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: Підвищення ефективності системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 80/20 т

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

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

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

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

Зигарь Юрій Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Підвищення ефективності системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 80/20 т
керівник роботи Воляр Р.М., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від « 23 » 12 2025 року № 1833 - с
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 підйому мостового крана
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана 2) Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана 3) Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) схема до реконструкції; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) Графіки перехідних процесів пуску двигуна в п'ять ступенів

4 Консультанти розділів роботи

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

5 Дата видачі завдання 25.12.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент _____ (підпис) _____ Ю.В. Зигарь (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Зигарь Юрій Вікторович: Тема роботи: Підвищення ефективності системи керування електроприводом механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 80/20 т

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

У сучасних умовах розвитку промисловості особливого значення набуває підвищення ефективності роботи підйомно-транспортних механізмів, які є невід'ємною складовою технологічних процесів металургійних, машинобудівних та будівельних підприємств. Одне з провідних місць серед таких механізмів займають мостові крани, від стабільності та надійності роботи яких безпосередньо залежать продуктивність виробництва, безпека персоналу та економічні показники підприємства. Особливо важливим є дослідження електроприводів механізмів підйому вантажу, оскільки саме вони працюють у складних динамічних режимах із частими пусками, гальмуваннями та значними перевантаженнями.

У роботі розглянуто структурні особливості та принципи побудови асинхронного електроприводу механізму підйому мостового крана. Основна увага приділена аналізу роботи частотно-регульованого електроприводу, який забезпечує плавність руху, зменшення динамічних навантажень та підвищення точності керування вантажем. Проведено аналіз існуючих систем керування крановими механізмами, що дозволило визначити основні проблеми

експлуатації, серед яких найбільш суттєвими є виникнення маятникових коливань вантажу, ривки при пуску та гальмуванні, нестабільність швидкості переміщення, а також значні механічні навантаження на елементи конструкції крана.

У процесі дослідження встановлено, що застосування системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» дозволяє значно покращити динамічні характеристики механізму підйому, зменшити коливання вантажу та забезпечити енергоефективний режим роботи. У роботі детально проаналізовано конструктивні особливості мостового ливарного крана, який працює в умовах металургійного виробництва, де обладнання піддається впливу високих температур, ударних навантажень та інтенсивних режимів експлуатації. Наведено опис структури системи електропостачання та автоматизованого керування електроприводами крана на базі обладнання Siemens, перетворювачів частоти SINAMICS S120 та програмованих логічних контролерів S7-300.

У роботі виконано розрахунок параметрів механізму допоміжного підйому мостового крана, здійснено вибір асинхронного двигуна, редуктора, гальмівної системи та елементів силової частини електроприводу. Проведено розрахунок статичних моментів, моментів інерції, тривалості пускових режимів і навантажувальних характеристик приводу. Отримані результати підтвердили доцільність використання асинхронного двигуна типу SIMOTICS N-compact потужністю 250 кВт у складі частотно-регульованого електроприводу.

Окрему увагу приділено системі керування електромеханічними гальмами механізму підйому. Визначено, що точність налаштування алгоритмів роботи гальм суттєво впливає на плавність руху вантажу та запобігає виникненню небезпечних режимів роботи, зокрема відкатів вантажу під час рушання або зупинки механізму. Дослідження показали, що застосування векторного керування асинхронним двигуном забезпечує високу точність регулювання

швидкості та стабільність роботи електроприводу навіть при значних змінах навантаження.

У результаті виконаного дослідження доведено ефективність використання сучасних частотно-регульованих електроприводів у механізмах підйому мостових кранів. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити надійність роботи обладнання, зменшити динамічні навантаження на конструктивні елементи крана, покращити умови експлуатації та забезпечити енергоощадний режим функціонування електроприводу.

Ключові слова: мостовий кран, асинхронний електропривод, частотний перетворювач, векторне керування, механізм підйому, динамічні навантаження, електродвигун, частотно-регульований привід, система керування, гальмівна система, SINAMICS S120, SIMOTICS N-compact.

