт	$n_с$, об/хв	Jд, кгм^2	$s_н$, %	$\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	r_1*	x_1*	r_2'*	x_2'*	$x_ц'$*
МТН 280-S10	220	50	60	600	0,95	1,5	88,5	0,82	0,032	0,073	0,042	0,012	2,8

Фрагмент схеми електричної принципової електроустаткування мостового крана представлена на рисунках А1 А2 додатку А.

Для керування механізмом підйому використовується кулачкові контролери типу ККТ–61А. Всі електродвигуни обладнані механічними гальмами типу ТКТГ з електрогідроштовхачами типу ТГМ [2].

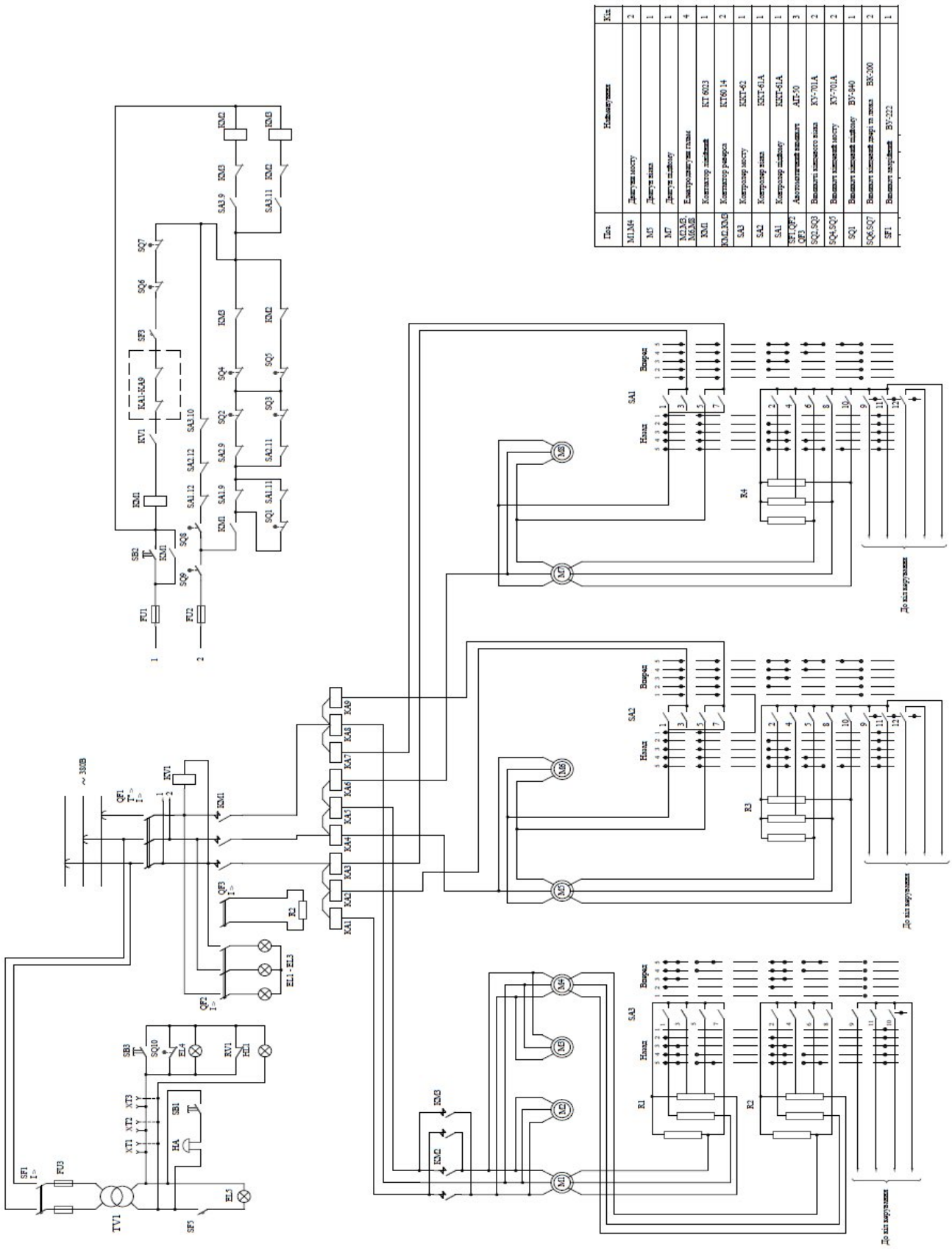


Рисунок 1.2 Схема електричної принципової електроустаткування мостового крана

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].

1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного крану та формування вихідних даних

Двигун механізму першого допоміжного 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 роботі 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].

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.

Завдання дослідження:

– провести аналіз технологічного процесу, складовою частиною якого є електропривод механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана;

– дослідити конструктивні особливості та режими роботи механізму допоміжного підйому мостового крана в умовах металургійного виробництва;

– виконати аналіз існуючої системи електропривода механізму підйому та визначити її основні недоліки;

– проаналізувати вплив динамічних навантажень, пружних механічних коливань і повторно-короткочасних режимів роботи на експлуатаційні характеристики електропривода;

– здійснити розрахунок основних параметрів електропривода механізму підйому, визначити статичні моменти навантаження, потужність та вибрати приводний електродвигун;

– дослідити перехідні процеси пуску та гальмування асинхронного двигуна з фазним ротором;

– розробити технічне рішення щодо реконструкції електропривода шляхом заміни релейно-контактної системи керування сучасними безконтактними засобами автоматизації;

– обґрунтувати вибір програмованого логічного контролера Siemens Simatic S7-200 та сучасної релейно-контакторної апаратури для модернізації системи керування;

– виконати аналіз роботи модернізованої системи електропривода та оцінити її технічну ефективність;

– дослідити можливості підвищення надійності, енергоефективності та довговічності електропривода механізму підйому;

– провести аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів під час експлуатації заливочного мостового крана та розробити заходи з охорони праці й пожежної безпеки;

– оцінити перспективи впровадження реконструйованої системи електропривода у виробничих умовах металургійного підприємства.

2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні

2.1 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна

Вага номінального вантажу:

$$G_в = m_в \times g = 15000 \times 9,81 = 147150\,H. \quad (2.1)$$

Вага підвісу:

$$G_0 = m_0 \times g = 500 \times 9,81 = 4905\ H. \quad (2.2)$$

Номінальна швидкість підйому (опускання):

$$V_{ном} = \frac{V_{ном}\left[м / хв\right]}{60} = \frac{24}{60} = 0,4\ м / с. \quad (2.3)$$

Швидкість обертання барабану при номінальній швидкості підйому:

$$n_{б.ном} = \frac{60 \times u \times V_{ном}}{\pi \times D_б} = \frac{60 \times 4 \times 0,4}{3,14 \times 0,44} = 69,48 об / хв. \quad (2.4)$$

Кутова швидкість двигуна при номінальній швидкості підйому:

$$\omega_{дв.ном} = \frac{2 \times \pi \times n_{б.ном}}{60} \times i = \frac{2 \times 3,14 \times 69,48}{60} \times 20 = 145,727\,рад / с. \quad (2.5)$$

Швидкість двигуна при номінальній швидкості підйому:

$$n_{дв.ном} = \frac{60 \cdot \omega_{дв.ном}}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 145,727}{2 \cdot \pi} = 1392,494 об / хв. \quad (2.6)$$

Кутове прискорення двигуна при пусках та гальмуваннях:

$$\varepsilon_{дв} = \frac{2 \cdot a \cdot i \cdot u}{D_б} = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 20 \cdot 4}{0,44} = 145,727 рад / с^2. \quad (2.7)$$

Час роботи механізму при пуску (підйом, опускання):

$$t_п = \frac{V_{ном}}{a} = \frac{0,4}{0,1} = 4с. \quad (2.8)$$

Час роботи механізму при гальмуванні (підйом, опускання):

$$t_г = t_п = 4с. \quad (2.9)$$

Шлях, який проходить вантаж за час пуску (підйом, опускання):

$$H_п = \frac{V_{ном}^2}{2 \cdot a} = \frac{0,4^2}{2 \cdot 0,1} = 0,8 м. \quad (2.10)$$

Шлях, який проходить вантаж за час гальмування (підйом, опускання):

$$H_г = H_п = 0,8м. \quad (2.11)$$

Середнє значення висоти підйому (опускання), причому (Н=12 м):

$$H_с = 0,7 \cdot H = 0,7 \cdot 12 = 8,4 м. \quad (2.12)$$

Пройдений шлях з усталеною швидкістю в режимах навантаження або холостого ходу (підйом, опускання), м:

$$H_y = H_c - H_n - H_г = 8,4 - 0,8 - 0,8 = 6,8м. \quad (2.13)$$

Час роботи механізму з усталеною номінальною швидкістю в режимах навантаження або холостого ходу (підйом, опускання):

$$t_y = \frac{H_y}{V_{ном}} = \frac{6,8}{0,4} = 17c. \quad (2.14)$$

Сумарний час роботи механізму за один цикл:

$$t_{роб} = 4 \times (t_п + t_y + t_г) = 4 \times (4 + 83 + 4) = 340c. \quad (2.15)$$

