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 пересування візка допоміжних підйомів 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)
І.В. Падеріна
(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

Падеріна Інна Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму пересування візка допоміжних підйомів 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.

3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом механізму пересування мостового крана

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування візка допоміжних підйомів заливочного мостового крана 2) Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні 3) Охорона праці та захист навколишнього середовища.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) схема до реконструкції; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п'ять ступенів та сім щаблів

6 Консультанти розділів роботи

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

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування візка допоміжних підйомів 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 _____ _____ І.В. Падеріна
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Падеріна Інна Віталіївна: Тема роботи: Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму пересування візка допоміжних підйомів 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 розглянуто питання реконструкції електропривода механізму пересування візка заливочного крана вантажопідйомністю 125 т. Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення надійності, енергоефективності та безпеки роботи кранових механізмів у складних умовах металургійного виробництва. У роботі проаналізовано особливості технологічного процесу роботи заливочного крана, досліджено існуючу систему керування електроприводом та визначено її основні недоліки, пов’язані із застосуванням релейно-контакторної апаратури.

У процесі дослідження було виконано реконструкцію системи керування асинхронним двигуном з фазним ротором шляхом заміни релейно-контактних елементів на сучасні безконтактні пристрої. Для модернізації системи запропоновано використання програмованого логічного контролера, твердотільних реле та джойстикового керування, що дозволило підвищити плавність пуску, зменшити динамічні навантаження та покращити експлуатаційні характеристики електропривода.

У роботі проведено розрахунок параметрів механізму пересування візка, вибір електродвигуна та аналіз режимів його роботи. Значна увага приділена дослідженню перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором при різній кількості ступенів пускових резисторів. За допомогою програмного середовища Mathcad 14 виконано моделювання механічних характеристик електропривода, побудовано графіки зміни моменту, швидкості та струму під час пуску двигуна.

Порівняльний аналіз показав, що застосування семиступеневого пуску дозволяє зменшити кидки струму і моменту, знизити втрати електроенергії та покращити умови роботи механічної частини електропривода. У результаті модернізації підвищується надійність роботи обладнання, зменшуються витрати на технічне обслуговування та забезпечується більш стабільна робота кранового механізму в умовах металургійного виробництва.

Ключові слова: асинхронний двигун з фазним ротором, заливочний кран, електропривод, механізм пересування візка, програмований логічний контролер, твердотільне реле, безконтактна система керування, перехідні процеси, реостатний пуск, енергоефективність.

ABSTRACT

Paderina Inna Vitaliivna: Thesis topic: Analysis and Improvement of the Efficiency of the Electric Drive of the Traveling Mechanism of the Auxiliary Hoist Trolley of a Pouring Overhead Crane.

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

The qualification thesis addresses the issue of reconstructing the electric drive of the traveling mechanism of a 125-ton pouring crane trolley. The relevance of the study is determined by the need to improve the reliability, energy efficiency, and operational safety of crane mechanisms operating under difficult conditions of metallurgical production. The thesis analyzes the technological features of the pouring crane operation, investigates the existing electric drive control system, and identifies its main disadvantages associated with the use of relay-contactor equipment.

During the research, the control system of the slip-ring induction motor was reconstructed by replacing relay-contactor components with modern contactless devices. To modernize the system, the use of a programmable logic controller, solid-state relays, and joystick control was proposed. This solution made it possible to improve starting smoothness, reduce dynamic loads, and enhance the operational characteristics of the electric drive.

The thesis includes calculations of the trolley traveling mechanism parameters, the selection of the electric motor, and an analysis of its operating modes. Considerable attention is paid to the study of transient starting processes of the slip-ring induction

motor with different numbers of starting resistor stages. Using the Mathcad 14 software environment, the mechanical characteristics of the electric drive were modeled, and graphs of torque, speed, and current variations during motor startup were obtained.

Comparative analysis demonstrated that the use of a seven-stage startup reduces current and torque surges, decreases energy losses, and improves the operating conditions of the mechanical part of the electric drive. As a result of the modernization, the reliability of the equipment operation is increased, maintenance costs are reduced, and more stable operation of the crane mechanism in metallurgical production conditions is ensured.

Keywords: slip-ring induction motor, pouring crane, electric drive, trolley traveling mechanism, programmable logic controller, solid-state relay, contactless control system, transient processes, rheostatic startup, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП……10

1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування візка допоміжних підйомів заливочного мостового крана ……13

1.1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування візка допоміжних підйомів заливочного мостового крана…….13

1.2 Характеристика обладнання заливочного крану, електропривод механізму пересування візка якого реконструюється, за схемами……...…..…16

1.2.1 Основні технічні параметри заливочного крану ……16

1.2.2. Опис електричної принципової схеми електропривода механізму пересування візка заливочного крана № 2……..……..19

1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму пересування візка заливочного крану та формування вихідних даних…….21

2 РЕКОНСТРУКЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА БЕЗКОНТАКТНІ …….23

2.1 Вибір потужності електродвигуна пересування візка заливочного крану ..23

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні……..……32

2.2.1 Початкова релейно-контактна схема і вимоги до реконструкції…….……..32

2.2.2 Технічне рішення щодо реконструкції…….…33

2.2.2.1 Джойстик……..33

2.2.2.2 Твердотільне реле……33

2.2.2.3 Програмований логічний контролер (ПЛК)…….34

2.3 Оцінка технічної ефективності реконструйованого електропривода..35

2.3.1 Побудова механічних характеристик та дослідження перехідних процесів пуску асинхронного двигуна з фазним ротором…….. 36
2.3.2 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступенями пускових резисторів……. ……35
2.3.3 Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів…… ……40
2.4 Порівняльний аналіз втрат в електроприводі в перехідних режимах при пуску двигуна з п’ятьма та сьома ступенями пускових резисторів… …..40
3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА……43
3.1 Загальна характеристика умов праці……..43
3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……46
3.3 Захист навколишнього середовища…….48
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ…….52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..53
Додаток А. Схема електрична принципова механізму пересування візка крану до та після реконструкції……..56
Додаток Б. Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з п’ятьма ступінями пускових резисторів ……59
Додаток В. Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п’ть ступенів…….61
Додаток Г. Програма дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з сьома ступенями пускових резисторів……..62
Додаток Д. Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів……..64
Додаток Е. Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна …65

ВСТУП

Найпоширеніші стандартні магнітні та кулачкові контролери з контакторним керуванням резисторами в колі ротора асинхронних двигунів (АД) уже не відповідають багатьом сучасним вимогам, які ставляться до кранових механізмів у промисловому виробництві. Протягом багатьох десятиліть такі системи широко застосовувалися у металургійній галузі завдяки своїй відносній простоті та можливості забезпечення ступінчастого регулювання швидкості електропривода. Проте стрімкий розвиток електротехнічних засобів автоматизації та підвищення вимог до безпеки, енергоефективності й надійності обладнання показали, що традиційні релейно-контакторні схеми вже не здатні забезпечити необхідний рівень експлуатаційних характеристик.

Особливо гостро проблема проявляється на заливочних кранах, які працюють у надзвичайно складних умовах металургійного виробництва. Високі температури, значна запиленість, постійні динамічні навантаження та циклічний характер роботи негативно впливають на стан електрообладнання. У таких умовах контакторна апаратура швидко зношується, контакти підгорають, механічні елементи втрачають точність роботи, а система керування потребує постійного технічного обслуговування та ремонту. Усе це призводить до зниження надійності електропривода і, як наслідок, до частих аварійних зупинок обладнання.

Найбільш доцільним при реконструкції механізмів, які працюють на малих швидкостях лише короткочасно, є застосування сучасних безконтактних систем керування. Такі системи дозволяють, залишивши існуючий асинхронний двигун з фазним ротором, значно покращити плавність регулювання моменту та забезпечити більш м’які режими пуску й гальмування. Використання твердотільних реле, програмованих логічних контролерів та сучасних засобів дискретного керування дозволяє

мінімізувати механічний знос елементів системи, підвищити точність роботи привода та зменшити вплив людського фактору на процес керування краном.

Основним недоліком традиційної схеми керування електроприводами заливочних кранів, а також механізмами головного та допоміжного підйому, пересування візка і руху моста є саме релейно-контакторна апаратура. Подібні системи характеризуються складною структурою, значними габаритами та недостатньою надійністю в умовах інтенсивної експлуатації. Велика кількість контактних з’єднань збільшує ймовірність виникнення несправностей, а складність електричних схем ускладнює процес діагностики та пошуку пошкоджень. Через це значно зростають витрати часу на технічне обслуговування, ремонт і усунення аварійних ситуацій.

Унаслідок недостатньої надійності релейно-контакторних схем часто виникають поломки устаткування кранів. Кожна вимушена зупинка механізму призводить не лише до простою самого крану, а й негативно впливає на безперервність усього технологічного процесу металургійного виробництва. Умови сучасного виробництва вимагають максимальної стабільності та безперервності технологічних операцій, тому навіть короткочасні затримки можуть спричиняти значні економічні втрати, порушення виробничого циклу та зниження продуктивності цеху в цілому.

Особливу небезпеку становить робота електропривода у перехідних режимах. Під час пуску, реверсу або гальмування механізму виникають значні динамічні навантаження, які передаються на елементи кінематичної схеми. У випадках, коли не враховується податливість пружних елементів механізму, навантаження можуть досягати критичних значень і викликати передчасний знос редукторів, муфт, зубчастих передач та ходових коліс. Крім того, різкі кидки струму та моменту під час пуску двигуна негативно впливають на електричну мережу та знижують ресурс роботи самого електродвигуна.

Саме тому питання модернізації електроприводів кранових механізмів є надзвичайно актуальним для сучасної промисловості. Використання

новітніх засобів автоматизації дозволяє не лише підвищити надійність роботи обладнання, а й покращити енергетичні показники системи, знизити втрати електроенергії та забезпечити більш раціональне використання виробничих ресурсів. У сучасних умовах розвитку цифрових технологій реконструкція електроприводів стає важливою складовою процесу технічного переоснащення металургійних підприємств.

Тема даної роботи присвячена реконструкції електропривода механізму пересування візка допоміжних підйомів заливочного крана шляхом заміни релейно-контактних елементів системи керування асинхронним двигуном з фазним ротором та реостатним регулюванням на сучасні безконтактні пристрої. У роботі передбачено використання програмованого логічного контролера, твердотільних реле та сучасних засобів керування, що дозволяють забезпечити більш ефективну та надійну роботу електропривода.

Для дослідження роботи модернізованої системи застосовуються математичні методи аналізу та спеціалізовані програмні середовища моделювання. За допомогою комп’ютерного моделювання досліджуються перехідні процеси під час пуску асинхронного двигуна з фазним ротором, аналізуються зміни механічних характеристик, струмів, швидкостей та електромагнітного моменту. Проведення такого аналізу дозволяє оцінити ефективність запропонованої реконструкції, визначити оптимальні режими роботи електропривода та підтвердити доцільність використання безконтактних систем керування в умовах металургійного виробництва.

1 Аналіз технологічного процесу, ланкою якого є електропривод механізму пересування візка допоміжних підйомів заливочного мостового крана

1.1 Дослідження технологічного процесу роботи заливочного мостового крана та ролі електропривода механізму пересування візка допоміжних підйомів

Заливочний кран працює в надзвичайно складних та напружених умовах металургійного виробництва, де на всі елементи обладнання постійно впливають високі температури навколишнього середовища, інтенсивне теплове випромінювання від розпеченого металу, пил, вібрації та значні динамічні навантаження. Робота такого крану безпосередньо пов’язана з транспортуванням рідкого металу, температура якого може досягати тисяч градусів, тому до конструкції механізмів, електроприводів та систем керування висуваються підвищені вимоги щодо надійності, безпеки та стійкості до несприятливих виробничих факторів.

У процесі експлуатації заливочний кран постійно перебуває у зоні впливу теплового випромінювання від ковшів із розплавленим металом, нагрітих металевих конструкцій та технологічного обладнання цеху. Значне теплове навантаження негативно впливає не лише на механічні вузли крана, а й на електрообладнання, ізоляцію кабелів, контакти електричних апаратів та елементи системи керування. Саме тому при проектуванні й модернізації подібних механізмів особлива увага приділяється питанням теплового захисту та забезпечення стабільної роботи обладнання в умовах високих температур.