ABSTRACT

Yurii Viktorovych Zyhar: Improving the Efficiency of the Control System of the Electric Drive of the Hoisting Mechanism of an 80/20 t Overhead Crane. Qualification bachelor's thesis for obtaining a higher education degree in specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics." Scientific supervisor: PhD in Engineering, Associate Professor R.M. Voliar. 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.

In modern industrial development conditions, increasing the efficiency of hoisting and transport mechanisms becomes especially important, since they are an integral part of technological processes in metallurgical, machine-building, and construction enterprises. One of the leading positions among such mechanisms is occupied by overhead cranes, whose stability and operational reliability directly affect production efficiency, personnel safety, and the economic performance of enterprises. Particular attention should be paid to the study of electric drives of hoisting mechanisms, as they operate under complex dynamic conditions with frequent starts, braking modes, and significant overloads.

The thesis examines the structural features and design principles of the asynchronous electric drive of the hoisting mechanism of an overhead crane. The main focus is placed on the analysis of a frequency-controlled electric drive, which ensures smooth motion, reduces dynamic loads, and improves load-handling accuracy. An analysis of existing crane control systems was carried out, making it possible to identify the main operational problems, including pendulum oscillations of the load, jerks during starting and braking, instability of movement speed, and significant mechanical stresses acting on crane structural components.

The study established that the application of the “frequency converter – asynchronous motor” system significantly improves the dynamic characteristics of the hoisting mechanism, reduces load oscillations, and ensures an energy-efficient operating mode. The thesis provides a detailed analysis of the structural features of a casting overhead crane operating in metallurgical production conditions, where the equipment is exposed to high temperatures, shock loads, and intensive operating modes. The structure of the power supply system and the automated control system of the crane electric drives based on Siemens equipment, SINAMICS S120 frequency converters, and S7-300 programmable logic controllers is described.

The thesis includes calculations of the parameters of the auxiliary hoisting mechanism of the overhead crane, as well as the selection of an asynchronous motor, gearbox, braking system, and power section components of the electric drive. Calculations of static torques, moments of inertia, startup durations, and load characteristics of the drive were performed. The obtained results confirmed the feasibility of using a 250 kW SIMOTICS N-compact asynchronous motor as part of a frequency-controlled electric drive system.

Special attention is paid to the control system of the electromechanical brakes of the hoisting mechanism. It was determined that the accuracy of brake operation algorithms significantly affects the smoothness of load movement and prevents dangerous operating conditions, particularly load rollback during starting or stopping. The research demonstrated that vector control of the asynchronous motor provides high speed regulation accuracy and stable operation of the electric drive even under significant load variations.

As a result of the conducted research, the effectiveness of modern frequency-controlled electric drives in overhead crane hoisting mechanisms has been proven. The proposed technical solutions make it possible to increase equipment reliability, reduce dynamic loads on crane structural components, improve operating conditions, and ensure an energy-saving operating mode of the electric drive system.

Keywords: overhead crane, asynchronous electric drive, frequency converter, vector control, hoisting mechanism, dynamic loads, electric motor, frequency-controlled drive, control system, braking system, SINAMICS S120, SIMOTICS N-compact.

ЗМІСТ

ВСТУП……....12

1 Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана ……..…….13

1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами……..13

1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу мостового крана та його механізму підйому……..15

1.3 Складання схеми базового електропривода механізму підйому мостового крана та задачі дослідження ……17

2 Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана ……...26

2.1 Вибір системи електропривода…….26

2.2 Розрахунок параметрів та вибір елементів силової частини електропривода……28

2.3 Розрахунок параметрів та вибір елементів системи керування електроприводом……..44

2.3.1 Вибір перетворювача частоти……44

2.4 Складання структурної схеми електропривода……45

2.5 Математична модель електропривода 53

2.5.1 Синтез математичної моделі системи векторного керування електродвигуном …….53

2.5.2 Моделювання електропривода при пуску двигуна без навантаження та з накидом номінального навантаження…….....55

3 Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран…….....59

3.1 Загальна характеристика умов праці……...59
3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика……63
3.3 Захист навколишнього середовища……65
ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ…….68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..69