Час циклу:

$$t_ц = t_{роб} + 2 \times (t_{0\,з} + t_{0\,пер}).., \quad (2.16)$$

де $t_{0з}$ – час застроповування (розстроповування) ($t_{0з}$ = 150 с); $t_{0з\ пер}$ – середній час паузи при переміщенні крану (візка) ($t_{0з\ пер}$ = 100 с),

$$t_ц = 340 + 2 \times (150 + 100) = 840с.$$

Фактична тривалість включення:

$$ТВ_ф = \frac{t_{роб}}{t_ц} \times 100\% = \frac{340}{840} \times 100\% = 40,476\ \%. \quad (2.17)$$

Статичний момент в режимі номінального навантаження приведений до

валу двигуна (підйом):

$$Mc_{нав1} = \frac{\left(G_0 + G_в\right) \cdot D_б}{2 \cdot i \cdot u \cdot \eta_{ном}} = \frac{\left(4905 + 147150\right) \cdot 0,44}{2 \cdot 20 \cdot 4 \cdot 0,85} = 491 Нм. \quad (2.18)$$

Статичний момент в режимі номінального навантаження приведений до валу двигуна (опускання):

$$Mc_{нав2} = \frac{\left(G_0 + G_в\right) \cdot D_б}{2 \cdot i \cdot u} \cdot \eta'_{ном}, \quad (2.19)$$

де $\eta'_{ном}$ – коефіцієнт корисної дії механічної передачі механізму підйому мостового крану при опусканні номінального вантажу,

$$\eta'_{ном} = 2 - \frac{1}{\eta_{ном}} = 2 - \frac{1}{0,85} = 0,824.$$

$$Mc_{нав2} = \frac{\left(4905 + 147150\right) \cdot 0,44}{2 \cdot 20 \cdot 4} \cdot 0,824 = 344,2 Нм. \quad (2.20)$$

Статичний момент в режимі холостого ходу приведений до валу двигуна (підйом):

$$Mc_{хх1} = \frac{G_0 \cdot D_б}{2 \cdot i \cdot u \cdot \eta_{хх}}, \quad (2.21)$$

де $\eta_{хх}$ – коефіцієнт корисної дії механічної передачі механізму підйому мостового крану при підніманні пустого вантажозахватного пристрою.

Коефіцієнт корисної дії механічної передачі механізму підйому при підніманні пустого вантажозахватного пристрою визначають аналітичним шляхом:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{\gamma} + b_1}, \tag{2.22}$$

де a1 та b1 – коефіцієнти постійних та змінних втрат; γ – коефіцієнт завантаження механізму:

$$\gamma = \frac{m + m_0}{m_в + m_0}, \tag{2.23}$$

де m і $m_в$ – поточна і номінальна маси вантажу, кг; m0 – маса підвісу, кг.

При номінальному навантаженні механізму (γ = 1):

$$\eta_{ном} = \frac{1}{1 + a_1 + b_1}. \tag{2.24}$$

При номінальному навантаженні співвідношення коефіцієнтів втрат, відомі із статистичних даних:

$$k = \frac{a_1}{b_1} = 1,2...1,5 \approx 1,3. \tag{2.25}$$

Значення коефіцієнтів a1 і b1 знаходять шляхом сумісного розв'язку системи:

$$\eta_{ном} = \frac{1}{1 + a_1 + b_1}; a_1 = k \cdot b_1. \tag{2.26}$$

Звідси:

– коефіцієнти змінних втрат:

$$b_1 = \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном} \times (1 + k)} = \frac{1 - 0,85}{0,85 \times (1 + 1,3)} = 0,077. \quad (2.27)$$

– коефіцієнт постійних втрат:

$$a_1 = k \times \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном} \times (1 + k)} = 1,3 \times \frac{1 - 0,85}{0,85 \times (1 + 1,3)} = 0,1. \quad (2.28)$$

Коефіцієнт завантаження механізму підйому без вантажу:

$$\gamma_0 = \frac{m_0}{m_в + m_0} = \frac{500}{15000 + 500} = 0,032. \quad (2.29)$$

Коефіцієнт корисної дії механічної передачі механізму підйому мостового крану при підйомі пустого вантажозахватного пристрою:

$$\eta_{хх} = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{\gamma_0} + b_1} = \frac{1}{1 + \frac{0,1}{0,032} + 0,077} = 0,24. \quad (2.30)$$

Відповідно до формули (2.21):

$$Мс_{хх1} = \frac{4905 \times 0,44}{2 \times 40 \times 4 \times 0,24} = 28,1 Нм..$$

Статичний момент в режимі холостого ходу приведений до валу двигуна (опускання):

$$Mc_{хх2} = \frac{G_0 \times D_б}{2 \times i \times u} - \Delta M_{хх}, \quad (2.31)$$

де ΔM_{xx} – втрати в механічній передачі при підйомі або опусканні вантажозахватного пристрою,

$$\Delta M_{xx} = \frac{G_0 \cdot D_б}{2 \cdot i \cdot u} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{xx}} - 1 \right) = \frac{4905 \cdot 0,44}{2 \cdot 40 \cdot 4} \cdot \left(\frac{1}{0,24} - 1 \right) = 21,4 Нм. \qquad (2.32)$$

$$Mc_{xx2} = \frac{4905 \cdot 0,44}{2 \cdot 40 \cdot 4} - 21,4 = -14,6 Нм.$$

$$Mc_{екв} = \sqrt{\frac{\left(M_{снав1}^2 + M_{снав2}^2 + M_{cxx1}^2 + M_{cxx2}^2 \right) \cdot \left(t_п + t_у + t_г \right)}{4 \cdot \left(\beta_п \cdot t_п + t_у + \beta_г \cdot t_г \right)}}, \qquad (2.33)$$

де $\beta_п$ ($\beta_г$) – коефіцієнт погіршення тепловіддачі при пуску (гальмуванні); β_0 – коефіцієнт погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі (для двигунів з само вентиляцією β_0=0,5).

Коефіцієнт погіршення тепловіддачі при пуску (гальмуванні):

$$\beta_п = \beta_г = \frac{1 + \beta_0}{2} = \frac{1 + 0,5}{2} = 0,75. \qquad (2.34)$$

Згідно формули (2.33):

$$Mc_{екв} = \sqrt{\frac{\left(491,971^2 + 344,18^2 + 28,116^2 + \left(-14,627 \right)^2 \right) \cdot \left(1 + 83 + 1 \right)}{4 \cdot \left(0,75 \cdot 1 + 83 + 0,75 \cdot 1 \right)}} = 307,4 Нм$$

Розрахункова потужність приводного двигуна:

$$P_{роз} = k_з \cdot Mc_{екв} \cdot \omega_{дв.ном} \cdot \sqrt{\frac{ТВ_ф}{ТВ_{ст}}}, \qquad (2.35)$$

де $k_З$ – коефіцієнт запасу ($k_З$ = 1,1…1,3),

$$P_{роз} = (1,1...1,3) \times 307,4 \times 145,727 \times \sqrt{\frac{40,476}{40}} = 49,27 \div 58,235 кВт.$$

Згідно стандартного ряду потужностей обираємо двигун МТН 280-S10, потужністю 60 кВт і частотою обертання 600 об/хв.

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних 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].

2.2.2 Початкова релейно – контактна схема і вимоги до реконструкції

Фрагмент силової схеми живлення привода допоміжного підйому крана № 2 та схема кіл керування краном наведена на рисунках додатку А. Специфікація апаратів і пристроїв схем додатку А приведена в таблиці. 2.1 [2].

Таблица 2.1 − Специфікація апаратів і пристроїв

Позіція/ позначення	Призначення	Кіль–кість	Примітка
M1..M4	Двигуни моста	2	
M5	Двигун візка	1	
M7	Двигун підйому МТН	1	60 кВт, 600 об/хв
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.

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).

Рисунок 2.1 Схема після реконструкції

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.

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.

Лінійний контактор типу 3RT1055 серії SIRIUS виробництва компанії Siemens призначений для комутації силових електричних кіл асинхронних електродвигунів у важких умовах експлуатації. Використання даного контактора у схемі електропривода механізму допоміжного підйому мостового крана дозволяє забезпечити високу надійність роботи системи керування, зменшити інтенсивність зношування комутаційних елементів та підвищити довговічність електрообладнання.

Контактор виконаний у триполюсному виконанні та має типорозмір S6, що дозволяє комутувати значні робочі струми силового кола. Номінальна напруга керування електромагнітного приводу складає 200–277 В змінного струму, а допустимий робочий струм сягає 185 А. Завдяки таким технічним характеристикам контактор може ефективно використовуватись у складі електроприводів вантажопідйомних механізмів великої потужності.

Електромагнітна котушка контактора живиться від спеціального електронного блока попереднього включення, який забезпечує формування необхідного пускового імпульсу для надійного спрацьовування контактної системи. Наявність електронного блока дозволяє значно знизити енергоспоживання в режимі утримання та зменшити теплові втрати у колі

керування. Напруга живлення електромагнітного приводу подається на клеми A1/A2 бічного електронного модуля, що спрощує процес монтажу та технічного обслуговування апаратури.

Керуючі входи контактора виведені на 7-полюсний штекерний роз’єм, що забезпечує зручність підключення до системи автоматизованого керування на базі програмованого логічного контролера. Така конструкція дозволяє суттєво скоротити час монтажу та підвищити надійність електричних з’єднань. Крім того, використання штекерного підключення полегшує виконання діагностики та заміни апаратури у процесі експлуатації.