Кабіна керування краном повинна бути надійно теплоізольованою для створення безпечних і комфортних умов праці машиніста. Висока температура навколишнього середовища, яка характерна для металургійних цехів, може викликати швидку втому оператора, погіршення концентрації

уваги та зниження точності керування механізмами. Для підтримання нормальних умов роботи у кабіні встановлюються системи кондиціонування та вентиляції повітря, які дозволяють підтримувати допустимий температурний режим і забезпечують циркуляцію очищеного повітря. Крім цього, кабіна обладнується теплозахисними екранами, спеціальними склопакетами та системами шумоізоляції, що дозволяє зменшити негативний вплив виробничого середовища на оператора.

Робота заливочного крана має чітко виражений циклічний характер. Кожний виробничий цикл пов’язаний із виконанням певної послідовності операцій: підйомом ковша або вантажу, переміщенням його у задану точку, точним позиціонуванням, опусканням та поверненням механізмів у початкове положення для виконання наступного циклу. Такий режим роботи вимагає від електропривода високої точності, плавності та здатності витримувати значні пускові навантаження при частих повторних вмиканнях.

Під час виконання кожного циклу механізми крана працюють у різних режимах навантаження. Процес руху складається з етапів розгону, усталеного руху та гальмування. На стадії розгону електропривод повинен забезпечити достатній пусковий момент для плавного приведення механізму в рух без ривків та ударних навантажень. У період усталеного руху необхідно підтримувати стабільну швидкість переміщення вантажу, забезпечуючи точність транспортування та безпеку технологічного процесу. Під час гальмування особливе значення має плавне зниження швидкості без виникнення різких динамічних навантажень, які можуть негативно впливати на металоконструкції крана, редуктори, муфти та ходові механізми.

Особливістю роботи механізму пересування візка допоміжних підйомів є часті пуски та реверси, що супроводжуються значними змінами електромагнітного моменту та струму двигуна. У таких умовах традиційні релейно-контакторні системи керування працюють із підвищеним зношуванням, оскільки контакти апаратури постійно піддаються електричним дугам, механічним ударам та тепловим перевантаженням. Це

призводить до поступового погіршення якості комутації, виникнення несправностей і збільшення витрат на технічне обслуговування обладнання.

Не менш важливим фактором є значні інерційні навантаження, які виникають під час переміщення вантажів великої маси. У процесі розгону або гальмування в механічних передачах і металоконструкціях можуть виникати пружні коливання та динамічні удари. Якщо система керування не забезпечує плавного регулювання моменту електродвигуна, це може призводити до перевантаження елементів кінематичної схеми, прискореного зношування обладнання та навіть аварійних ситуацій.

У сучасних умовах експлуатації до електроприводів заливочних кранів висуваються підвищені вимоги щодо енергоефективності та економічності роботи. Часті пуски двигунів супроводжуються значними втратами електроенергії та кидками струму, що негативно впливає як на сам електропривод, так і на електричну мережу підприємства. Саме тому важливим напрямом модернізації кранового обладнання є впровадження сучасних систем безконтактного керування, які дозволяють оптимізувати режими роботи двигуна, зменшити енергетичні втрати та підвищити загальну ефективність технологічного процесу.

Таким чином, заливочний мостовий кран є складним електромеханічним комплексом, робота якого відбувається у важких виробничих умовах та супроводжується значними динамічними й тепловими навантаженнями. Надійність функціонування його електроприводів безпосередньо впливає на безперервність технологічного процесу металургійного виробництва, продуктивність цеху та безпеку праці персоналу. Саме тому питання вдосконалення систем керування електроприводами, підвищення їхньої надійності та енергоефективності є важливим і актуальним завданням сучасної електротехніки та промислової автоматизації.

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

1.2.1 Основні технічні параметри заливочного крану

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 вантажопідйомною машиною, вантажопідйомним органом якої служить крюк. Переміщаючись по підкранових шляхах, розташованих вище за рівень підлоги, кран забезпечує переміщення вантажу в трьох взаємно перпендикулярних напрямах. На кранах даного типу можуть встановлюватися декілька видів візків і кабін, що відрізняються один від одного кількістю і розташуванням механізмів і апаратів.

На рисунку 1 зображено загальний вид заливочного крана.



Рисунок 1.1 – Загальний вид заливочного крана



Рисунок 1.2 – Вилив сталі за допомогою заливочного крана



Рисунок 1.3 – Вилив сталі в ізложниці за допомогою заливочного крана



Рисунок 1.4– Загальний вид металургійного цеху з роботою 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 візка	MTF-311-6	1	27	945	30,5	79	172	32
Пересування крана	MTF-411-6	4	22	965	55	60	235	65
Пересування головного візка	MTH-414-6	1	45	960	33	42	186	43
Допоміжний підйом	MTH-612-10		60	565	145	154	248	320

1.2.2. Опис електричної принципової схеми електропривода механізму пересування візка заливочного крана

Управління механізмом пересування візка здійснюється за схемою наведеною на рисунках А1 та А2 додатку А. Схема передбачає управління двигуном потужністю при ТВ 40% 27 кВт.

Живлення до електродвигуна механізму пересування візка М5 здійснюється гнучким кабелем. Для живлення сигналізації (світлової і звукової) і освітлення кабіни передбачений знижувальний трансформатор TV1 (380/12В).

Для пересування вперед необхідно рукоятку контролера SA2 перевести в перше положення «вперед». При цьому замкнуться контакти контролера SA2.1 і SA2.5. Напруга подається на обмотки статора електродвигуна М5. Одночасно отримує живлення електродвигун гідроштовхача М6, який підключений паралельно статору.

Ротор електродвигуна М5 розгальмовується і починає обертатися. Всі контакти контролера в колі ротора розімкнені. Відбувається плавне рушання механізму, 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 «Вперед». При цьому додатково до контактів 1 і 5 контролера SA2 замикається контакт SA2.2, 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 «Вперед» додатково замикається контакт контролера SA2.4, який шунтує ступінь R4 (5-6) пускового резистора. Еквівалентний опір в колі ротора електродвигуна М5 зменшується.

Електродвигун переходить працювати на другу штучну характеристику. Швидкість пересування зростає. У четвертому положенні рукоятки контролера додатково замикається контакт SA2.6. В результаті шунтується ступінь R4 (2-3) пускового резистора.

Двигун переходить працювати на третю штучну характеристику. При переведенні рукоятки контролера в п'яте положення «вперед» замикається контакт SA2.8, внаслідок чого шунтується ступінь R4 (7-6) пускового резистора. Двигун переходить працювати на четвертую штучну характеристику.

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

Зупинка електродвигуна здійснюється переведенням рукоятки контролера SA2 в нульове положення. У послідовності зворотною пуску в коло резистора вводяться ступені пускового резистора R4. Розмикаються всі контакти контролера. Відключається обмотка статора електродвигуна М5 від мережі. Одночасно відключається електродвигун М6 гідроштовхальника гальма. Гальмівні колодки електрогідравлічного гальма загальмовують ротор електродвигуна М5. Для пересування назад рукоятка контролера SA2 плавно з нульового положення переводиться в положення п'ять «Назад».

При цьому замикаються контакти SA2.3 і SA2.7 контролера SA2, міняючи чергування підключення фаз статора до мережі. Пускові ступені резистора R4 в роторному колі вводяться в тій же послідовності, що і при пуску електродвигуна на рух «Вперед» [2].

1.3 Основні шляхи реконструкції електропривода механізму пересування допоміжного візка заливочного крану та формування вихідних даних

Механізм пересування візка допоміжних підйомів заливочного крану приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю 27 кВт. Двигун керується блоками (шафами) пускачів, реостатів та контакторів. Проект реконструкції полягає в заміни релейно–контактних елементів системи керування асинхронного 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 кваліфікаційній роботі бакалавра ставиться задача розробки електропривода змінного струму по системі асинхронний двигун з фазним ротором з керуванням за допомогою програмованого логічного контролера [3], яка в наш час найбільш широко використовується через її безсумнівні переваги.

2 РЕКОНСТРУКЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА БЕЗКОНТАКТНІ

2.1 Вибір потужності електродвигуна пересування візка заливочного крану

Вихідні дані для розрахунку [2]: вага вантажу − $G_в$=98000 Н ; висота підйому вантажу − Н = 24 м; швидкість підйому вантажу − $V_В$ = 0,15 м/с; швидкість пересування допоміжного візка $V_в$ = 0,62 м/с; вага траверси − $G_{тр}$ = 9,6 т; вага канатів − $G_к$ =1,6 т; вага допоміжного візка − $G_В$ = 64 т; вага допоміжного візка з обладнанням $G_{Вх}$=736960Н; радіус колеса − R_k=400мм; діаметр цапфи колеса − d=200 мм; діаметр ходових коліс допоміжного візка − D_k=400мм; середнє значення прискорення візків кранів − а=0,1м/с^2; ККД механізму пересування допоміжного візка без вантажу − ηм=0,78; коефіцієнт, що враховує вплив мас приводу − β=1,15...1,25; маховий момент ротора двигуна − $(mD^2)_Д$ =2 кгм^2; маховий момент сполучної муфти $(mD^2)_М$ =0,21 кгм^2; маховий момент гальмівного шківа − $(mD^2)_Т$ =0,3 кгм^2.

Візок має вісім ходових колес, з них чотири приводні колеса. Механізм пересування виконується з центральним приводом. Кінематична схема такого механізму представлена на рисунку 2.1.

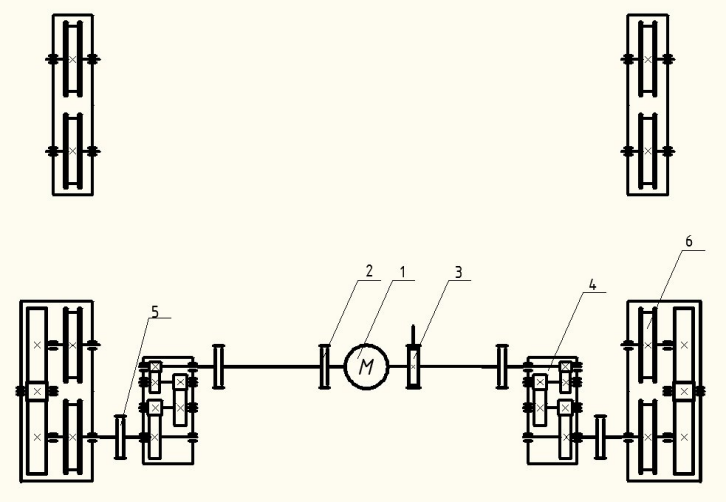


Рисунок 2.1 – Схема кінематична механізму пересування допоміжного

візка заливочного крану: 1- електродвигун; 2 – зубчаста муфта типу МЗ; 3 – гальмо; 4 – редуктор; 5 – зубчаста муфта типу МЗП; 6 – ходове колесо.

В приводі пересування допоміжного візка використано чотири колеса К2Р-800х150 [2] рейки КР100 [2].