ВСТУП

Практично будь-яка галузь промисловості потребує застосування кранових механізмів (КМ) в певних періодах свого технологічного процесу. Широкий спектр використання, від підйому сировини з надр землі з використання кранових лебідок чи завантаження її на транспорт за допомогою підйомних кранів для доставки на підприємство, завершуючи завантаженням уже виробленого продукту для реалізації. В ході транспортувань за часту відбувається зміна виду транспорту, що потребує також використання КМ для перевантаження. З врахуванням викладеного та сучасною інтенсифікацією виробництва в цілому, зменшення періоду завантаження чи перевантаження та кількості цих операцій в процесі, може вносити суттєвий вплив, як в плані швидкості так і в плані вартості виготовлення продукції. А підвищення ефективності роботи крану в плані точності та плавності переміщень вантажу зменшить кількість пошкоджень як вантажу так і самого крану.

Мостові крани широко використовуються для будівництва промислових та цивільних споруд. Специфіка роботи цих вантажопідйомних машин полягає у тому, що значну частину робочого циклу займають перехідні режими (пуск та гальмування) механізмів зміни вильоту та підйому вантажу. Таким чином, тривалість перехідних процесів механізмів зміни вильоту та підйому вантажу пов’язана із продуктивністю роботи крана.

Розливочні крани виконують велику частину підйомно-транспортних робіт на металургійних підприємствах в ливарних, електросталеплавильних, киснево – конверторних цехах. Вони виконують включені безпосередньо в технологічний процес. Від їх надійної та безперебійної роботи залежать продуктивність підприємства, його техніко-економічні показники, безпека обслуговуючого персоналу.

Мета роботи полягає в дослідженні структурних особливостей та системи керування асинхронного електроприводу механізму підйому мостового крана.

1 Аналіз стану питання та особливостей технологічного процесу мостового крана

1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами

В процесі аналізу систем керування електродвигунами (ЕД) кранових механізмів, було встановлено, що при модернізації існуючих чи виробництві нових КМ, найпоширенішого застосування набули асинхронні електродвигуни (АД), з релейно-контактною системою керування чи перетворювачем частоти [1-8].

Кожен процес роботи КМ можна розділити на три періоди [1,2]: пуску – підвішений вантаж чи скіп, намотується на барабан чи змотується з нього, усталеного руху – ЕД працює зі сталою кутовою швидкістю обертання валу та гальмування – ЕД зменшує свою кутову швидкість від сталої до нуля для зупинки процесу підйому/спуску вантажу.

Весь же цикл роботи КМ в більшості випадків характеризується як повторно-короткочасний [3,4] з великою кількістю чергувань періодів роботи механізмів і технічних пауз.

Період пуску КМ характеризується процесом відриву вантажу від поверхні, якому передує вибір зазору в механічній передачі при наявності слабини в канаті чи тросі, що є основною причиною виникнення динамічних навантажень які діють на електропривод підйому КМ та являється найпоширенішою причиною виникнення несправностей, до 80%.

Також момент відриву супроводжується, виникненням перехідного некерованого процесу коливального характеру, та можливим виникненням ривків [5] при перевищення допустимої швидкості обертання ротора електродвигуна КМ, в даний момент для даної маси вантажу.

Часте виникнення ривків в системі сприяє інтенсивному накопиченню втомних пошкоджень в деталях [6], і, в результаті, виходу із ладу механізму. В

період уставленого руху основним завданням є стабілізація вибраної швидкості, та при можливості реалізація технічних рішень в плані її підвищення.

Основна задача при цьому, це зменшення амплітуди маятникових коливань виниклих в період пуску з врахуванням впливу зовнішніх динамічних вітрових навантажень [5]. Вплив некерованих маятникових коливань на систему, збільшує, тривалість робочого циклу до 20% та ризик виникнення аварійних ситуацій [7, 8], тому вирішення поставленої задачі матиме суттєвий результат у покращенні показників швидкості.

Основним завданням періоду гальмування є забезпечення посадкової швидкості для вантажу, а для процесу опускання ще і точність у його розміщенні. Тому задача вирішення якої суттєво вплине на якість роботи КМ, це зменшення швидкості ЕД по заданому математичному закону. Та погашення маятникових коливань, які виникають в процесі гальмування.