Потужність, яку споживає електромагнітний привод контактора при включенні, складає 280 В·А, а в режимі утримання — лише 4,4 В·А. Це свідчить про високу енергоефективність апарата та дозволяє зменшити навантаження на кола керування. Низьке енергоспоживання в режимі утримання також сприяє зниженню нагріву елементів електричної схеми та підвищує загальну надійність роботи системи керування електроприводом.

Контактори серії SIRIUS характеризуються високою механічною та електричною зносостійкістю, що є особливо важливим для механізмів мостових кранів, які працюють у повторно-короткочасних режимах із великою кількістю пусків, реверсів та гальмувань. Використання сучасної безконтактної та релейно-контакторної апаратури дозволяє знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій, підвищити стабільність роботи електропривода та покращити умови експлуатації обладнання в цілому.

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.

Комутація пускових опорів (КМ6, КМ7, К1.1–К1.7) здійснюється триполюсними контакторами 3RT1054 типорозміру S6 виробництва компанії Siemens. Дані контактори призначені для роботи у складі електроприводів підйомно-транспортних механізмів, які характеризуються важкими умовами експлуатації, значною кількістю комутацій та підвищеними динамічними навантаженнями. Номінальна напруга керування контакторів складає 230 В

змінного струму, а допустимий робочий струм досягає 150 А, що дозволяє забезпечити надійну комутацію силових кіл електродвигуна механізму підйому.

Потужність, споживана електромагнітним приводом контактора, складає 300 В·А в момент включення та 5,8 В·А в режимі утримання. Значне зниження енергоспоживання після спрацьовування контактора забезпечується використанням електронної системи керування електромагнітною котушкою, що дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити енергоефективність та збільшити термін служби апаратури. Невелика потужність у режимі утримання також сприяє зниженню навантаження на кола керування та покращує умови роботи програмованого логічного контролера.

Контактори 3RT1054 використовуються для ступінчастої комутації пускових резисторів у колі ротора асинхронного двигуна з фазним ротором. Під час пуску електродвигуна в роторне коло вводяться додаткові пускові опори, що забезпечують обмеження пускового струму та зменшення динамічних навантажень на механічну частину привода. У процесі розгону двигуна контактори послідовно шунтують секції пускового реостата, забезпечуючи плавний перехід двигуна між штучними механічними характеристиками та поступове збільшення швидкості обертання.

Застосування сучасних контакторів серії SIRIUS дозволяє значно підвищити надійність системи керування електроприводом у порівнянні із застарілою релейно-контактною апаратурою. Контактори мають високий ресурс механічної та електричної зносостійкості, стійкі до вібрацій, підвищених температур та інтенсивних режимів роботи, характерних для мостових кранів металургійного виробництва. Крім того, вони відзначаються компактними габаритами, зручністю монтажу та можливістю інтеграції у сучасні автоматизовані системи керування.

Використання контакторів 3RT1054 у схемі керування механізмом підйому дозволяє реалізувати більш плавний пуск електродвигуна, знизити кидки струму та моменту, зменшити механічні перевантаження елементів привода і підвищити довговічність редуктора, муфт та канатної системи. У результаті модернізації

забезпечується підвищення надійності роботи електропривода, зменшення кількості аварійних зупинок та покращення експлуатаційних характеристик мостового крана в цілому.

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]:

$$\begin{cases} u_{1a} = R_1 i_{1a} + \dfrac{d\psi_{1a}}{dt}; \quad u_{1b} = R_1 i_{1b} + \dfrac{d\psi_{1b}}{dt} \\ u_{2a} = R_2' i_{2a} + \dfrac{d\psi_{2a}}{dt} + \omega_r p_n \psi_{2b}; \quad u_{2b} = R_2' i_{2b} + \dfrac{d\psi_{2b}}{dt} - \omega_r p_n \psi_{2a}, \end{cases} \tag{2.36}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_s (\psi_{1b}\psi_{2a} - \psi_{1a}\psi_{2b}), \quad k_s = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}. \tag{2.37}$$

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]:

$$\bar{\psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2; \quad \bar{\psi}_2 = L_2' \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1 \tag{2.38}$$

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

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

$$M - Mc = j\frac{d\omega_r}{dt} EQUATION.3 \ ,$$

(2.39)

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]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1a}}{dt} = u_{1a} - R_1 i_{1a}; \quad \frac{d\psi_{1b}}{dt} = u_{1b} - R_1 i_{1b}; \frac{d\psi_{2a}}{dt} = u_{2a} - R_2' i_{2a} - \omega_r p_n \psi_{2b}; \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} = u_{2b} - R_2' i_{2b} + \omega_r p_n \psi_{2a}; \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_c}{J} \end{cases} \quad (2.40)$$

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

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

Таблиця 2.2 − Номінальні параметри двигуна

Тип	$U_ф$, В	f, Гц	$P_н$, кВт	$n_с$, об/хв	Jд, кгм^2	$s_н$, %	$\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	r_1*	x_1*	r_2'*	x_2'*	$x_ц$'*

МТН 280-S10	220	50	60	600	0,95	1,5	88,5	0,82	0,032	0,073	0,042	0,012	2,8

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

$$u_{1a} = U_m \cos(w_0 t + j); u_{1b} = U_m \sin(w_0 t + j). \text{Equation.3}$$

(2.41)

Знаходимо номінальний струм:

$$I_{1ф} = \frac{P_n}{3U_{фн} h_н \cos f_н}. \text{Equation.3}$$

(2.42)

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

$$I_{1ф} = \frac{60000}{3 \times 220 \times 0.85 \times 0.925} = 115,6A.$$

Отримаємо абсолютні значення опорів:

$$R_1 = r_1^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}; \text{Equation.3} \qquad R_2 = r'^*_2 \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}; \text{Equation.3}$$

$$X_1 = X_1^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}; \text{Equation.3} \qquad (2.43)$$

$$X'_2 = X'^*_2 \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}; \text{Equation.3} \quad X_m = X_m^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}. \text{Equation.3}$$

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

$$\mathrm{R}_1 = 0,032 \times \frac{220}{115.6} = 0.061\,Ом \text{ Equation.3 } ; \ \mathrm{R}_2 = 0,021 \times \frac{220}{115,6} = 0,04 Ом$$

Equation.3 ;

$$X_1 = 0,079 \times \frac{220}{115,6} = 0,15 \text{ Ом Equation.3 } ; X'_2 = 0,13 \times \frac{220}{115,6} = 0.247\,Ом$$

Equation.3 ;

$$X_\mathrm{m} = 2,6 \times \frac{220}{115б6} = 4,947\,Ом \text{ Equation.3 } .$$

За формулами знаходимо значення індуктивностей:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mathrm{m}}{\mathrm{w}_0}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mathrm{m}}{\mathrm{w}_0}; \quad L_m = \frac{X_\mathrm{m}}{\mathrm{w}_0}. \tag{2.44}$$

$$L_1 = \frac{0,15 + 4,947}{314} = 0,016\,\text{Гн}; \quad L_2 = \frac{0,247 + 4,947}{314} = 0,017\,\text{Гн};$$

$$L_m = \frac{4,947}{314} = 0,016 Гн.$$

Номінальний момент:

$$\mathrm{M}_н = \frac{3\mathrm{R}_2'}{s_n \times \mathrm{w}_c} \times \frac{\mathrm{U}^2_{фн}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s_n})^2 + (X_1 + X_2')^2}. \tag{2.45}$$

$$M_н = \frac{3 \times 0.04}{0,015 \times 62,83} \times \frac{220^2}{(0,061 + \frac{0,04}{0,015})^2 + (0,15 + 0,247)^2} = 811,8 Нм.$$

Критичний момент:

$$M_{KP} = \frac{3}{2 \times w_c} \times \frac{U^2_{фн}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (2.46)$$

$$M_{KP} = \frac{3}{2 \times 62,83} \times \frac{220^2}{(0,061 + \sqrt{0,061_1^2 + (0,15 + 0,247)^2}} = 2495 \text{ Нм}.$$

Визначення коефіцієнта kσ

$$k\sigma = \frac{1}{0,016 \times 0,017 - 0,017} = 49240 \text{ Equation.3} \quad .$$

(2.47)

Синхронна кутова швидкість: $\omega_0 = 62,8$ р/с.

Номінальна кутова швидкість: $\omega_н = \omega_0 (1-s) = 62,8(1-0,015) = 53,38$ р/с.

Номінальний момент : $M = \frac{P_í}{w_í} = \frac{60 ' 10^3}{53,38} = 1124$ Нм.