Навантаження на одне ведуче колесо за умови рівномірного розподілу навантаження між всіма чотирма ходовими колесами [5]:

$$P_к = \frac{G_{тх}+G_г}{4} = \frac{736960+980000}{4} = 429240\ Н \qquad (2.1)$$

$$G_{тх} = G_{тел} + G_{тр} + G_{кан} = (64 + 9{,}6 + 1{,}6) * 9{,}8 = 736{,}96\ кН \qquad (2.2)$$

Розрахункове навантаження на колесо [6]:

$$P_р = k_1 \cdot \gamma \cdot P_к = 1{,}2 \cdot 0{,}8 \cdot 429240 = 412070\ Н \qquad (2.3)$$

де $k_1 = 1{,}2$ - коефіцієнт, що враховує режим роботи механізму для режиму М6 [6]; g - коефіцієнт, що враховує змінність навантаження [4]:

(2.4)

Колеса випробовують напругу зминання при лінійному контакті, яка розраховуються по формулі [6]:

$$\sigma_{см} = 0{,}418 \cdot \sqrt{\frac{P_р \cdot E_{пр}}{b \cdot R_к}} \le [\sigma_{см}] \qquad (2.5)$$

де $R_к = 400 мм$ – радіус колеса; $E_{пр} = 2{,}1 \cdot 10^5\ МПа$ – приведений модуль пружності для сталевої рейки і колеса; b=84 мм – робоча ширина плоскої рейки;

$$\sigma_{см} = 0{,}418 \cdot \sqrt{\frac{412070 \cdot 2{,}1 \cdot 10^{11}}{0{,}084 \cdot 0{,}4}} = 670 \cdot 10^6\ Па \le 850 \cdot 10^6\ Па \qquad (2.6)$$

Статичне зусилля розраховано за формулою [4]:

$$F_{ст} = \left(G_{гр} + G_{тх}\right) \cdot \left(\frac{f \cdot d + 2 \cdot m}{D_к} \cdot k_р + a\right), \quad (2.7)$$

де $f = 0{,}015$ - коефіцієнт тертя в підшипниках коліс (підшипники кочення кулькові однорядні) [6]; $m = 0{,}12$ см $= 1{,}2$мм - коефіцієнт тертя кочення колеса по рейці з опуклою головкою [6]; $k_р = 2{,}5$ - коефіцієнт, що враховує опір від тертя реборд коліс об рейки і від тертя струмознімачів об тролеї [6]; $a = 0{,}002$ - розрахунковий ухил підвізочного шляху [6];

(2.8)

Двигун механізму пересування допоміжного візка вибирається за пусковим моментом. Значення пускового моменту має бути таким, при якому відсутня пробуксовка ведучих коліс ненавантаженого допоміжного візка крана по рейках, а коефіцієнт запасу має бути не менше 1,2 [4].

Опір пересуванню завантаженого крана в пусковий період [4]:

$$F_п = F_{ст} + (1{,}1 \ldots 1{,}3) \cdot \frac{G_{гр} + G_{тх}}{g} \cdot a = 72733 + 1{,}2 \cdot \frac{980000 + 736960}{9{,}8} \cdot 0{,}1 = 53431{,}62\ H$$

(2.9)

Потужність заздалегідь вибираного двигуна з урахуванням інерційних навантажень [4]:

$$P_Р = \frac{F_п \cdot V_в}{1000 \cdot h_М \cdot y_{сер}} \quad (2.10)$$

$h_М = 0{,}85$ - орієнтовне значення ККД механізму пересування моста

крана; $у_{сер} = 1,5...1,7$ - середня кратність пускового моменту для асинхронного двигуна змінного струму з фазним ротором [7].

$$P_P = \frac{53431,62 \cdot 0,62}{1000 \cdot 0,85 \cdot 1,6} = 24,36 кВт \quad (2.11)$$

По каталогу [7] заздалегідь обираємо електродвигун МТН-414-6 з потужністю на валу Рдв=27 кВт при ТВ=25%. Частота обертання n=960 об/хв. Маховий момент ротора кгм^2. Максимальний обертаючий момент, який розвивається двигуном $M_{n.max} = 650$ *Нм*.

Номінальний момент електродвигуна [5]:

$$M_н = 9550 \cdot \frac{P_{дв}}{n} = 9550 \cdot \frac{27}{960} = 268,59 Нм \quad (2.12)$$

Коефіцієнт перевантаження:

$$\psi_{max} = \frac{M_{n\,max}}{M_н} = \frac{650}{268,59} = 2,42 \quad (2.13)$$

Частоту обертання колеса визначаємо по формулі [6]:

$$n_к = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 0,62}{3,14 \cdot 0,8} = 14,8 \text{ об/хв} \quad (2.14)$$

Розрахункове передавальне число редуктора:

$$u = \frac{n_{дв}}{n_к} = \frac{690}{14,8} = 64,86 \quad (2.15)$$

В приводі пересування допоміжного візка застосовано редуктор типу

ВКУ-765М-63-12 і ВКУ-765М-63-21 (передатне число 63); $n_{ред} = 1000$ об/хв; $P_{ред}$=35,5 кВт; $M^{max}_{ред.вх} = 14900$ *Нм*.[2].

Фактична частота обертання колеса:

$$n_{к.ф.} = \frac{n_{дв}}{u_р} = \frac{360}{63} = 15{,}23 \text{ об/хв} \tag{2.16}$$

Фактична швидкість пересування крана з номінальним вантажем [5]:

$$V_{т.ф.} = \pi \cdot D_к \cdot \frac{n_{к.ф.}}{60} = 3{,}14 \cdot 0{,}8 \cdot \frac{15{,}23}{60} = 0{,}637 \text{ м/с} \tag{2.17}$$

Відхилення фактичної швидкості від заданої:

$$\Delta V = \frac{V_{т.} - V_{т.ф.}}{V_{т.}} \cdot 100\% = \frac{0{,}62 - 0{,}637}{0{,}62} \cdot 100\% = 2{,}7\ \% \le 5\% \tag{2.18}$$

Статичний момент опору пересуванню ненавантаженого допоміжного візка, приведений до валу двигуна, розраховується по [6]:

$$M_{ст.пх} = \frac{F_{ст.пх} \cdot D_к}{2 \cdot u_р \cdot \eta_м} = \frac{13910 \cdot 0{,}8}{2 \cdot 63 \cdot 0{,}78} = 113{,}23 \text{ Нм} \tag{2.19}$$

$$F_{ст.пх} = G_{тх} = 736960 \cdot \left[\frac{0{,}015 \cdot 200 + 2 \cdot 1{,}2}{800} \cdot 2{,}5 + 0{,}002 \right] = 13910{,}12 \text{ Н}$$

Середній коефіцієнт перевантаження двигуна [6]:

$$\psi_{ср} = 0{,}5 \cdot (\psi_{max} + \psi_{min}) = 0{,}5\,(2{,}42 + 1{,}1) = 1{,}76 \tag{2.20}$$

Середній пусковий момент заздалегідь обраного двигуна:

$$M_{п.ср} = \psi_{ср} \cdot M_н = 1{,}76 \cdot 268{,}59 = 472{,}72\ Нм \qquad (2.21)$$

Час пуску двигуна з ненавантаженим допоміжним візком [4]:

$$t_{пх} = \frac{1}{M_{п.ср.} - M_{ст.пх}} \left(\frac{m_{тх} \cdot D^2_к \cdot n_{дв}}{38{,}2 \cdot u^2_р \eta_м} + \beta \cdot \frac{\left(mD^2\right)_1 \cdot n_{дв}}{38{,}2} \right) =$$

$$\frac{1}{472{,}72 - 113{,}23} \left(\frac{75200 \cdot 0{,}8^2 \cdot 960}{38{,}2 \cdot 63^2 \cdot 0{,}78} + 1{,}2 \frac{5{,}02 \cdot 960}{38{,}2} \right) = 1{,}51\ с \qquad (2.22)$$

де $m_{тх} = \frac{G_{тх}}{10}$; $(mD^2)_1$,кгм^2 - маховий момент мас, що обертаються, розташованих на валу двигуна;

$$(mD^2)1 = (mD^2)_Д + (mD^2)_М + (mD^2)_Т = 2(2 + 0{,}21 + 0{,}3) = 5{,}02\ кгм^2 \qquad (2.23)$$

Фактичний коефіцієнт запасу зчеплення приводних коліс з рейками [4]:

$$k_{сц} = \frac{G_{сц} \cdot \varphi}{F_{ст.х.} + G_т \left(\frac{V_{т.ф.}}{t_{фпх} \cdot g} - \frac{n_{пр}}{n_к} \cdot \frac{f \cdot d}{D_к} \right)} = \frac{368480 \cdot 0{,}2}{13910{,}12 + 627200 \cdot \left(\frac{0{,}637}{1{,}51 \cdot 9{,}8} - \frac{2}{4} \cdot \frac{0{,}015 \cdot 200}{800} \right)} = 1{,}85 \qquad (2.24)$$

де

$$F_{ст.х.} = G_{тх} = 736960 \cdot \left[\frac{0{,}015 \cdot 200 + 2 \cdot 1{,}2}{800} \cdot 2{,}5 + 0{,}002 \right]$$
$$= 13910{,}12\ Н$$

- статичний опір пересуванню ненавантаженого допоміжного візка.

Умова по величині коефіцієнта зчеплення виконується.

Статичний момент опору пересуванню завантаженого допоміжного візка, приведений до валу двигуна, розраховується по [6]:

$$M_{ст.пг} = \frac{F_{ст.пг} \cdot D_к}{2 \cdot u_р \cdot \eta_м} = \frac{3240{,}62 \cdot 0{,}8}{2 \cdot 63 \cdot 0{,}78} = 263{,}8\ Нм \qquad (2.25)$$

$$F_{ст.пг} = G_г + G_{тх} = (980000 + 736960) \cdot \left[\frac{0{,}015 \cdot 200 + 2 \cdot 1{,}2}{800} \cdot 2{,}5 + 0{,}002\right] = 32407{,}62\ Н$$

Час пуску двигуна [5]:

$$t_{пг} = \frac{1}{M_{п.ср.} - M_{ст.пг}} \left(\frac{(m_{гр} + m_{тх}) \cdot D^2_к \cdot n_{дв}}{38{,}2 \cdot u^2_р \eta_м} + \beta \cdot \frac{\left(mD^2\right)_1 \cdot n_{дв}}{38{,}2} \right) =$$

$$= \frac{1}{472{,}72 - 263{,}8} \left(\frac{175200 \cdot 0{,}8^2 \cdot 960}{38{,}2 \cdot 63^2 \cdot 0{,}85} + 1{,}2 \frac{5{,}02 \cdot 960}{38{,}2} \right) = 4{,}7\ с \quad (2.26)$$

Прискорення при пуску завантаженого допоміжного візка [6]:

$$a_п = \frac{V_{т.ф}}{t_{пг}} = \frac{0{,}637}{4{,}71} = 0{,}13\ м/с^2 \qquad (2.27)$$

Для забезпечення $[a] = 0{,}1\ м/с^2$ час пуску необхідно збільшити до $t_{пг} = 6{,}37\ с$, тоді:

$$a_п = \frac{0{,}637}{6{,}37} = 0{,}1\ м/с^2$$

Час гальмування допоміжного візка без вантажу, виходячи з максимально допустимого прискорення [4]:

$$t_Т = \frac{V_{т.ф.}}{a_Т} = \frac{0{,}637}{0{,}1} = 6{,}37\ с \qquad (2.28)$$

Статичний момент опору пересуванню, приведений до валу двигуна при гальмуванні ненавантаженого допоміжного візка [5]:

$$M_{ст.тх} = \frac{F_{ст.тх} \cdot D_к \cdot \eta_м}{2 \cdot u_р} = \frac{15107{,}68 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}78}{2 \cdot 63} = 74{,}82\ Нм \qquad (2.29)$$

Опір пересуванню ненавантаженого допоміжного візка при гальмуванні:

$$F_{ст.тх} = G_{тх} = 736960 \cdot \left[\frac{0{,}015 \cdot 200 + 2 \cdot 1{,}2}{800} \cdot 2{,}5 - 0{,}002\right] = 15107{,}68\ Н \qquad (2.30)$$

Гальмівний момент дорівнює:

$$M_Т = \frac{m_{тх} \cdot D^2_к \cdot n_{дв} \cdot \eta_м}{38{,}2 \cdot u^2_р \cdot t_т} + \beta \cdot \frac{\left(mD^2\right)_1 \cdot n_{дв}}{38{,}2 \cdot t_т} - M_{ст.тх.} = \frac{75200 \cdot 0{,}8^2 \cdot 960 \cdot 0{,}78}{38{,}2 \cdot 63^2 \cdot 6{,}37} + 1{,}2\frac{5{,}02 \cdot 690}{38{,}2 \cdot 6{,}37} - 74{,}82 = 54{,}39\ Нм \quad (2.31)$$

Приймаємо гальмо колодки типу ТКТ-200 з максимальним гальмівним моментом 160 Нм і діаметром гальмівного шківа 200 мм; $mD^2 = 0{,}3\ кг \cdot м^2$

Опір пересуванню завантаженого допоміжного візка при гальмуванні:

$$F_{ст.тг} = G_г + G_{тх} = (980000 + 736960) \cdot \left[\frac{0{,}015 \cdot 200 + 2 \cdot 1{,}2}{800} \cdot 2{,}5 - 0{,}002\right] = 25539{,}78\ Н \quad (2.32)$$

Статичний момент опору пересуванню, приведений до валу двигуна при гальмуванні завантаженого допоміжного візка [6]:

$$M_{ст.тг} = \frac{F_{ст.тг} \cdot D_к \cdot \eta_м}{2 \cdot u_р} = \frac{25539{,}78 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}85}{2 \cdot 63} = 137{,}83\ Нм \quad (2.33)$$

Час гальмування завантаженого допоміжного візка [6]:

$$t_{пг} = \frac{1}{M_т + M_{ст.тг}}\left(\frac{m_{гр} + m_{тх}\cdot D^2{}_к \cdot n_{дв}\cdot \eta_м}{38{,}2\cdot u^2{}_р} + \beta\cdot \frac{\left(mD^2\right)_1 \cdot n_{дв}}{38{,}2}\right) =$$

$$= \frac{1}{54{,}39 + 137}\left(\frac{175200\cdot 0{,}8^2\cdot 960\cdot 0{,}85}{38{,}2\cdot 63^2} + 1{,}2\frac{5{,}02\cdot 960}{38{,}2}\right) = 3{,}93 \ \ с$$

Прискорення при гальмуванні завантаженого допоміжного візка:

$$a_т = \frac{V_{т.ф.}}{t_{тг}} = \frac{0{,}637}{3{,}93} = 0{,}16 \ \ м/с^2 \approx [a] = 0{,}1 \ м/с^2 \qquad (2.34)$$

що допустимо.