За результатами проведеного дослідження всіх розглянутих робіт спрямованих на нейтралізацію пружних коливань в системі КМ при підніманні/опусканні вантажу, встановлено, що не враховується змінний момент інерції барабана, на який намотується і з якого розмотується трос, до якого підвішено вантаж.

А припущення, що при сталій швидкості обертання ротора ЕД кранового механізму лінійна швидкість підйому/спуску вантажу також буде сталою, не є вірним. Вона буде або наростати, або спадати, тому приведені системи стабілізації кутової швидкості «маскують» нестабільні лінійні швидкості підйому/спуску вантажів.

У зв’язку з цим актуальним є дослідженні структурних особливостей та системи керування асинхронного електроприводу механізму підйому мостового крана.

1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу мостового крана та його механізму підйому

Металургійний завод «ДНІПРОСТАЛЬ» отримує живлення виконане кабельною лінією довжиною 14,3 км від Придніпровської ТЕС напругою 330 кВ. На підстанції глибокого вводу (ПГВ) «Пічна» встановлені потужні трансформатори металургійного призначення ТДНМ-160000/330 та ТРДН-63000/330 з первинною напругою 330 кВ та вторинною 35 кВ.

Основними споживачами електроенергії металургійного заводу з вироблення безперервно литої заготівки є: дугова електросталеплавильна піч фірми «Danieli» з пічним трансформатором потужністю 140 МВ·А і первинною напругою 35 кВ.

Для вирішення проблем забезпечення належної якості електроенергії і компенсації реактивної потужності в системах електропостачання установлені статичний тиристорний компенсатор(СТК) реактивної потужності і фільтрокомпенсуючий пристрій (ФКП) фірми «NOKIAN Capacitors», Фінляндія. СТК і ФКП установлені на ПГВ «Пічна» – 330/35 кВ. Перелічене вище обладнання робить об’єкт унікальним, аналогу якому на даний момент в Україні немає.

Крани, що працюють в вищевказаних умовах виробництва, працюють при наявності високої температури навколишнього середовища та випромінювання теплоти від розпеченого або розплавленого металу. Кабіна керування краном повинна бути теплоізольованою, в ній також обладнується установка для кондиціонування повітря.

Режим роботи крану циклічний. Цикл складається з переміщення вантажу по заданій траєкторії і повернення у вихідне положення для нового циклу. Кожен процес руху може бути розділений на періоди прискореного руху (розгін, уповільнення) і період руху з усталеною швидкістю.

Розливочний кран, вантажопідйомністю 80/20 тон, 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.

Ливарні мостові крани є основним підйомно-транспортним устаткуванням, яке використовується на металургійних підприємствах для транспортування, заливки і розливання рідкого металу.

В основному вони застосовуються для заливки розплавленого чавуну в конвертори або в завантажувальний проліт електрічної печі, а також для транспортування ковша з розплавленої сталлю на приймальний пристрій або для транспортування розплавленої сталі на установку піч-ківш для подальшого рафінування металу.

Ливарні крани призначені для обслуговування технологічного процесу конвертерних і електросталеплавильних цехів металургійних підприємств і розраховані на важкий і досить важкий режим роботи, який включає високі, пов'язані з технологією виробництва, статичні, динамічні і ударні навантаження.

Вищесказане повністю відноситься до призначеного для роботи в електросталеплавильному цеху ливарного крана вантажопідйомністю 125/80/16 т, електроприводи і автоматизована система управління якого розроблені, поставлені, і після налагодження введені в дію протягом 19 місяців 2012-2013 рр.

Конструкція чотирьохбалочного крана показана на рисунку 1.1. Дві головні і дві допоміжні балки з'єднані з кінцевими балками. По основним балкам переміщається головний візок, по допоміжним - допоміжний.