Максимальний момент: $M_{max} = 1124 \times 2,8 = 3147$ Нм

Приймаємо для форсованого пуску величину пікового моменту:

$$M_1 = 0,7 M_{max} = 0,7 \times 3147 = 2203 \text{ Нм}.$$

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

$$I = \sqrt[6]{\frac{1}{S_{íì} ' I ¢}} = \sqrt[6]{\frac{1}{0,015 ' 1,96}} = 1,8. \quad (2.48)$$

Перемикаючий момент

$$M_2 = \frac{\grave{I}\ \not{c}}{I} = \frac{1,96}{1,8} = 1,09\ .$$

Внутрішній опір ротора

$$r_{ð} = \frac{U_{ðíîì}\ \ S_{íîì}}{\sqrt{3} I_{ðîòì}} = \frac{172\ ´\ 0,015}{\sqrt{3}\ ´\ 165} = 0,009\ \text{Ом}. \qquad (2.49)$$

Повні опори кола ротора на кожному ступені:

$$R_6=\lambda r_p=1,8\times0,009=0,\ 016\ \text{Ом},$$
$$R_5=\lambda^2 r_p=1,8^2\times0,009=0,029\ \text{Ом},$$
$$R_4=\lambda^3 r_p=1,8^3\times0,009=0,0\ 52\ \text{Ом},$$
$$R_3=\lambda^4 r_p=1,8^4\times0,009=0,094\ \text{Ом},$$
$$R_2=\lambda^5 r_p=1,8^5\times0,009=0,\ 17\ \text{Ом},$$
$$R_1=\lambda^6 r_p=1,8^6\times0,009=0,31\text{Ом}.$$

Опори окремих секцій пускового реостата

$$r_6=R_6-r_p=0,016-0,009=0,007\ \text{Ом},$$
$$r_5=R_5-R_6=0,029--0,016=0,013\ \text{Ом},$$
$$r_4=R_4-R_5=0,052-0,029=0,023\ \text{Ом},$$
$$r_3=R_3-R_4=0,094-0,052=0,042\ \text{Ом},$$
$$r_2=R_2-R_3=0,17-0,094=0,076\ \text{Ом},$$
$$r_1=R_1-R_2=0,31-0,17=0,14\ \text{Ом}.$$

Загальний опір пускового реостата:

$$R=r_1+r_2+r_3+r_4+r_5+r_6=0,14+0,076+0,042+0,023+0,013+0,007=0,301\ \text{Ом}\ .$$

Критичне ковзання:

$$S_{\hat{e}\eth} = S_{\acute{i}}(\mathrm{l} + \sqrt{\mathrm{l}^2 - 1}) = 0{,}015(2{,}8 + \sqrt{2{,}8^2 - 1}) = 0{,}08.$$

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

$$S_{\mathring{a}1} = \frac{S_{\hat{E}\eth}}{\frac{M_{\max}}{M_1} + \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{M_1}\right)^2 - 1}} = \frac{0{,}08}{\frac{1}{0{,}7} + \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}7}\right)^2 - 1}} = 0{,}033,$$

$\omega_e=\omega_0(1-Se_1)=62{,}8(1-0{,}033)=60{,}75$ p/c.

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

$$S_{p1} = S_{\mathring{a}1}\frac{R_1}{r_p} = 0{,}033\frac{0{,}31}{0{,}009} = 0{,}99,$$

$\omega_1=\omega_0(1-Sp_1)=104{,}7(1-0{,}99)=62{,}8\times0{,}01=0{,}628$ p/c;

$$S_{p2} = S_{\mathring{a}1}\frac{R_2}{r_p} = 3{,}6\,'\,0{,}17 = 0{,}62,$$

$\omega_2=\omega_0(1-Sp_2)=62{,}8\times0{,}38=23{,}9$p/c;

$$S_{p3} = S_{\mathring{a}1}\frac{R_3}{r_p} = 3{,}6\,'\,0{,}094 = 0{,}34,$$

$\omega_3=\omega_0(1-Sp_3)=62{,}8\times0{,}66=41{,}4$p/c;

$$S_{p4} = S_{\mathring{a}1}\frac{R_4}{r_p} = 3{,}6\,'\,0{,}052 = 0{,}19,$$

$\omega_4=\omega_0(1-Sp_4)=62{,}8\times0{,}19=51$ p/c;

$$S_{p5} = S_{â1} \frac{R_5}{r_p} = 3{,}6 \cdot 0{,}029 = 0{,}106,$$

$\omega_5 = \omega_0 (1\text{-}Sp_5) = 62{,}8 \times 0{,}74 = 56$ p/c;

$$S_{p6} = S_{â1} \frac{R_6}{r_p} = 3{,}6 \cdot 0{,}016 = 0{,}059,$$

$\omega_6 = \omega_0 (1\text{-}Sp_6) = 62{,}8 \times 0{,}82 = 59$ p/c.

Перепад швидкостей на відповідних ступенях:

$\Delta \omega_1 = \omega_1 - 0 = \omega_1 = 0{,}628$ p/c,

$\Delta \omega_2 = \omega_2 - \omega_1 = 23{,}9\text{-}0{,}628 = 23{,}3$p/c,

$\Delta\omega_3 = \omega_3 - \omega_2 = 41{,}4\text{-}23{,}9 = 17{,}5$ p/c,

$\Delta\omega_4 = \omega_4 - \omega_3 = 51$—$41{,}4 = 9{,}6$ p/c,

$\Delta\omega_5 = \omega_5 - \omega_6 = 56\text{-}51 = 5$ p/c,

$\Delta\omega_6 = \omega_6 - \omega_5 = 59\text{-}56 = 3$ p/c,

$\Delta\omega_7 = \omega_e - \omega_6 = 60{,}75\text{-}569 = 1{,}75$ p/c.

Час пуску на відповідних ступенях

$$t = J \frac{9{,}55 \Delta w}{M_1 - M_2} \ln \frac{M_1 - M_í}{M_2 - Mí}$$

$$t_1 = 0{,}95 \frac{9{,}55 \cdot 0{,}628}{3147 - 2203} \ln \frac{1{,}96 - 1}{1{,}09 - 1} = 0{,}029\text{c}$$

$t_2 = 0{,}047 \times 23{,}3 = 1{,}08$c,

$t_3 = 0{,}047 \times 17{,}5 = 0{,}8$c,

$t_4 = 0{,}047 \times 9{,}6 = 0{,}45$c,

$t_5 = 0{,}047 \times 5 = 0{,}23$c,

$t_6 = 0{,}047 \times 3 = 0{,}14$c,

$t_7 = 0{,}047 \times 1{,}75 = 0{,}08$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 λе більшості груп елементів розраховуються по математичній моделі [14]:

$$\lambda_e = \lambda_б \prod_{i=1}^{m} K_i \text{ Equation.3 } , \quad (2.50)$$

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

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

m – число чинників, що враховуються.

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

$$\lambda_e = (\lambda_{кр} k_t + \lambda_{кор} k_E)\, k_Q\, k_{L..} \quad (2.51)$$

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):

$$\lambda_e = (\lambda_б \text{Equation.3} \cdot k_F k_P k_П + \lambda_б^{(ком)} F \cdot k_P k_K k_П) k_E .$$

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

$$\lambda_e = \lambda_б \text{Equation.3} \cdot k_t k_E k_П .$$

Математична модель прогнозування значень експлуатаційної інтенсивності відмов кулачкового командоконтролера:

$$\lambda_e = (\lambda_б \text{Equation.3}^{(ки)\cdot} k_F k_к + \lambda_б^{(вкл)} NF) \cdot k_P k_П k_E .$$

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;

$\lambda_б \text{Equation.3}^{(ки)\cdot}$ – 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:

$$k_t=0,1\exp\left[\frac{-E_a}{8,617\times10^{-5}}\left(\frac{1}{T_{кр}+273}-\frac{1}{298}\right)\right]\text{Equation.3},$$

(2.52)

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

$T_{кр}$ –температура кристала.

$$T_{кр}=T_{корп}+R_{корп}P=40+20\cdot0,6=52°.$$

$$k_t=0,1\exp\left[\frac{-0,4}{8,617\times10^{-5}}\left(\frac{1}{52+273}-\frac{1}{298}\right)\right]\text{Equation.3}=0,1e^{1,294}$$

$$=0,1\cdot3,65=0,365.$$

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

k_F – коефіцієнт, що враховує число комутацій на годину:

$$k_F=0,5+0,25\lg F=0,5+0,25\lg600=1,2;$$

$k_П$ – 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:

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

Експлуатаційна інтенсивність відмов електронної плати (командоконтролер VNSO):

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

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

$$k_P=A\exp\left[\frac{t_{îêð}+273}{N_T}\right]^G\exp\left[\frac{K_H}{N_S}\right]^H \text{Equation.3} \quad ,$$

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

$$k_P=0,1951\exp\left[\frac{35+273}{352}\right]^{15,7}\exp\left[\frac{0,8}{0,8}\right]^2 \text{Equation.3} =0,26.$$

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

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

Експлуатаційна інтенсивність відмов модуля (проектний варіант):

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

Наработка модуля на відмову:

$$T = \frac{1}{\lambda_e} = \frac{1}{386 \times 10^{-6}} = 2589 \text{ годин}$$

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

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

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 $к_р = 7\left(\frac{t_{îêð} + 273}{398}\right)^{12} \exp\left(1{,}25 K_H\right)^2$ Equation.3 $= 7\left(\frac{35 + 273}{398}\right)^{12} \exp\left(1{,}25 \times 1\right)^2$

Equation.3 $= 1{,}34$.

Наработка елемента на відмову:

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

Імовірність безвідмовної роботи за час 5000 годин:

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

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

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

Данна випускна кваліфікаційна робота бакалавра передбачає реконструкцію електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного крана

Метою охорони праці є виявлення технічних, економічних, організаційних і соціальних можливостей поліпшення умов безпеки праці, збереження здоров'я й працездатності людини, тому в даному розділі розглянуті основні шкідливі та небезпечні фактори в киснево-конверторному цеху вказаного підприємства.