2.2 Реконструкція електроприводу шляхом заміни релейно-контактних елементів на безконтактні

2.2.1 Початкова релейно-контактна схема і вимоги до реконструкції

Загальна схема управління краном приведена на листах графічної частини проекту. На рисунку А1 додатку А показаний фрагмент силової схеми живлення приводу механізму пересування допоміжного візка. На рисунку А2 додатку А наведено схема кіл управління краном. Специфікація апаратів і пристроїв приведена в таблиці. А.1 додатку А.

В схемі управління краном і, зокрема, управління приводом пересування, реалізовані наступні функції:

Захист від короткого замикання по колах управління реалізується за допомогою запобіжників FU1, FU2. Захист від мимовільного запуску (нульовий захист). Живлення лінійного контактора КМ1 подається через нормально закриті контакти SA1.12, SA2.12, SA3.12, коло організовується у разі, коли всі три командоконтролери (підйому, переміщення моста, переміщення допоміжного візка) встановлено в нульове положення.

Обмеження переміщень підйому в межах робочої зони − реалізується за допомогою кінцевого вимикача SQ1. Нормально закритий контакт вимикача введений в коло живлення лінійного контактора КМ1.

Вибір напряму руху здійснюється зміною порядку чергування фаз живлення приводного двигуна. Перемикання проводиться безпосередньо по колах командоконтролера SA2 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.

2.2.2 Технічне рішення щодо реконструкції

Для підвищення надійності роботи приводу застосуємо безконактне реле (твердотільне реле) і програмований логічний контроллер. Крім того, для підвищення комфорту управління замінимо командоконтролер джойстиком з дискретними виходами [9,10].

2.2.2.1 Джойстик

Командоконтролер, що було використано, в початковій схемі здійснює безпосередню комутацію силових кіл. Необхідність комутації великих струмів обумовлює відповідні габарити контактів, зусилля пружин і, таким чином, від оператора потрібні значні зусилля для перемикання ступенів.

Тому застосуємо орган управління нового покоління − джойстик, призначений для комутації слабкострумових кіл. Застосуємо одноосьовий командоконтролер S14 (джойстикового типу) фірми Gessman [11] Контролер S14 має 5 положень и 14 контактів, тому він без принципових змін може бути інтегрований в існуючу систему управління.

Для сполучення джойстика з системою управління застосуємо твердотільні реле і ПЛК [10].

2.2.2.2 Твердотільне реле

Твердотільним реле є напівпровідниковий пристрій, призначений для безконтактної комутації електричних кіл. Виберемо твердотільні реле серії SSRP виробництва Schneider Electric типу SSRPP8S125A3 [12]

2.2.2.3 Програмований логічний контролер (ПЛК)

Для реконструкції релейно-контактної схеми було прийнято рішення використовувати програмований модуль − Zelio компанії SchneiderElectric, фірми Telemecanique [13]. У даній роботі використана програмна оболонка ZelioSoft 2, яка дозволяє написати необхідну програму за допомогою ПК (персонального компьютера), без наявності самого модуля, а також завантажити написану програму в програмований модуль Zelio, у якому передбачена можливість підключення ПК.

Технічні характеристики моделі SR3B261BD на 26 входів/виходів представлені в таблиці 2.1, а блоку розширення SR3XT43BD − таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 − Технічні характеристики SR3B261BD

Кількість входів/виходів	26
Кількість дискретних входів	10(6)
Кількість «релейних» або «транзисторних» виходів	10
Напруга живлення	– 24 В
Годинник	Є
Дисплей і кнопки програмування	Є

Таблиця 2.2 − Блок розширення SR3XT43BD

Кількість аналогових 10−бітових входів	2
Кількість аналогових 10−бітових виходів	2

На рисунку А3 додатку А показана модернізована схема управління механізмом, що включає ПЛК і твердотільні реле.

Контакти командоконтролера SA1 підключаються до дискретних входів ПЛК Зеліо. До кожного виходу ПЛК підключений модуль твердотільного реле SSR. Вихідні кола твердотільних реле включені в початкову схему крана, нумерація клем збережена.

На рисунку А.4 додатку А показаний лістинг програми ПЛК на мові сходових діаграм.

Для більшої зручності модернізації в програмі збережена нумерація контактів релейних входів і виходів. Для підвищення плавності комутації, в колі релейних виходів, що керують шунтуванням ступенів, введені проміжні програмні реле часу.

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 виду [14,15] :

$$\begin{cases} u_{1a} = R_1 i_{1a} + \dfrac{d\psi_{1a}}{dt}; \quad u_{1b} = R_1 i_{1b} + \dfrac{d\psi_{1b}}{dt} \\ u_{2a} = R_2' i_{2a} + \dfrac{d\psi_{2a}}{dt} + \omega_r p_n \psi_{2b}; \quad u_{2b} = R_2' i_{2b} + \dfrac{d\psi_{2b}}{dt} - \omega_r p_n \psi_{2a}, \end{cases} \tag{2.35}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_s (\psi_{1b}\psi_{2a} - \psi_{1a}\psi_{2b}), \quad k_s = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}. \tag{2.36}$$

$$\omega_0 = 2 \times \pi \times f_n \text{ Equation.3} \ .$$

(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.

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

Проведемо розрахунки щодо реостатного пуску АД з фазним ротором номінальні параметри якого беремо з [7].

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:

$$u_{1a} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi); \; u_{1b} = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad \text{Equation.3}$$

(2.40)

Розрахунки необхідних параметрів для моделювання перехідних процесів реостатного пуску асинхронного двигуна зведемо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 − Розрахунки необхідних параметрів для моделювання перехідних процесів реостатного пуску асинхронного двигуна

Параметр	Позначення / Формула	Значення
1	2	3
Номінальна фазна напруга, В	$U_{фн}$	220
Частота мережі живлення, Гц	f	50
Номінальна потужність двигуна, кВт	P_{2n}	27
Коефіцієнт корисної дії (ККД),в.о.	η	0,895
Коефіцієнт потужності,в.о.	$cos\ \varphi$	0,86
Відносний активний опір обмотки статора, в.о.	r_1*	0,028
Відносний активний опір обмотки ротора, в.о.	r_2'*	0,083

Відносний індуктивний опір обмотки статора, в.о.	x_1*	0,069
Відносний індуктивний опір обмотки ротора, в.о.	x_2*	0,071
Відносний індуктивний опір кола намагнічення, в.о.	x_μ'*	2,8
Номінальне ковзання, %	*Sn*	3
Номінальний струм, А	$I_{1ф} = \frac{P_n}{3U_{фн} \eta_н \cos f_н}$ Equation.3	53,149
Абсолютне значення активного опору обмотки статора, Ом	$R_1 = r_1^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}$ Equation.3	0,116
Абсолютне значення активного опору обмотки ротора, Ом	$R_2 = r'_2{}^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}$; Equation.3	0,132
Абсолютне значення індуктивного опору обмотки статора, Ом	$X_1 = X_1^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}$; Equation.3	0,286
Абсолютне значення індуктивного опору обмотки ротора, Ом	$X'_2 = X'_2{}^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}$; Equation.3	0,383
Абсолютне значення індуктивного опору вітки намагнічення, Ом	$X_m = X_m^* \times \frac{U_{1номф}}{I_{1ф}}$. Equation.3	11,59
Співвідношення піків моментів до моменту перемикання:	$\lambda = \sqrt[5]{\frac{M_{пот}}{s_n M_1}}$. *EQUATION.3*	1,669
Номінальний момент, Н	$M_н = \frac{3R_2'}{s_n \omega_c} \times \frac{U^2_{фн}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s_n})^2 + (X_1 + X_2')^2}$.	292,019

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
Критичний момент, Н	$M_{KP} = \frac{3}{2 \cdot \omega_c} \cdot \frac{U^2_{фн}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$.	884,091
Момент перемикання п'ятиступеневого пуску, Н	$M_1=0,85M_{Kp}$	751,477
Момент перемикання п'ятиступеневого пуску , Н	$M_2=M_1/\lambda$	450,23
Опір першої ступені, R_1, Ом	$R_1 = R'_2 \cdot$	0,221
Опір другої ступені R_2, Ом	$R_2 = R_1 \cdot$	0,369
Опір третьої ступені R_3, Ом	$R_3 = R_2 \cdot$	0,616
Опір четвертої ступені R_4, Ом	$R_4 = R_3 \cdot (l$	1,028
Опір п'ятої ступені R_5, Ом	$R_5 = R_4 \cdot (l$	1,716
Швидкість двигуна, при якій необхідно виводити відповідний додатковий опір, тобто переходити від однієї штучної характеристики двигуна до іншої:		
ω_1, c^{-1}	$\omega_1 = \frac{p \cdot n_c \cdot (1 - s_1 \cdot \frac{R_1}{R_2'})}{30}$;	96,653
ω_2, c^{-1}	$\omega_2 = \frac{p \cdot n_c \cdot (1 - s_1 \cdot \frac{R_2}{R_2'})}{30}$;	91,226
ω_3, c^{-1}	$\omega_3 = \frac{p \cdot n_c \cdot (1 - s_1 \cdot \frac{R_3}{R_2'})}{30}$;	82,198
ω_4, c^{-1}	$\omega_4 = \frac{p \cdot n_c \cdot (1 - s_1 \cdot \frac{R_4}{R_2'})}{30}$;	67,129
ω_5, c^{-1}	$\omega_5 = \frac{p \cdot n_c \cdot (1 - s_1 \cdot \frac{R_5}{R_2'})}{30}$.	41,978
Співвідношення піків моментів до моменту перемикання для семиступеневого пуску	$l = \sqrt[7]{\frac{M_{nom}}{s_n M_1}}$. EQUATION. 3	1,442
Момент перемикання семиступеневого пуску, Н	$M_1=0,85M_{Kp}$	751,477
Момент перемикання семиступеневого пуску , Н	$M_2=M_1/\lambda$	521,202
Опір першої ступені, R_1, Ом	$R_1 = R'_2 \cdot$	0,191
Опір другої ступені R_2, Ом	$R_2 = R_1 \cdot$	0,275
Опір третьої ступені R_3, Ом	$R_3 = R_2 \cdot$	0,397
Опір четвертої ступені R_4, Ом	$R_4 = R_3 \cdot (l$	0,572

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
Опір п’ятої ступені R_5, Ом	$R_5 = R_4 \times (\quad)$	0,825
Опір шостої ступені R_6, Ом	$R_6 = R_5 \times (\quad)$	1,19
Опір сьомої ступені R_7, Ом	$R_7 = R_6 \times (\quad)$	1,716
Швидкість двигуна, при якій необхідно виводити відповідний додатковий опір, тобто переходити від однієї штучної характеристики двигуна до іншої		
ω_1, c^{-1}	$w_1 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_1}{R_2'})}{30};$	96,635
ω_2, c^{-1}	$w_2 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_2}{R_2'})}{30};$	93,063
ω_3, c^{-1}	$w_3 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_3}{R_2'})}{30};$	87,913
ω_4, c^{-1}	$w_4 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_4}{R_2'})}{30};$	80,488
ω_5, c^{-1}	$w_5 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_5}{R_2'})}{30}.$	69,782
ω_6, c^{-1}	$w_6 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_6}{R_2'})}{30}.$	54,346
ω_7, c^{-1}	$w_7 = \frac{p \times \omega_c \times (1 - s_1 \times \frac{R_7}{R_2'})}{30}.$	32,089

В додатку Б наведено програму розроблену в пакеті Mathcad 14 з реактивним моментом опору на валу M_H та початковою фазною напругою статора φ = π/2 рад. У програмі змінна "n" визначає кількість точок для побудови графіків, t_d – крок розрахунку. Графіки перехідних процесів M(t), ω(t), i_1(t) наведені на рисунках В.1–В.3 додатку В.