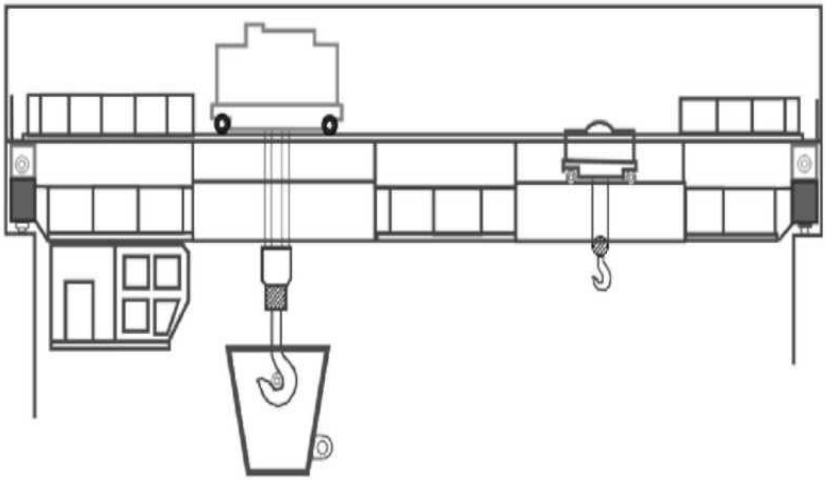


Рисунок 1.1 − Ливарний кран

1.3 Складання схеми базового електропривода механізму підйому мостового крана та задачі дослідження

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

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

Найменування механізму	Тип виробника	Кількість електродвигунів	Потужність на валу при ТВ=40%	Частота обертання, об/хв	Струм статора, А	Струм ротора, А	Максимальний момент, кг·м
Пересування крана	Siemens SIMOTICS SD 1LG4	4	30	1000	56	-	-
Пересування головного візка	Siemens SIMOTICS SD 1LG4	2	18	1000	36	-	-
Допоміжний підйом	Siemens SIMOTICS N-compact	1	250	1000	420	-	-
Головний підйом	Siemens SIMOTICS N-compact	2	250	1000	420	-	-

Основні механізми крана - головний підйом на головному візку, допоміжні підйоми на допоміжному візку і механізм пересування крана.

Головний візок за допомогою механізму підйому переміщує ковш з розплавленим металом, допоміжний візок за допомогою допоміжного підйому повертає ковш при розвантаженні.

З огляду на призначення ливарного крана, основною вимогою до електроустаткування слід вважати забезпечення високої надійності при виконанні всіх технологічних операцій і мінімізація непланових простоїв. Виходячи з цього, а також, використовуючи раніше отриманий нами досвід розробки електроприводів кранових механізмів, прийняті основні рішення при виборі елементів електрообладнання. Для електроприводів механізмів крана застосовані асинхронні електродвигуни фірми Siemens.

Для електроприводу пересування крана використані чотири електродвигуни серії SIMOTICS SD 1LG4, 30кВт, 1000об/хв [9]. Механізм пересування головного візку оснащений двома електродвигунами цієї ж серії, але 18 кВт, 1000об/хв, а механізм пересування допоміжного візка - одним електродвигуном цієї ж серії, але 11 кВт, 1000 об/хв.

Електродвигуни пересування візків мають вбудовані гальма. Механізм головного підйому приводиться двома електродвигунами серії SIMOTICS N-compact, 250 кВт, 1000 об/хв, механізм першого допоміжного підйому - одним електродвигуном цієї ж серії, але 250 кВт, 1000об/хв, а механізм другого допоміжного підйому - одним електродвигуном, повністю ідентичним приводним електродвигунам механізму пересування крана, але з примусовою вентиляцією.

Живлення і регулювання швидкості приводних електродвигунів виконується від перетворювачів частоти по системі ПЧ-АД. Застосовані рекуперативні перетворювачі частоти - фірми Siemens, серії SINAM-ICS S120 в модульному виконанні [10].

Однолінійна схема живлення частотних електроприводів крана показана на рисунку 1.2.