3.1 Загальна характеристика умов праці

Виходячи з норм ДСП 173-96 металургійні, машинобудівні та металообробні підприємства і виробництва відносяться до Класу I. Санітарно-захисна зона 1000 м. Територія підприємства повинна бути відділена від житлового масиву санітарно-захисною зоною рівною 200 м³, озелененням не менше 15%.

Конвертоний цех є приміщенням з залізобетону, металоконструкцій і скла, там установлений мостовий кран. За ДБН В.1.1-7-2002 вогнестійкість будівлі II ступеня. Системи опалювання та кондиціювання цеху спроектоване відповідно до ДБН В.2.5-67:2013.

На даній ділянці працюють сталевари, помічники сталеварів. Всі вони виконують важкі фізичні роботи (категорія III) згідно ДСН 3.3.6.042-99. До категорії III відносяться роботи з витратою енерговитрат організму більше 250 ккал/год (290 Вт), пов'язані з постійними пересуваннями, переміщеннями

й перенесенням значних (понад 10 кг.) ваги й потребуючих більших фізичних зусиль.

Таблиця 3.1 - Проведення досліджень метеорологічних умов

Технологічний процес	t^o повітря ^oC		Відносна вологість, %		Швидкість вітру, м/с		Теплове випромінювання	
	Факт.	Доп.	Факт.	Доп.	Факт.	Доп.	Факт.	Доп.
р.м. сталевара й помічника сталевара	30,4	18-20	55	40-60	0,23	0,4	2900	140

У результаті проведення дослідження метеорологічних умов температура повітря й теплове випромінювання перевищує припустиму норму.

Небезпечні і шкідливі виробничі чинники відповідно до ГОСТ 12.0.003–74 підрозділяються на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні, а також чинники трудового процесу, які характеризують тяжкість і напруженість праці. У киснево-конверторному цеху основними небезпечними й шкідливими виробничими чинниками є: пил, пари й гази, надлишкова теплота, підвищений рівень шуму, вібрацій, електромагнітних випромінювань, машини й механізми, що рухаються.

На даній дільниці виробництва проявляють свою токсичну дію багато шкідливих хімічних виробничих чинників.

Таблиця 3.2 - Результати вимірів шкідливих виробничих факторів у киснево-конверторному цеху

Шкідливі речовини	ПДК, мг/м3	Факт. концентрація, мг/м^3	Клас небезпеки
заліза оксид (III)	6	11	IV
азоту диоксид	2	3,4	III
ангідрид сірчистий	10	11,1	III

кремнію диоксид аморфний	1	0,12 (4,2%)	III
вуглецю оксид	20	6,78	IV
марганець	0,2	0,1	II

На даному робочому місці фактична концентрація шкідливих речовин, таких як: заліза оксид (III), азоту диоксид, ангідрид сірчистий перевищує ПДК.

Шум нормується за ДСН-3.3.6.037-99.

Таблиця 3.3 - Проведення дослідження шумового навантаження

Робоче місце	Еквівалентний рівень, дБ	ПДУ, дБ
Сталевар і помічник сталевара	78	80
Машиніст дистрибутора	64	75
Кранівник	72	75

Результати проведених вимірів показали, що рівень шуму не перевищує ПДУ на відповідних робочих місцях.

Потужні джерела інфразвуку є у всіх основних і у ряді допоміжних металургійних цехів. Причому цей рівень звукового тиску на робочих місцях, як правило, в межах 90 – 120 дБ.

Параметри загальної й локальної вібрації регламентуються ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ.

Таблиця 3.4 - Допустимі та фактичні значення нормованих параметрів локальної вібрації

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	Допустимі значення нормованих параметрів локальної вібрації				Фактичні значення нормованих параметрів локальної вібрації			
	віброприскорення		вібро-швидкість		віброприскорення		вібро-швидкість	
	$м/с^2$	дБ	$м/с\text{-}10^{-2}$	дБ	$м/с^2$	дБ	$м/с\text{-}10^{-2}$	дБ
63	5,4	85	1,4	109	5,2	80	1,3	105
125	10,7	91	1,4	109	10,5	90	1,3	105

Фактичні показники вібрації на даній ланці виробництва, як видно з таблиці 3.4 не виходять за рамки допустимих показників.

Основоположним документом, що визначає вимоги до проектування освітлення, є ДБН В.2.5-28-2006.

Таблиця 3.5 - Проведення дослідження освітленості робочого місця

Робоче місце	Розряд роботи	Підразряд	Результат виміру, люкс	Нормативне значення, люкс
Сталевар і помічник сталевара	VII		197	200 (через наявність лампи накалювання 150)
Машиніст дистрибутора	IV	г	217	150 (100)
Кранівник	IV	г	131	150 (100)

Результати проведених вимірів показали, що освітленість робочого місця машиніста дистрибутора перевищує нормативне значення на 67 люксів.

3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

Виробничий процес конверторному 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, процес обробки яких супроводиться виділенням променистого тепла, іскри полум'я; горючі гази, рідини і тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо.

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.

Робоча площадка киснево-конверторного цеху відповідно до ПУЕ по пожежній небезпеці відноситься до категорії “Г”, по підривній небезпеці - “Г”.

Пожежі на ділянці можуть виникнути в результаті: 1) загоряння електроустаткування при перевантаженнях, перегрівах і коротких замиканнях; 2) загоряння пально-мастильних матеріалів при влученні в них іскор електричного або механічного походження; 3) дія статичного або грозового розряду.

Небезпека виникнення пожежі на ділянці киснево-конверторного цеху зменшена в проекті наступними розробленими заходами: оснащенням систем керування електроустаткуванням автоматами максимального струмового захисту й плавкими запобіжниками; головні двигуни електроприводів оснащені системою замкнутої примусової вентиляції з очищенням повітря від пилу й його охолодженням; трансформаторні кіоски винесені за межі виробничого приміщення; маслопідвали обладнані системою приточно-витяжної вентиляції; статичний заряд попадає в землю по мережі заземлення.

Для гасіння можливих пожеж у цеху передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначаються на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004. У таблиці 3.6 наведений розрахунок первинних засобів пожежогасіння для ККЦ.

Таблиця 3.6 - Розрахунок первинних засобів пожежогасіння

Найменування приміщень, установок	Площа або кількість	Необхідна кількість по нормах				
		Вогн. ОХП-10	Вогн. ОУ-2	Вогн. ОУ-5	Вогн. УП-1М	Ящики з піском і лопатами
Конверторне відділення	165000	120	-	40	20	16
Машзал	500	1	2	1	1	1
Пост керування	На кабіну	_	_	1	_	1
Кабіна крана	На кабіну	1	-	1	-	-

3.3 Захист навколишнього середовища

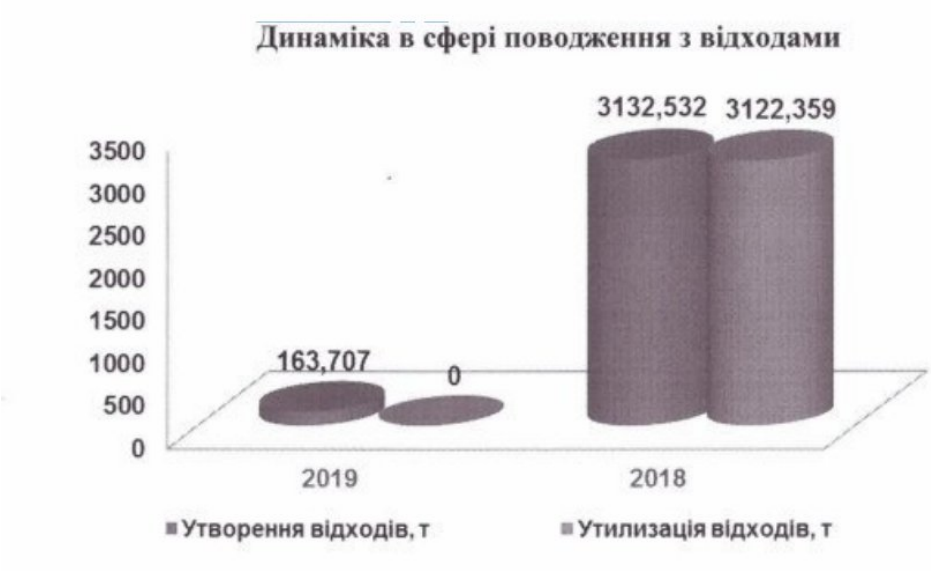
У звітному періоді 2019-2022 рр. ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО здійснювало свою діяльність відповідно до Статуту.

Природоохоронна діяльність є невід'ємною частиною успішного ведення сучасного бізнесу. Товариство прагне захищати навколишнє середовище, в тому числі шляхом впровадження у виробничі процеси заходів із запобігання забрудненню, раціонального використання ресурсів. З прагненням органічно інтегрувати принципи охорони навколишнього природного середовища в стратегічні цілі і завдання розвитку підприємства, визначені найбільш значущі екологічні аспекти, максимально спрямовані на перехід від стабілізації показників впливу на навколишнє середовище до істотного скорочення рівня техногенних факторів і відповідно поліпшення стану навколишнього природного середовища. Забезпечуючи виконання виробничої програми, екологічна діяльність підприємства спрямована на обмеження збільшення кількості забруднюючих речовин, що надходять в навколишнє середовище.