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

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

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

З погляду економічної ефективності, найбільш виправданим є багатоступінчатий реостатний пуск, як спосіб формування пускових режимів [18]. При дослідженні енергопроцесів проводять аналіз комплексу показників: напруги U(t), струму *I(t)* та їх добутку – потужності *P(t)*. З урахуванням сказаного отримаємо вирази для множин:

$$U(t) \in \{U_0, U_1 \ldots U_n; U_e; k_u\} = M_u \quad Equation.3 \tag{2.41}$$

$$I(t) \in \{I_0, I_1 \ldots I_m; I_e; k_I\} = M_i \quad Equation.3 \tag{2.42}$$

$$P(t) = U(t) \times I(t) \in \{P_0, P_1 \ldots P_k; P_e; k_p\} = M_p \quad Equation.3 \tag{2.43}$$

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

При цьому активна потужність:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)dt \quad \text{Equation.3}$$

(2.44)

де Т − тривалість перехідного процесу під час пуску.

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

На рисунках Е.1, Е.2 додатку Е наведено графіки функцій потужності під час пуску, які отримані за формулами (2.41–2.43) для m=5 та m=7 відповідно за допомогою програм наведених в додатках Б та Г.

Розрахунок втрат енергії при пуску АД за рік роботи при п’ятиступеневому пуску:

$$W_{m=5} = \frac{[\frac{1}{t_{nn}} \times \int_0^{t_{nn}} P(t)dt] \times Nв \times Nг \times К}{3600 \times 1000}, \qquad (2.45)$$

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

Розрахунок втрат енергії при пуску АД за рік роботи при семиступеневому пуску:

$$W_{m=7} = \frac{[\frac{1}{t_{nn}} \times \int_0^{t_{nn}} P(t)dt] \times Nв \times Nг \times К}{3600 \times 1000}. \qquad (2.46)$$

Таким чином розрахунки наведені в додатку А та В показали, що втрати енергії за рік роботи двигуна при п’ятиступеневому пуску складають 111,5 кВт·годин а при семиступеневому пуску складають 89,1 кВт·годин.

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

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Данна випускна кваліфіуаційно робота бакалавра передбачає реконструкцію електропривода механізму пересування візка 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

Природоохоронна діяльність є однією з найважливіших складових функціонування сучасного металургійного підприємства. У сучасних умовах розвитку промисловості питання екологічної безпеки набувають особливого значення, оскільки металургійне виробництво традиційно належить до галузей із підвищеним рівнем техногенного навантаження на навколишнє середовище. Саме тому підприємство приділяє значну увагу реалізації екологічної політики, спрямованої на зменшення негативного впливу виробничих процесів на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти та загальний стан довкілля.

Основною метою природоохоронної діяльності підприємства є забезпечення гармонійного поєднання виробничих інтересів із вимогами екологічної безпеки. Для цього на підприємстві впроваджуються сучасні технології, які дозволяють зменшити рівень забруднення навколишнього середовища, раціонально використовувати природні ресурси та підвищувати рівень енергоефективності виробництва. Усі екологічні заходи інтегруються у загальну стратегію розвитку підприємства та спрямовуються на поступове скорочення техногенного навантаження на довкілля.

Важливим напрямком діяльності є постійне вдосконалення виробничих процесів з метою зниження обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферу. На металургійному підприємстві здійснюється регулярна модернізація технологічного обладнання, ремонт виробничих агрегатів, газоочисних систем та вентиляційного устаткування. Особлива увага приділяється технічному стану печей, димовідвідних систем, газопроводів та очисних споруд, оскільки саме ці елементи найбільше впливають на рівень забруднення атмосферного повітря.

Для забезпечення стабільної роботи виробничого обладнання та мінімізації шкідливих викидів на підприємстві постійно проводяться планові та капітальні ремонти технологічних агрегатів. Під час ремонтів застосовуються сучасні вогнетривкі матеріали, новітні методи футерування та ущільнення конструкцій, що дозволяє зменшити втрати тепла, підвищити герметичність обладнання та знизити рівень викидів пилу й газів у навколишнє середовище. Крім того, виконуються роботи з відновлення газоповітряних систем, ремонту клапанів, ущільнювальних елементів, димовідвідної арматури та інших вузлів, які безпосередньо впливають на екологічні показники виробництва.

Одним із важливих напрямків природоохоронної діяльності є впровадження сучасних систем очищення газів та пиловловлювання. Для зменшення запиленості повітря на підприємстві використовуються аспіраційні установки, системи газоочищення та пиловловлювачі, які забезпечують очищення технологічних газів перед їх викидом в атмосферу. Постійно здійснюється контроль ефективності роботи очисного обладнання, проводяться його профілактичні огляди та технічне обслуговування.

Суттєве значення для екологічної безпеки підприємства має забезпечення готовності до можливих аварійних та надзвичайних ситуацій. На підприємстві розроблені спеціальні плани реагування на аварії, які можуть супроводжуватися витоками небезпечних речовин, загораннями або іншими подіями, що здатні негативно впливати на довкілля. Проводяться регулярні навчання персоналу, перевіряється справність засобів аварійного захисту та систем оповіщення. Завдяки цьому забезпечується оперативне реагування на можливі надзвичайні ситуації та мінімізація їх наслідків.

Особливе місце у діяльності підприємства займають заходи з енергозбереження та підвищення енергоефективності виробництва. Зростання вартості енергетичних ресурсів та значна енергоємність металургійних процесів вимагають впровадження сучасних технічних рішень, спрямованих на скорочення споживання електроенергії, природного

газу та інших видів палива. Для цього на виробничому обладнанні впроваджуються частотно-регульовані електроприводи, енергоощадні електродвигуни, автоматизовані системи керування технологічними процесами та сучасні засоби обліку енергоресурсів.

Використання частотних перетворювачів на електроприводах вентиляторів, насосів та інших механізмів дозволяє значно знизити споживання електроенергії та забезпечити більш раціональне використання обладнання. Крім економічного ефекту, це також сприяє зменшенню навантаження на енергетичні системи підприємства та скороченню непрямих викидів забруднюючих речовин, пов’язаних із виробництвом електроенергії.

Важливим напрямком екологічної діяльності є організація ефективної системи поводження з промисловими відходами. Підприємство здійснює постійний контроль за утворенням, накопиченням, транспортуванням та утилізацією відходів виробництва. Значна увага приділяється повторному використанню вторинних ресурсів, що дозволяє зменшити кількість відходів, скоротити витрати природної сировини та знизити навантаження на навколишнє середовище. Частина виробничих відходів використовується повторно у технологічних процесах або передається спеціалізованим організаціям для подальшої переробки.

У сфері водогосподарської діяльності підприємство використовує замкнуті або оборотні цикли водопостачання, що дозволяє суттєво скоротити споживання природних водних ресурсів. Промислові стічні води проходять очищення на спеціальних очисних спорудах, після чого повторно використовуються у виробничих процесах. Це сприяє зменшенню скидів забруднених вод у природні водойми та підвищує рівень екологічної безпеки підприємства.

Для контролю стану навколишнього середовища на підприємстві функціонує система екологічного моніторингу. Проводяться регулярні спостереження за якістю атмосферного повітря, рівнем шуму, станом ґрунтів та водних ресурсів. Лабораторії підприємства виконують аналізи проб

повітря та води, здійснюють контроль концентрації забруднюючих речовин і перевіряють відповідність екологічних показників встановленим нормативам. Використання сучасних приладів контролю та автоматизованих систем моніторингу дозволяє оперативно виявляти можливі відхилення та своєчасно вживати необхідних заходів.

Одним із стратегічних напрямків розвитку підприємства є впровадження міжнародних стандартів екологічного менеджменту та енергетичного управління. Підприємство прагне організувати свою діяльність відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 14001 та ISO 50001, що сприяє підвищенню рівня екологічної відповідальності, ефективності використання ресурсів та конкурентоспроможності продукції.

Таким чином, природоохоронна діяльність металургійного підприємства є комплексною системою організаційних, технічних та економічних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу виробництва на навколишнє середовище. Реалізація сучасних екологічних програм, впровадження енергоефективних технологій, удосконалення систем очищення та постійний екологічний контроль дозволяють підприємству не лише забезпечувати стабільну виробничу діяльність, а й сприяти покращенню екологічного стану регіону та підвищенню рівня екологічної безпеки в цілому.

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

В випускній кваліфікаційній роботі бакалавра на тему: «Аналіз та підвищення ефективності електропривода механізму пересування візка допоміжних підйомів 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-411-6 потужністю 27 кВт, частотою обертання n = 960 хв-1, з моментом інерції Jр=0,7 Н·м·с2.

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

Проведено дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором з числом ступіней пускових резисторів m=5 та m=7. За обраним критерієм втрат потужності в електродвигуні в пускових режимах, з погляду економічної ефективності, найбільш виправданим є багатоступінчатий реостатний пуск, як спосіб формування пускових режимів. Розрахунки показали, що втрати потужності за рік роботи двигуна при п’ятиступеневому пуску складають 111,4 кВт·год а при семиступеневому пуску складають 89,7 кВт·год.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. DOI: 10.1109/9780470547281

2. Leonhard, W. Control of Electrical Drives. Berlin: Springer, 2001.

3. Vas, P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998.

4. Pillay, P., and R. Krishnan. “Modeling, Simulation, and Analysis of Induction Motor Drives.” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 2, 1989, pp. 265–273.

5. . Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," in Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, Aug. 1994, doi: 10.1109/5.301684.

6. F. Blaabjerg, U. Jaeger and S. Munk-Nielsen, "Power losses in PWM-VSI inverter using NPT or PT IGBT devices," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 358-367, May 1995, doi: 10.1109/63.388002.

7. E. A. Klingshirn and H. E. Jordan, "A polyphase induction motor performance and losses on nonsinusoidal voltage sources", *IEEE Trans. Power App.Syst.*, vol. PAS-87, pp. 624-631, Mar. 1968.

8. J. M. D. Murphy and M. G. Egan, "A comparison of PWM strategies for inverter-fed induction motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-19, no. 3, pp. 363-369, May/June 1983.

9. . C. Zach, R. Martinez, S. Keplinger and A. Seiser, "dynamically optimal switching patterns for PWM inverter drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 975-986, July/Aug. 1985.

10. Xu, Z., & Rahman, M. F. (2003, November). Sensorless sliding mode control of an interior permanent magnet synchronous motor based on extended Kalman filter. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (Vol. 1, pp. 722–727). Singapore.

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.--Режим доступа: http://www.is-com.ua/files/zelio_logic_2_katalog.pdf/

13.Електронний ресурс: Schneider Electric Global Website. Режим доступу: http://www.schneider-electric.com/en/product-range/531-zelio-logic/

14. Learn MATLAB 7.0 — Tutorial PDF. July 2004 Fourth printing Revised for MATLAB 7.0 (Release 14)

15.Чорний О.П., Гладир А.І., Осадчук Ю.Г., Курбанов І.Р., Вошун А.М. Пускові системи нерегульованих електроприводів : монографія. — Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2006. — 280 с.