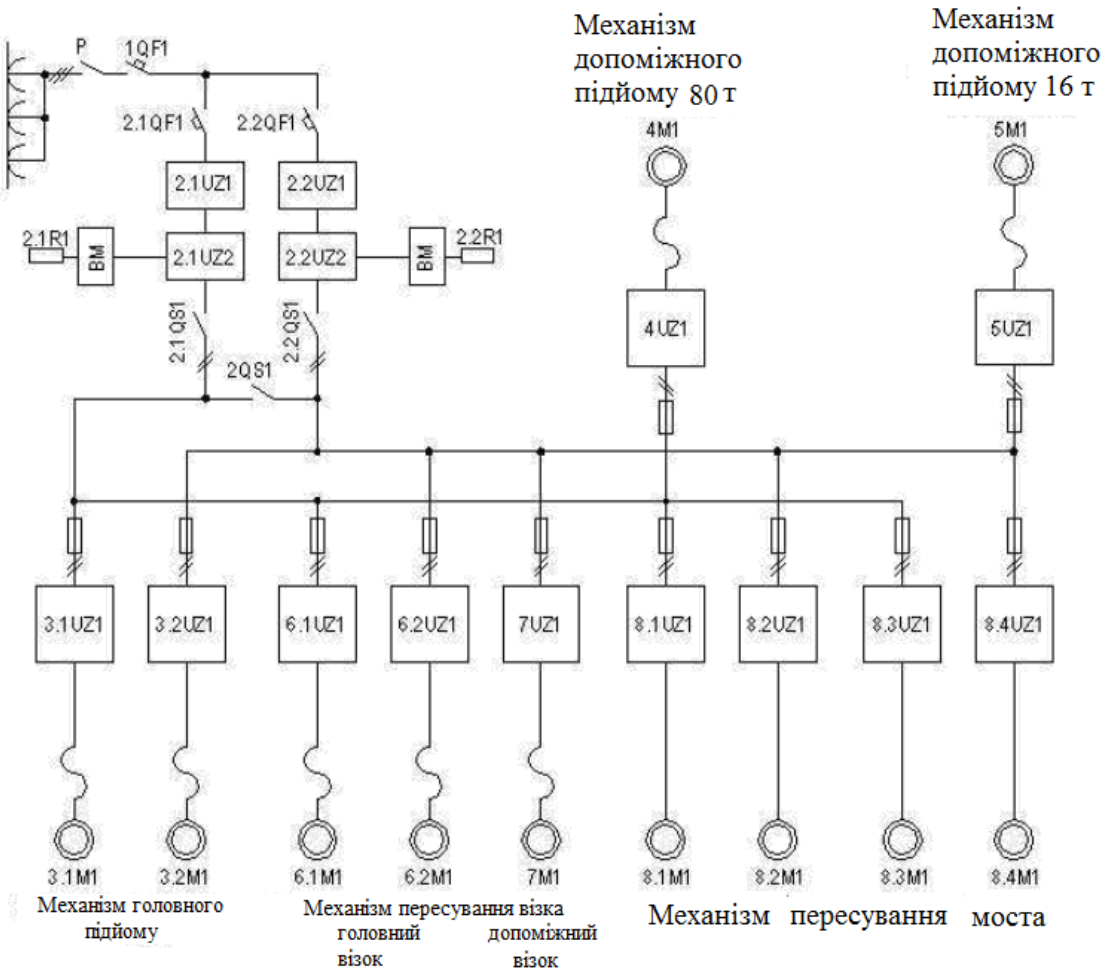


Рисунок 1.2 − Однолінійна схема живлення частотних електроприводів крана

Схема живлення частотних перетворювачів виконана із загальною ланкою постійного струму, це ланка складається з двох паралельно включених рекуперативних перетворювачів.

До складу кожного з цих перетворювачів входять активний інтерфейсний модуль (2.1UZ1, 2.2UZ1) і модуль рекуперативного випрямляча (2.1UZ2, 2.2UZ2). Електроприводи крана об'єднані в дві групи, кожна з яких підключена до одного з перетворювачів. При аварійному виході з ладу будь-якого з модулів зазначених перетворювачів живлення всіх електроприводів крана можна здійснити від одного перетворювача (рубильники 2QS1, 2.1QS1, 2.2QS1), при цьому працездатність крана зберігається, але з деяким зниженням продуктивності.

Для забезпечення підвищеної надійності електроприводів всі електродвигуни механізмів крана отримують живлення від індивідуальних

інверторів напруги. Інвертори напруги електроприводів головного підйому 125 т 3.1UZ1 і 3.2UZ1 і допоміжного підйому 80т 4UZ1 мають типорозмір формату шасі, а інвертори електроприводів допоміжного підйому 16т 5UZ1, механізмів пересування візків 6.1UZ1, 6.2UZ1, 7UZ1 і пересування крана 8.1UZ1, 8.2UZ1, 8.3UZ1 і 8.4UZ1 - книжкового формату.