Залежність валових викидів забруднюючих речовин в атмосферу від обсягів виробництва коксу



Товариство забезпечує готовність до надзвичайних ситуацій, які потенційно можуть впливати на навколишнє середовище, своєчасно реагувати та мінімізувати їхні можливі наслідки. Для зменшення викидів забруднюючих речовин, на підприємстві постійно проводяться ремонти коксових батарей. Своєчасно плануються та виконуються капітальні ремонти камер коксування із застосуванням керамічної наплави методом Е5Х (торкретування вогнетривким бетоном). У 2020 році розпочато капітальний ремонт коксової батареї Ме5 із частковою перекладкою камер коксування. Затрати на капітальний ремонт камер коксування у 2019 році склали 24,2 млн. грн., в 2018 році склали 11,2 млн. грн. На постійній основі проводяться поточні ремонти ущільнення газо-повітряних клапанів, ремонти підрамних та надрамних головок, ремонт анкерних стяжок, заміна розтрубних з'єднань клапанних коробок, очистка та ревізія газовідвідної арматури, ремонти дверного господарства печей, заміна дверей, футерування дверей, заміна ущільнюючих рамок. На коксових батареях, згідно проекту експлуатується система бездимного завантаження шихти у коксові печі із використанням пароінжекції. На постійній основі здійснюється ревізія кранів парової інжекції, контролюється тиск подання пари на пароінжекцію. З огляду на стійку тенденцію зростання вартості енергоресурсів і високу енергоємність технологічних процесів, Товариство ставить в число ключових факторів свого успішного розвитку постійне підвищення рівня енергоефективності виробничої діяльності. Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2011, для зниження рівня споживання електроенергії у 2019 році на електроприводи вентиляторів котельних агрегатів Мо1,2,3,4 встановлені частотні перетворювачі, витрати на реалізацію заходів склали 326,58 тис. грн Система управління відходами спрямована на поступове зменшення їх утворення для зниження шкідливого впливу на довкілля за рахунок їх утилізації в межах підприємства шляхом збільшення частки їх повторного використання (в залежності від технологічних можливостей).



По організації водогосподарської діяльності є вторинним водокористувачем щодо забезпечення водою основного виробництва і працює на замкнутому оборотному циклі водопостачання. Передача промислових стічних вод здійснюється на установку біохімічної очистки стічних вод теплосилового цеху з подальшим використанням очищених вод для гасіння коксу. На функціонування системи екологічного моніторингу, вдосконалення мереж спостережень за станом довкілля, уніфікацію методики спостережень та лабораторних аналізів, приладів і систем контролю, за 2019 року було витрачено 73,3 тис. грн. у 2018 році - 137,26 тис. грн.

Основні напрямки Товариства щодо зниження забруднення навколишнього середовища та вдосконалення системи екологічного управління - ремонт пічних камер коксування з використанням сучасних технологій; - застосовування сучасних технічних рішень щодо знепилювання газів; - зниження паливо - і енергоємності основних технологічних процесів; - скорочення втрат паливно-енергетичних ресурсів; - підвищення рівня оснащеності основних і допоміжних виробничих процесів підприємства приладами обліку; - впровадження та сертифікація підприємства відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 140001. Реалізація природоохоронних заходів на Товаристві максимально спрямована на перехід від стабілізації показників впливу на навколишнє середовище до суттєвого скорочення рівня

техногенних факторів і відповідно покращення стану довкілля території міста та області в цілому.

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

В випускній роботі бакалавра на тему: «Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму першого допоміжного підйому заливочного мостового крана» 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 МТН потужністю 60 кВт, частотою обертання $n = 600$ хв$^{-1}$, з моментом інерції J_p=0,45 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. Теличко Л. Я. Аналіз причин виникнення сил перекосу мостового крана / Л. Я. Теличко, А. А. Дорофєєв // Прилади і системи. Управління, контроль, діагностика. – 2006. – № 7. – С. 57–60.

2. Інструкція з експлуатації заливочного крана вантажопідйомністю 15 т. / В. Л. Лихачов. Асинхронні електродвигуни. – Київ : Солон-Р, 2002. – 304 с.

3. Предко М. Керівництво з мікроконтролерів. – Київ : Постмаркет, 2001. – Т. 1. – 416 с.

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

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

6. Курсове проєктування вантажопідіймальних машин : навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти / С. А. Казак, В. Є. Дусьє, Є. С. Кузнєцов та ін. ; за ред. С. А. Казака. – Київ : Вища школа, 1989. – 319 с.

7. Довідник з кранів : у 2 т. Т. 1. Характеристики матеріалів і навантажень. Основи розрахунку кранів, їх приводів і металевих конструкцій / В. Д. Брауде, М. М. Гохберг, І. Є. Звягін та ін. ; за заг. ред. М. М. Гохберга. – Київ : Машинобудування, 1988. – 536 с.

8. Довідник з кранів : у 2 т. Т. 2. Характеристики та конструктивні схеми кранів. Кранові механізми, їх деталі та вузли / М. П. Александров, М. М. Гохберг, А. А. Ковін та ін. ; за заг. ред. М. М. Гохберга. – Київ : Машинобудування, 1988. – 559 с.

9. Зимін Є. М. Елементи та схеми безконтактного керування в системах кранового електропривода. – Київ, 2003. – 278 с.

10. Системи регульованого електропривода кранових механізмів : збірник статей. – Київ, 2001.

11. 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.

12. Інтелектуальні реле Zelio Logic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.is-com.ua/files/zelio_logic_2_katalog.pdf/

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

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

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

16. Загирняк М. В., Родькін Д. І., Чорний А. П., Коренькова Т. В. Напрями розвитку теорії миттєвої потужності та її застосування в задачах електромеханіки // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.

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

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

19. Довідник з проєктування електропостачання, ліній електропередачі та мереж / Я. М. Большам та ін. – Київ : Енергія, 1975. – 695 с.

20. Розрахунок коротких замикань та вибір електрообладнання : навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти / І. П. Крючков та ін. – Київ : Видавничий центр «Академія», 2006. – 416 с.

21. Коваленко В.Л.. та ін. Організація виконання кваліфікаційних робіт у ЗДІА: Навч. посібник. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 91 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

32. В 2018-2019 роках ПрАТ реалізується комплекс робіт з модернізації коксохімічної галузі та капремонту доменних печей. – Електронний ресурс. – Режим доступу: http://uanews.dp.ua/economy/2018/09/25/157374.html.

Додаток А

Схема електрична принципова електропривода механізму підйому крана до реконструкції