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

17.Загірняк М.В., Родькін Д.Й., Чорний О.П. Енергетичні процеси в електромеханічних системах з напівпровідниковими перетворювачами : монографія. — Кременчук : КДПУ, 2009. — 320 с.Загірняк М.В., Родькін Д.Й., Чорний О.П., Коренькова Т.В. Напрями розвитку теорії миттєвої потужності та її застосування в задачах електромеханіки // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». — Одеса, 2011. — С. 347–354.

18.Родькін Д.Й. Актуальні питання теорії і практики енергоресурсозберігаючих електромеханічних систем // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — 2008. — Вип. 3(50), ч. 1. — С. 8–17.

19.Довідник з проєктування електропостачання, ліній електропередачі та мереж / за ред. Я.М. Больщама, В.І. Круповича, М.Л. Самовера. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К, 1975. — 695 с.

20. Розрахунок коротких замикань і вибір електрообладнання : навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів / М.П. Крючков, Б.М. Неклепаєв, В.А. Старшинов та ін. ; за ред. І.П. Крючкова, В.А. Старшинова. — 2-ге вид., стер. — К, 2009. — 416 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Додаток А

Схема електрична принципова механізму пересування візка крану до та після реконструкції

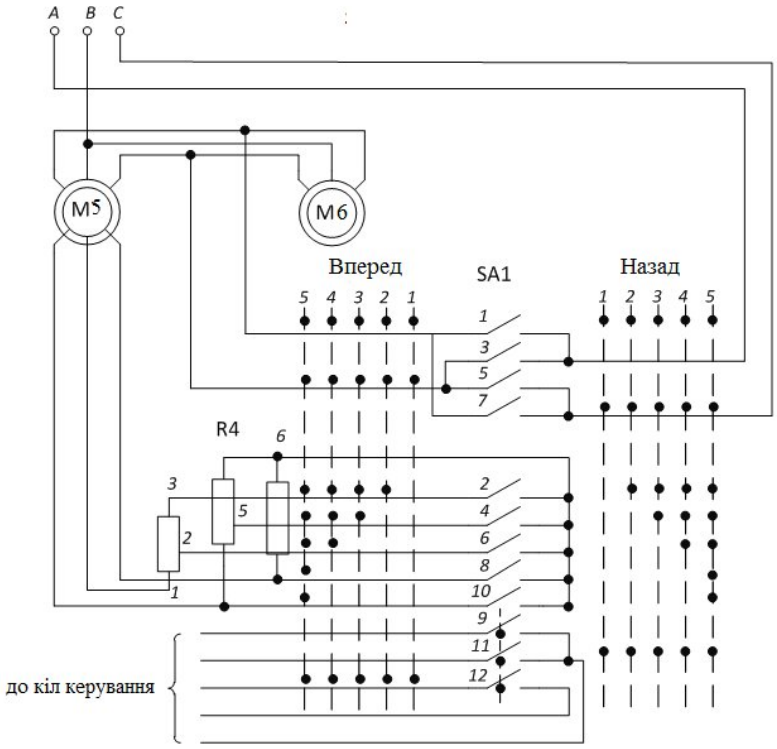


Рисунок А.1 − Фрагмент силової схеми живлення привода пересування допоміжного візка

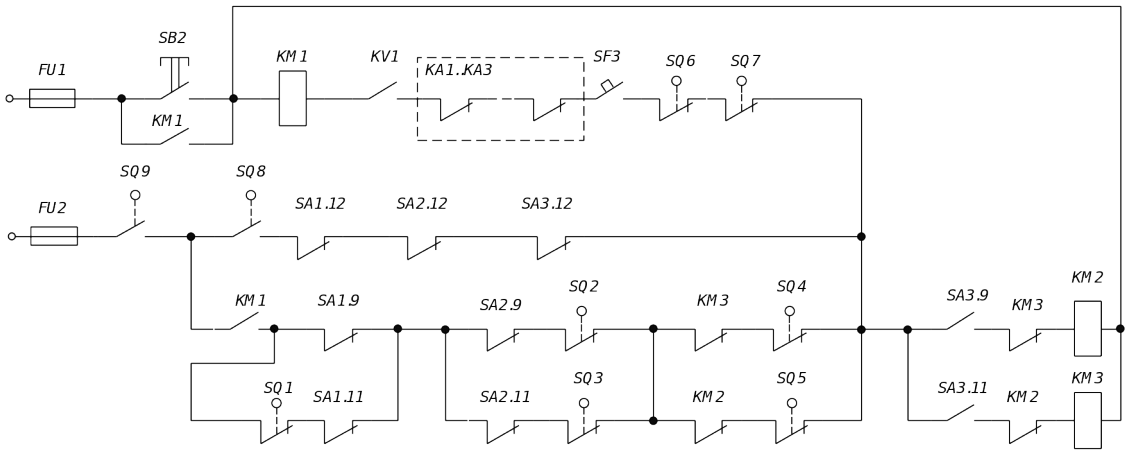


Рисунок А.2 − Схема кіл управління краном

Таблиця А.1 − Специфікація апаратів і пристроїв

Позіція/ позначення	Призначення	Кіль−кість	Примітка
М1..М4	Двигуни моста	2	
М5	Двигун допоміжного візка	1	27 кВт
М7	Двигун підйому	2	
М2;М3	Електродвигуни гальм	4	

M6;M8			
KM1	Контактор лінійний КТ6023	1	
KM2; KM3	Контактор реверсу КТ6014	2	
SA3	Контролер моста ККТ−62	1	
SA1	Контролер візка ККТ−61А	1	
SA2	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	

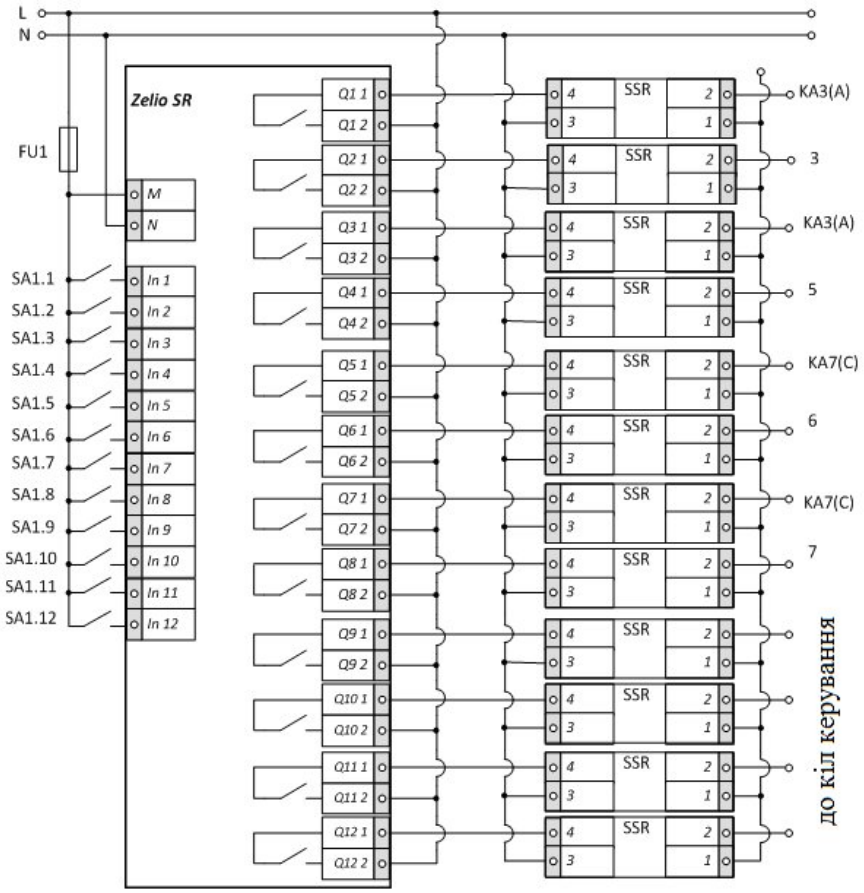


Рисунок А.3 − Модернізована схема керування

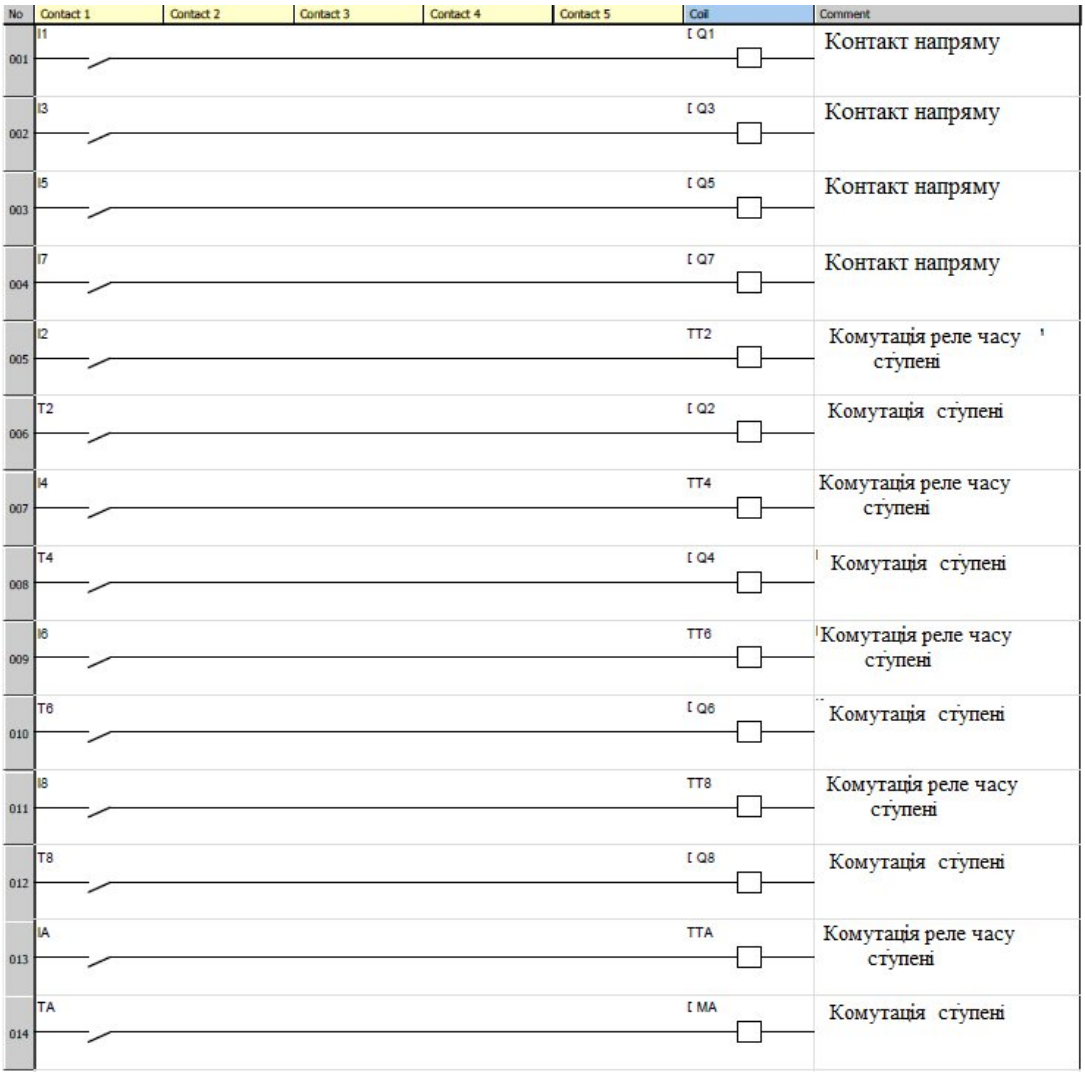


Рисунок А.4 − Лістинг програми ПЛК

Додаток Б

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

Выходные данные

$Pn \equiv 27000 \quad Un \equiv 220 \quad \cos\phi \equiv 0.86 \quad \eta \equiv 0.895 \quad sn \equiv 0.03 \quad r1o \equiv 0.028$

$x1o \equiv 0.069 \quad x\mu o \equiv 2.8 \quad fn \equiv 50$

$r2o \equiv 0.032 \quad x2o \equiv 0.09 \quad no \equiv 1000 \quad Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn}$

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

$Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 53.149 \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn} = 4.139 \quad R2 \equiv r2o \cdot Zb = 0.132$

$x2 \equiv x2o \cdot Zb = 0.373$

$r1 \equiv r1o \cdot Zb \quad r1 \equiv r1o \cdot Zb = 0.116 \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb = 0.286 \quad x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb$

$x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb = 11.59 \quad J \equiv 0.7 \quad \phi \equiv \frac{\pi}{2} \quad p \equiv \frac{3000}{no} \quad p \equiv \frac{3000}{no} = 3 \quad \omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn$

$\omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn = 314.159 \quad \omega = 314.159 \quad Icn = 53.149 \quad Zb = 4.139 \quad R2 = 0.132 \quad x2 = 0.373$

$r1 = 0.116 \quad x1 = 0.286 \quad x\mu = 11.59 \quad p = 3 \quad \omega n \equiv \frac{\pi \cdot no \cdot (1 - sn)}{30} \quad \omega o \equiv \frac{\pi \cdot no}{30}$

$L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} \quad L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} = 0.038 \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} = 0.038$

$Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} \quad Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} = 0.037 \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} = 311.127$

$k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} \quad k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} = 1.276 \times 10^4 \quad \omega n = 101.578 \quad \omega o = 104.72$

$L1 = 0.038 \quad L2 = 0.038 \quad Lm = 0.037 \quad Um = 311.127 \quad k\sigma = 1.276 \times 10^4$

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

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right] = 292.019$$

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

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2\cdot\omega o}\right)\cdot\left[\frac{Un^2}{\left[r1+\sqrt{(r1)^2+(x1+x2)^2}\right]}\right] = 884.091$$

$td \equiv 0.0005$ $tmax \equiv 0.9$ $n \equiv 2000$ $Mr \equiv Mn$ $Mn = 292.019$ $Mkr = 884.091$

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 5$ $M1 \equiv 0.85\cdot Mkr$ $M1 = 751.477$ $\lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn\cdot M1}}$ $\lambda = 1.669$ $M2 \equiv \frac{M1}{\lambda}$ $M2 = 450.237$

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

$Rr1 = 0.221$ $Rr2 = 0.369$ $Rr3 = 0.616$ $Rr4 = 1.028$ $Rr5 = 1.716$ $s1 = 0.046$

Расчет угловых скоростей пускового реостата

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

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

$\omega1 = 96.635$ $\omega2 = 91.226$ $\omega3 = 82.198$

$\omega4 = 67.129$ $\omega5 = 41.978$

Расчет статической механической характеристики $so := 0$

$$statica(so) := \left|\begin{array}{l} s_{0,0} \leftarrow so \\ V_{0,0} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad s_{i,0} \leftarrow \frac{i}{n} \\ \quad V_{i,0} \leftarrow \frac{\pi\cdot(1-s_{i,0})\cdot no}{30} \\ \quad Rr \leftarrow \left|\begin{array}{ll} Rr5 & \text{if } V_{i,0} < \omega5 \\ Rr4 & \text{if } \omega5 \le V_{i,0} < \omega4 \\ Rr3 & \text{if } \omega4 \le V_{i,0} < \omega3 \\ Rr2 & \text{if } \omega3 \le V_{i,0} < \omega2 \\ Rr1 & \text{if } \omega2 \le V_{i,0} < \omega1 \\ R2 & \text{otherwise} \end{array}\right. \\ \quad M_{i,1} \leftarrow \left[\frac{3Rr}{(s_{i,0})\cdot\omega o}\right]\cdot\frac{Un^2}{\left(r1+\frac{Rr}{s_{i,0}}\right)^2+(x1+x2)^2} \\ \quad V_{i,1} \leftarrow M_{i,1} \\ V \end{array}\right.$$

$$Rr(u) \equiv \left|\begin{array}{ll} Rr5 & \text{if } u_5 < \omega5 \\ Rr4 & \text{if } \omega5 \le u_5 < \omega4 \\ Rr3 & \text{if } \omega4 \le u_5 < \omega3 \\ Rr2 & \text{if } \omega3 \le u_5 < \omega2 \\ Rr1 & \text{if } \omega2 \le u_5 < \omega1 \\ R2 & \text{otherwise} \end{array}\right.$$

Додаток В

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п’ть ступенів

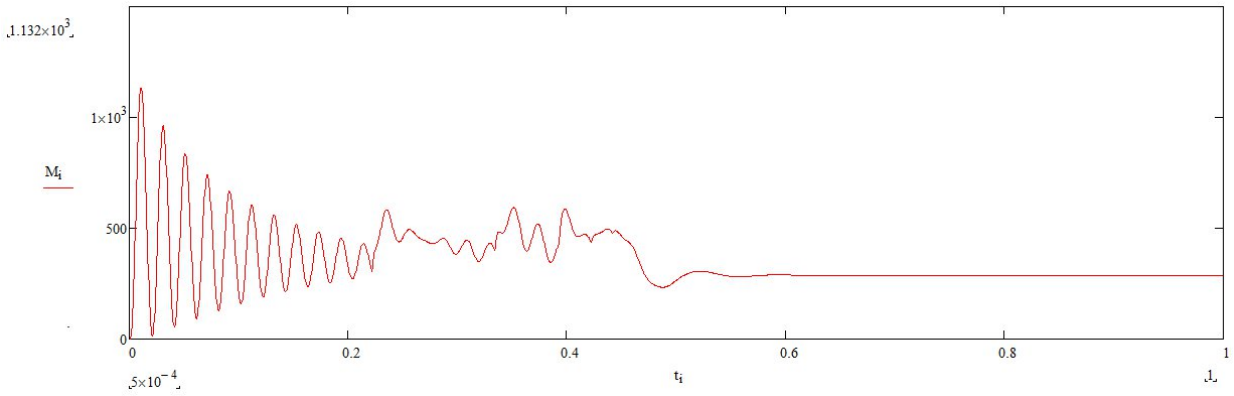


Рисунок В.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

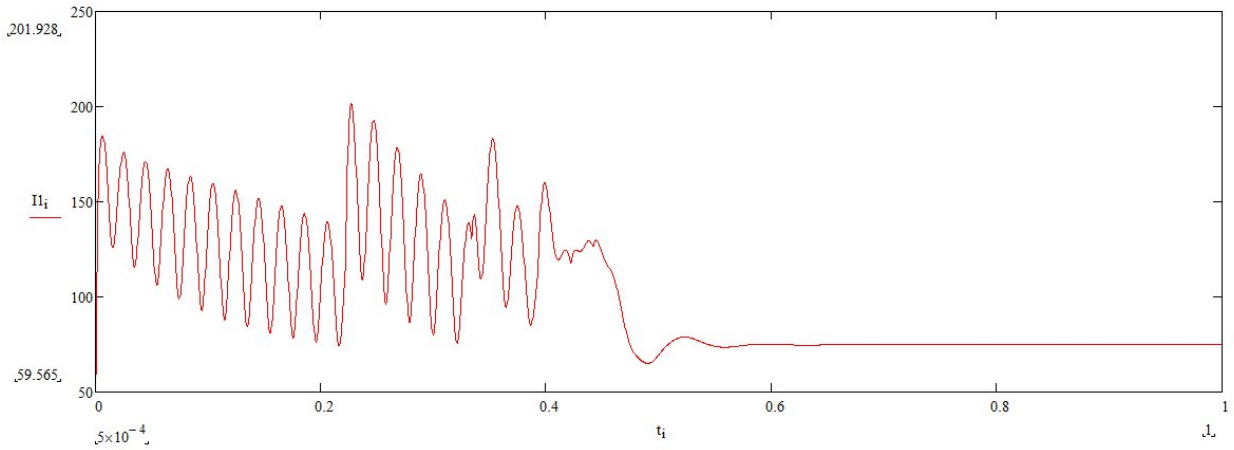


Рисунок В.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

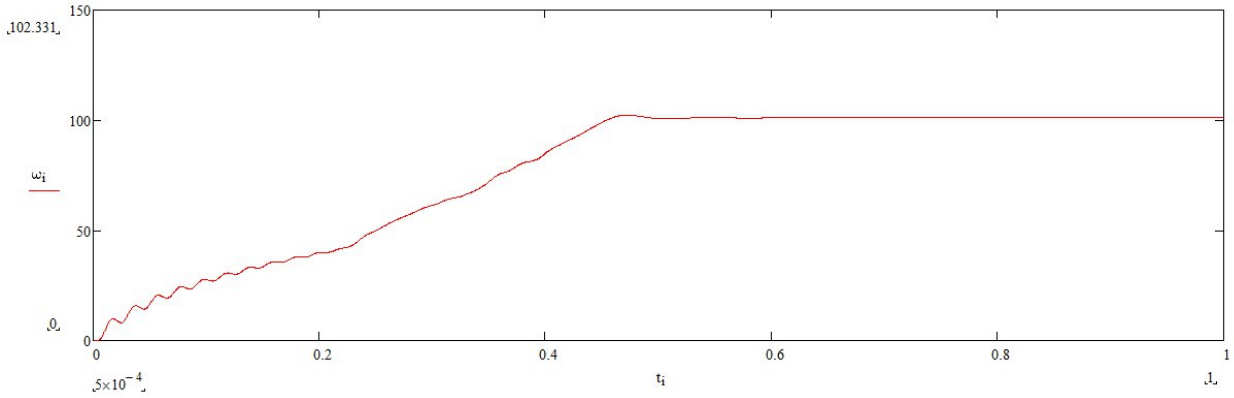


Рисунок В.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Г

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

Выходные данные

$Pn \equiv 27000 \quad Un \equiv 220 \quad \cos\phi \equiv 0.86 \quad \eta \equiv 0.895 \quad sn \equiv 0.03 \quad r1o \equiv 0.028$

$x1o \equiv 0.069 \quad x\mu o \equiv 2.8 \quad fn \equiv 50$

$r2o \equiv 0.032 \quad x2o \equiv 0.09 \quad no \equiv 1000 \quad Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn}$

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

$Icn \equiv \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 53.149 \quad Zb \equiv \frac{Un}{Icn} = 4.139 \quad R2 \equiv r2o \cdot Zb = 0.132$

$x2 \equiv x2o \cdot Zb = 0.373$

$r1 \equiv r1o \cdot Zb \quad r1 \equiv r1o \cdot Zb = 0.116 \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb \quad x1 \equiv x1o \cdot Zb = 0.286 \quad x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb$

$x\mu \equiv x\mu o \cdot Zb = 11.59 \quad J \equiv 0.7 \quad \phi \equiv \frac{\pi}{2} \quad p \equiv \frac{3000}{no} \quad p \equiv \frac{3000}{no} = 3 \quad \omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn$

$\omega \equiv 2 \cdot \pi \cdot fn = 314.159 \quad \omega = 314.159 \quad Icn = 53.149 \quad Zb = 4.139 \quad R2 = 0.132 \quad x2 = 0.373$

$r1 = 0.116 \quad x1 = 0.286 \quad x\mu = 11.59 \quad p = 3 \quad \omega n \equiv \frac{\pi \cdot no \cdot (1 - sn)}{30} \quad \omega o \equiv \frac{\pi \cdot no}{30}$

$L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} \quad L1 \equiv \frac{x1 + x\mu}{\omega} = 0.038 \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} \quad L2 \equiv \frac{x2 + x\mu}{\omega} = 0.038$

$Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} \quad Lm \equiv \frac{x\mu}{\omega} = 0.037 \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} \quad Um \equiv Un \cdot \sqrt{2} = 311.127$

$k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} \quad k\sigma \equiv \frac{1}{L1 \cdot L2 - Lm^2} = 1.276 \times 10^4 \quad \omega n = 101.578 \quad \omega o = 104.72$

$L1 = 0.038 \quad L2 = 0.038 \quad Lm = 0.037 \quad Um = 311.127 \quad k\sigma = 1.276 \times 10^4$