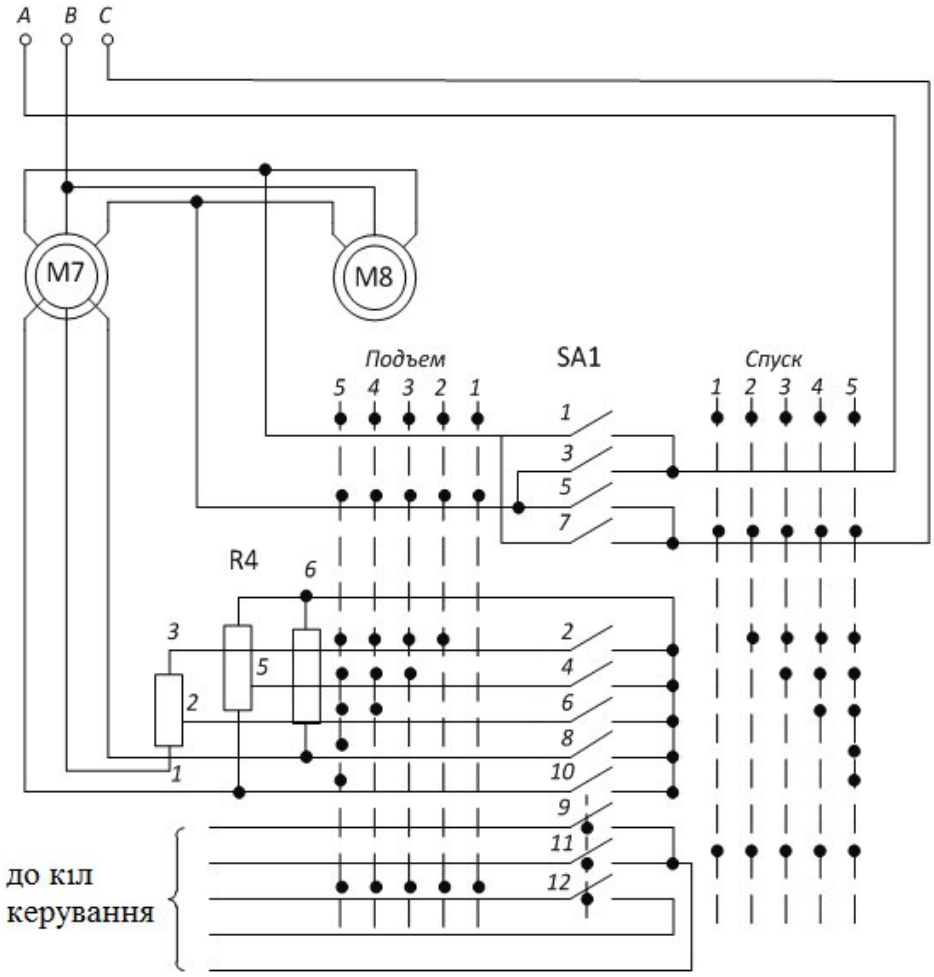


Рисунок А.1 − Фрагмент силової схеми живлення привода підйому

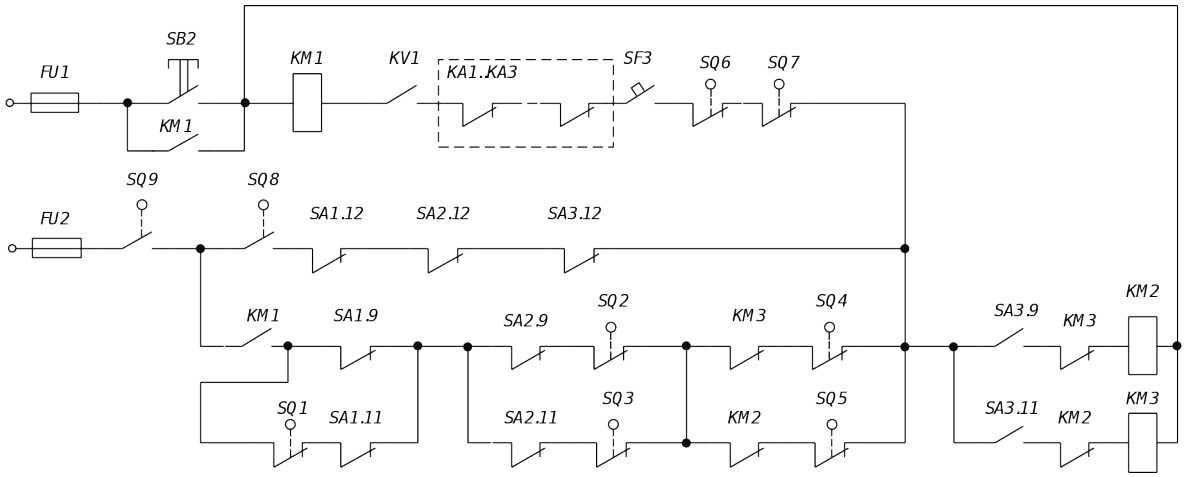


Рисунок А.2 − Схема кіл керування краном

Додаток Б

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

Программа расчета итого 7 ступеней - копия.xmcd

$Pn \equiv 60000 \quad Un \equiv 220 \quad \cos\phi \equiv 0.925 \quad \eta \equiv 0.85 \quad sn \equiv 0.015 \quad r1o \equiv 0.032 \quad x1o \equiv 0.079 \quad x\mu o \equiv 2.6 \quad fn \equiv 5$

$r2o \equiv 0.021 \quad x2o \equiv 0.13 \quad no \equiv 600 \quad Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn} \quad R2 \equiv r2o \cdot Zb \quad x2 \equiv x2o \cdot Zb$

$Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 115.624 \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn} = 1.903 \quad R2 \equiv r2o \cdot Zb = 0.04 \quad x2 \equiv x2o \cdot Zb = 0.247$

$r1 \equiv r1o \cdot Zb \quad r1 \equiv r1o \cdot Zb = 0.061 \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb = 0.15 \quad x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb$

$x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb = 4.947 \quad J \equiv 0.95 \quad \phi \equiv \frac{\pi}{2} \quad p \equiv \frac{3000}{no} \quad p \equiv \frac{3000}{no} = 5 \quad \omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn$

$\omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn = 314.159 \quad \omega = 314.159 \quad Icn = 115.624 \quad Zb = 1.903 \quad R2 = 0.04 \quad x2 = 0.247$

$r1 = 0.061 \quad x1 = 0.15 \quad x\mu = 4.947 \quad p = 5 \quad \omega n \equiv \frac{\pi \cdot no \cdot (1 - sn)}{30} \quad \omega o \equiv \frac{\pi \cdot no}{30}$

$L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} \quad L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} = 0.016 \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} = 0.017$

$Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} \quad Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} = 0.016 \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} = 311.127$

$k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} \quad k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} = 4.924 \times 10^4 \quad \omega n = 61.889 \quad \omega o = 62.832$

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

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right] = 811.893$$

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

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2 \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left[r1 + \sqrt{(r1)^2 + (x1 + x2)^2}\right]}\right] = 2.495 \times 10^3$$

$td \equiv 0.0005 \quad tmax \equiv 0.9 \quad n \equiv 2000 \quad Mr \equiv Mn \quad Mn = 811.893 \quad Mkr = 2.495 \times 10^3$

Программа расчета итого 7 ступеней - копия.xmcd

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 7$ $M1 \equiv 0.85 \cdot Mkr$ $M1 = 2.12 \times 10^{3}$ $\lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn \cdot M1}}$ $\lambda = 1.589$ $M2 \equiv \frac{M1}{\lambda}$ $M2 = 1.335 \times 10^{3}$

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

$Rr1 = 0.063$ $Rr2 = 0.101$ $Rr3 = 0.16$ $Rr4 = 0.254$ $Rr5 = 0.404$ $Rr6 = 0.642$ $Rr7 = 1.02$ $s1 = 0.025$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

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

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

$\omega1 = 60.37$ $\omega2 = 58.922$ $\omega3 = 56.621$ $\omega4 = 52.965$ $\omega5 = 47.158$ $\omega6 = 37.933$ $\omega7 = 23.279$

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

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

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

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

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

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

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 $V_{i,0} < \omega7$; Rr6 if $\omega7 \le V_{i,0} < \omega6$; Rr5 if $\omega6 \le V_{i,0} < \omega5$; Rr4 if $\omega5 \le V_{i,0} < \omega4$; Rr3 if $\omega4 \le V_{i,0} < \omega3$