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

$$Mn \equiv \left(\frac{3 \cdot R2}{sn \cdot \omega o}\right) \cdot \left[\frac{Un^2}{\left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) \cdot \left(r1 + \frac{R2}{sn}\right) + (x1 + x2) \cdot (x1 + x2)}\right] = 292.019$$

$$Mkr \equiv \left(\frac{3}{2\cdot\omega o}\right)\cdot\left[\frac{Un^2}{\left[r1+\sqrt{(r1)^2+(x1+x2)^2}\right]}\right] = 884.091$$

td ≡ 0.0005 tmax ≡ 0.9 n ≡ 2000 Mr ≡ Mn Mn = 292.019 Mkr = 884.091

Расчет ступеней пускового реостата

$m \equiv 7$ $M1 \equiv 0.85\cdot Mkr$ $M1 = 751.477$ $\lambda \equiv \sqrt[m]{\frac{Mn}{sn\cdot M1}}$ $\lambda = 1.442$ $M2 \equiv \frac{M1}{\lambda}$ $M2 = 521.201$

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

Rr1 = 0.191 Rr2 = 0.275 Rr3 = 0.397 Rr4 = 0.572 Rr5 = 0.825 Rr6 = 1.19 Rr7 = 1.716 s1 = 0.054

Расчет угловых скоростей пускового реостата

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

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

ω1 = 96.635 ω2 = 93.063 ω3 = 87.913 ω4 = 80.488 ω5 = 69.782 ω6 = 54.346 ω7 = 32.089

Расчет напряжений, токов и моментов

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

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

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

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

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

$Mc(u) \equiv$ Mr if $u_5 > 0$; −Mr otherwise

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 $\omega4 \le V_{i,0} < \omega3$; Rr2 if $\omega3 \le V_{i,0} < \omega2$; Rr1 if $\omega2 \le V_{i,0} < \omega1$; R2 otherwise
  - $M_{i,1} \leftarrow \left[\frac{3Rr}{(s_{i,0})\cdot\omega o}\right]\cdot\frac{Un^2}{\left(r1+\frac{Rr}{s_{i,0}}\right)^2+(x1+x2)^2}$
  - $V_{i,1} \leftarrow M_{i,1}$
- V

$Rr(u) \equiv$ Rr7 if $u_5 < \omega7$; Rr6 if $\omega7 \le u_5 < \omega6$; Rr5 if $\omega6 \le u_5 < \omega5$; Rr4 if $\omega5 \le u_5 < \omega4$; Rr3 if $\omega4 \le u_5 < \omega3$; Rr2 if $\omega3 \le u_5 < \omega2$; Rr1 if $\omega2 \le u_5 < \omega1$; R2 otherwise

Додаток Д

Графіки перехідних процесів пуску двигуна в сім ступенів

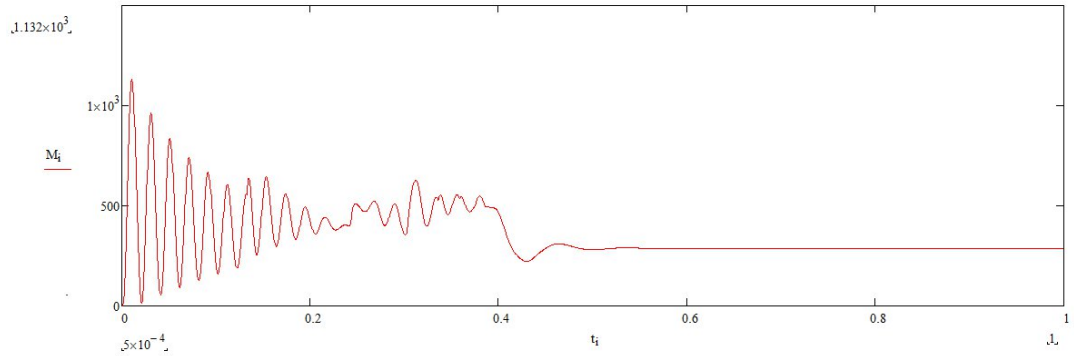


Рисунок Г.1 − Графік перехідного процесу моменту в функції часу реостатного пуску АД

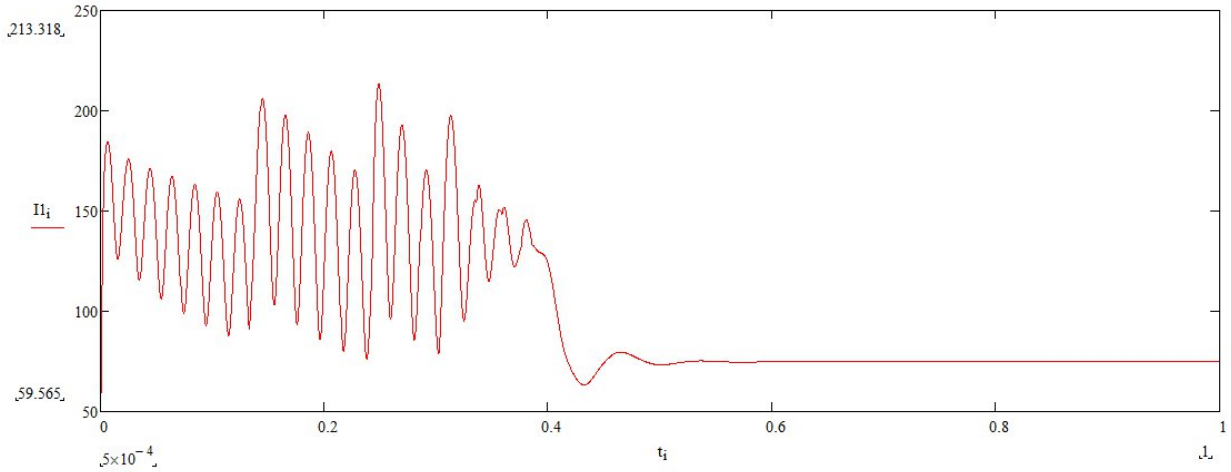


Рисунок Г.2 − Графік перехідного процесу струму в функції часу реостатного пуску АД

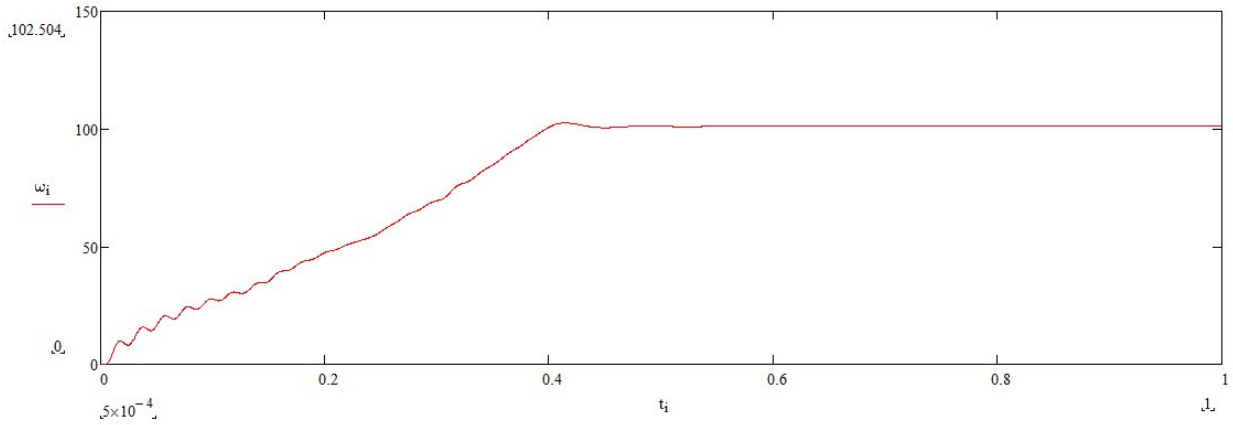


Рисунок Г.3 − Графік перехідного процесу кутової швидкості в функції часу реостатного пуску АД

Додаток Е

Графіки напруги, струму та потужності під час пуску двигуна

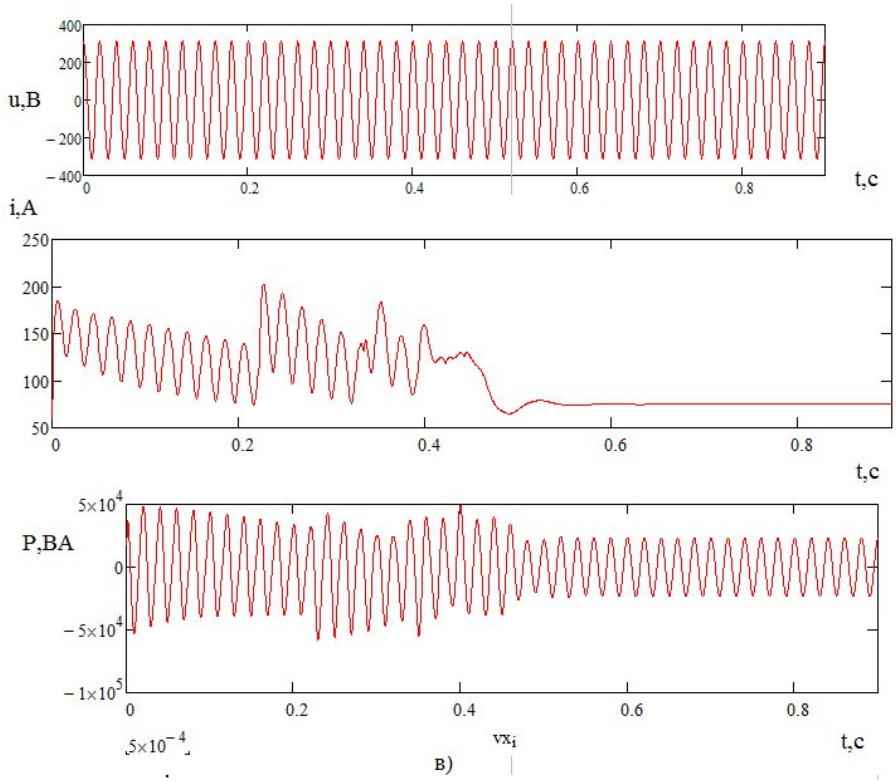


Рисунок Д.1− Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=5

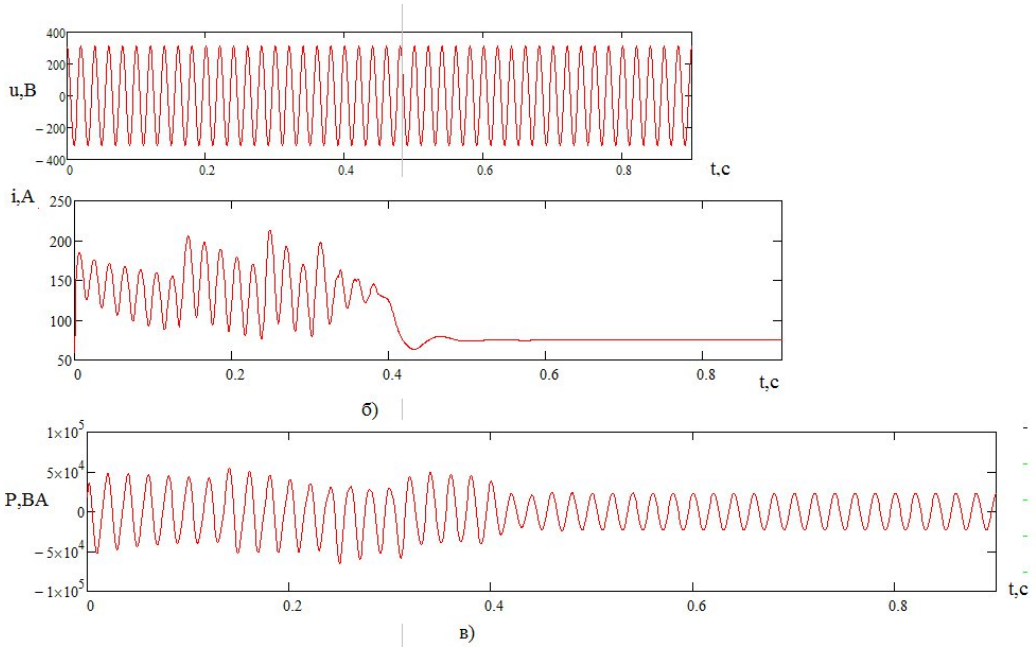


Рисунок Д.2 − Графіки напруги (а), струму (б) потужності (в) під час пуску m=7