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

Додаток В

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів

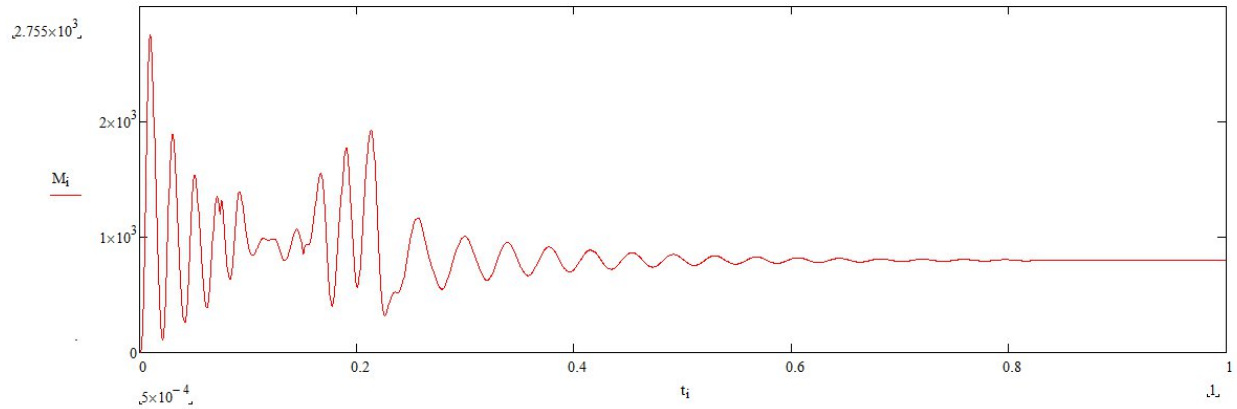


Рисунок Д.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

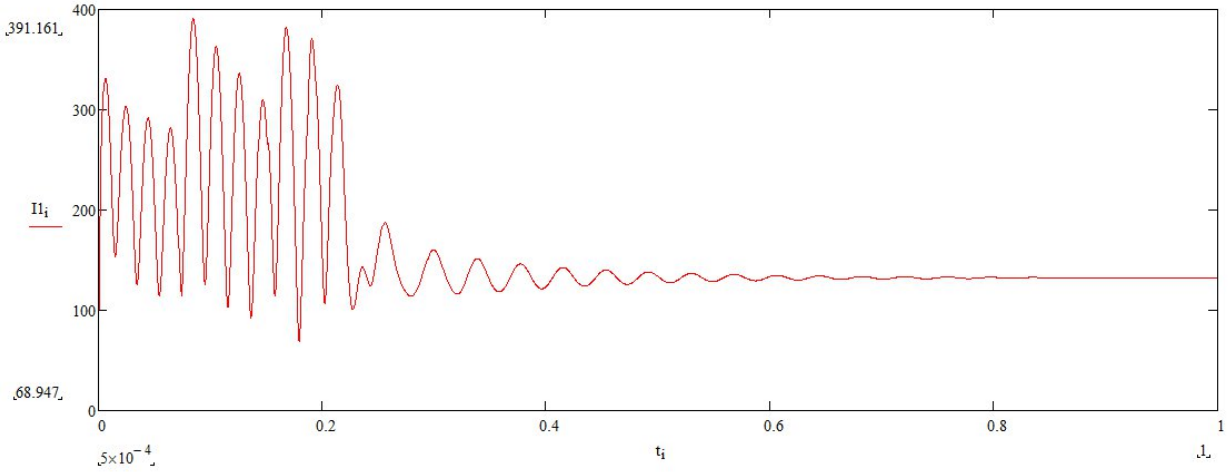


Рисунок Д.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

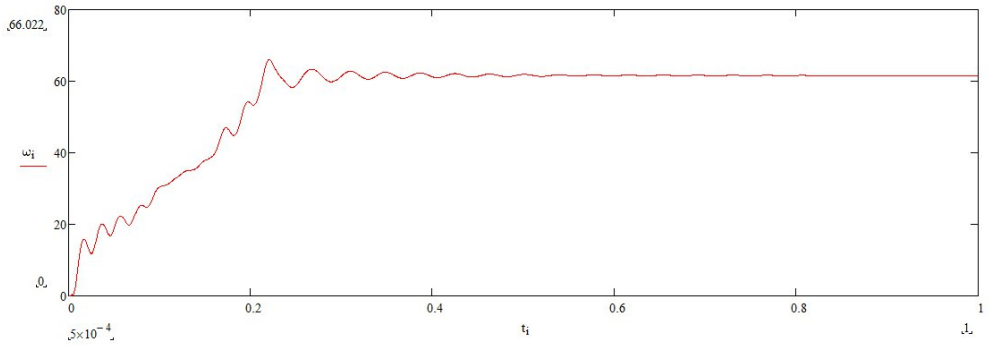


Рисунок Д.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Г

Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна

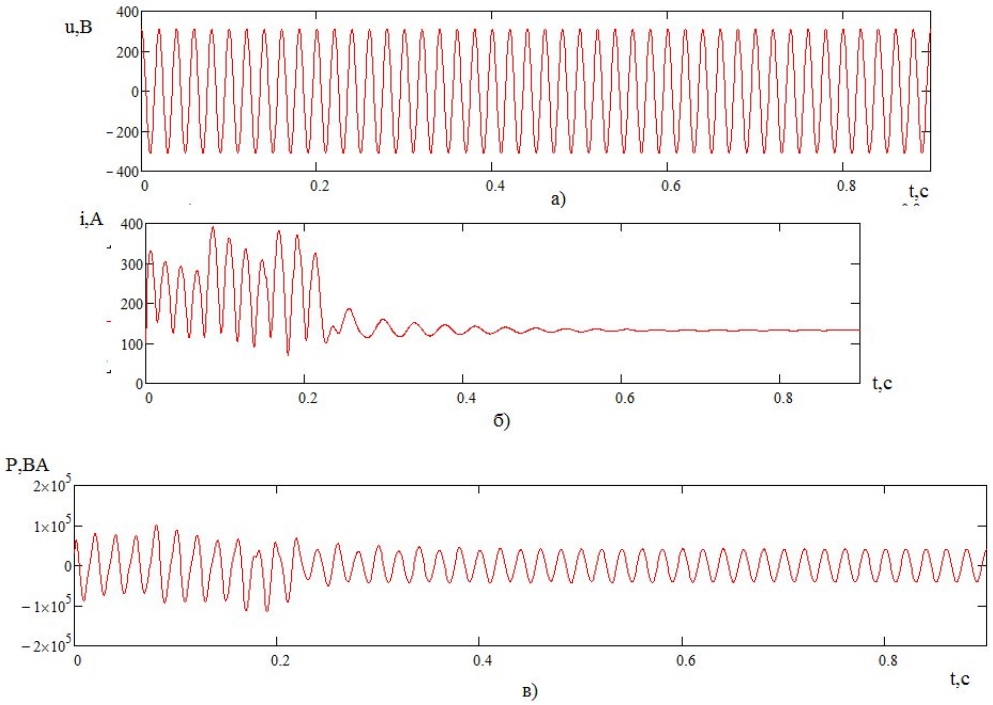


Рисунок Е.1 − Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=7

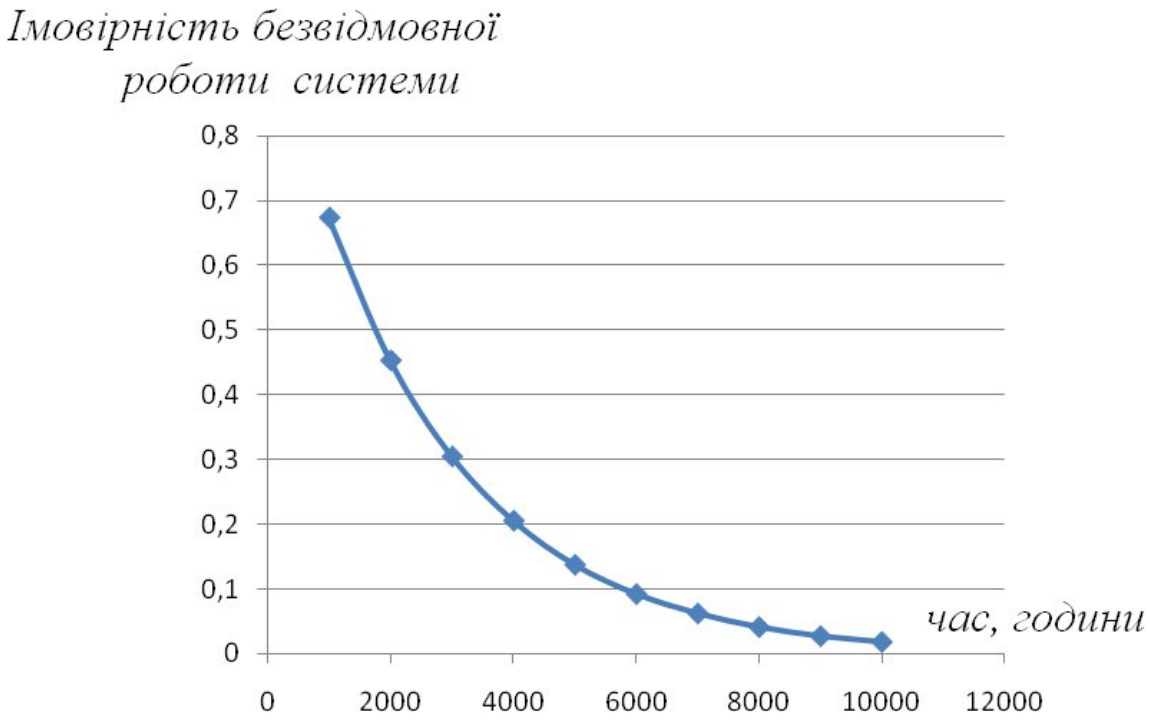


Рисунок Г.2 (а) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у базовому варіанті

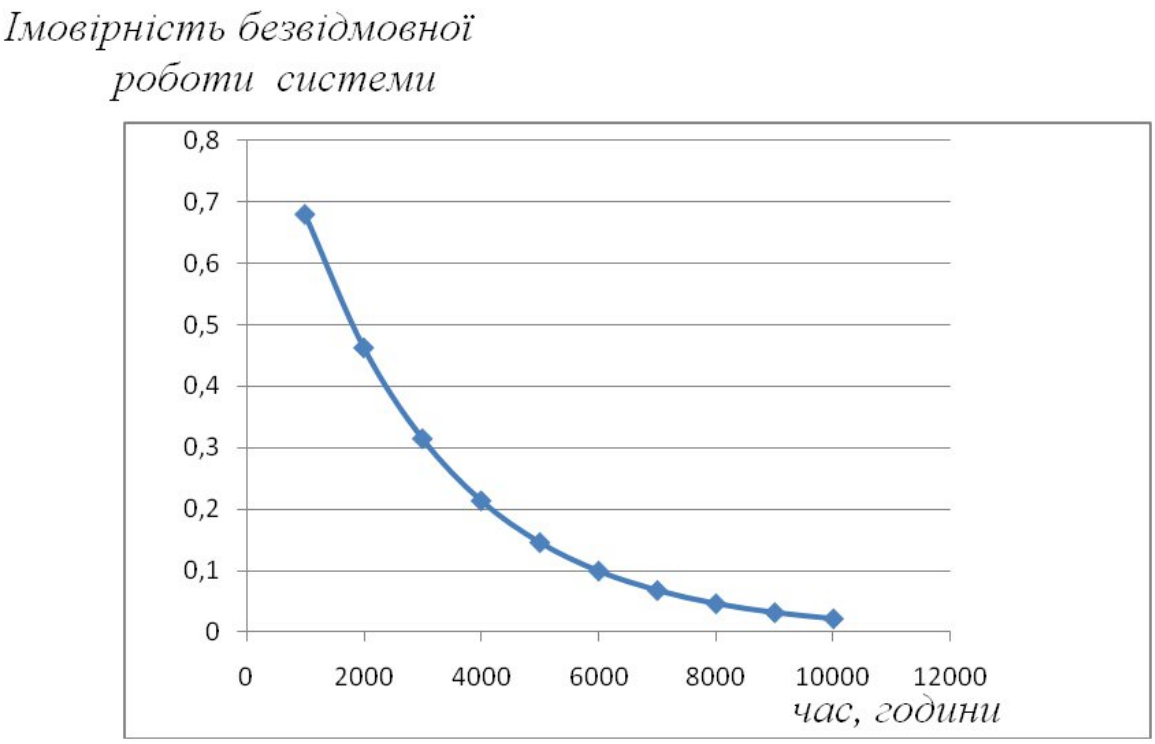


Рисунок Г.2 (б) – Графік залежності безвідмовної роботи системи керування електроприводом у проектному варіанті