Для запобігання некерованого руху вантажу при раптовому зникненні напруги на живлячих тролеях крана передбачено динамічне гальмування працюючих електроприводів за допомогою гальмівних модулів BM і зовнішніх гальмівних резисторів 2.1R1 і 2.2R1.

Управління, обмін даними і інформація стану активних інтерфейсних модулів, рекуперативних випрямлячів і інверторів здійснюється модулями управління CU320.

Кожен модуль CU320 управляє певною групою електроприводів і має карту пам'яті для збереження конфігурації побудованої мережі, параметрів настройки приводів. Обмін даними між активними інтерфейсними модулями, рекуперативними випрямлячами, інверторами і модулями CU320 проводиться по мережі DRIVE-CLIQ відповідно до обраної структури управління.

Система автоматичного регулювання частоти обертання електродвигунів побудована за принципом векторного управління: з датчиком зворотного зв'язку по швидкості - для електроприводів головного і допоміжних підйомів і безсенсорна - для електроприводів пересування крана та візків.

Механізми всіх підйомів і пересування крана оснащені дисковими гальмами з гідравлічними штовхачами, механізми пересування обох візків - вбудованими в електродвигуни дисковими гальмами. На канатному барабані головного підйому встановлені аварійні гальма.

Автоматизована система управління електроприводами крана побудована за трирівневою схемою. Нижній рівень складають перетворювачі частоти, датчики і виконавчі механізми. Середній рівень - основний програмований логічний контролер (ПЛК). Верхній рівень визначають операторські панелі з сенсорним управлінням.

В якості основного керуючого ПЛК використаний контролер фірми Siemens серії S7-300 [11]. Цей ПЛК конструктивно складається з двох частин:

- основна, містить центральний процесор, комунікаційний процесор Profibus, інтерфейсний модуль розширення і частина модулів введення / виведення;

- дистанційна, в кабіні машиніста, в неї входять модулі вводу / виводу, що забезпечують прийом сигналів від органів управління крісла-пульта кранівника і управління світлосигнальної та освітлювальної апаратури.

У систему управління входять чотири основні підсистеми: підсистема управління, підсистема візуалізації, підсистема загальної діагностики і підсистема діагностики стану основних підшипникових вузлів. Основна підсистема управління виконує наступні функції:

- формування сигналів для керування режимами роботи всіх механізмів крана, відповідно до команд машиніста, в тому числі сигналів, що забезпечують синхронну роботу головного і одного з допоміжних підйомів і синхронну роботу головною і допоміжного візка;

- зміна конфігурації силової схеми багатодвигунового електроприводу при необхідності і відповідну зміну параметрів окремих електроприводів;

- управління апаратної підготовкою електроприводів до роботи - включення керованих силових агрегатів, контроль всіх видів напруги живлення;

- збір і обробка інформації про стан некерованих апаратів схем управління і т.п. Підсистема візуалізації управління призначена для створення інформаційного забезпечення процесу управління механізмами крана з використанням мнемосхем електрообладнання.

Ця підсистема побудована з використанням двох мультифункціональних операторських панелей з сенсорним управлінням типу MP277 фірми Siemens.

Підсистема діагностики забезпечує формування попереджувальних і аварійних повідомлень про стан електроприводів і релейно-контакторної апаратури в процесі роботи, а також формує архів визначених повідомлень на протязі необхідного терміну тривалості.

Застосована вперше на такому об'єкті підсистема діагностики стану підшипникових вузлів механізмів крана побудована за дворівневою схемою. Нижній рівень складають датчики температури і вимірювальні перетворювачі. Верхній рівень цієї підсистеми - додатковий ПЛК.

У якості цього ПЛК використаний програмований контролер фірми Siemens серії S7-300. Цей ПЛК здійснює обробку сигналів, що надходять від датчиків температури і по мережі MPI передає їх в основний ПЛК системи управління електроприводами крана. Значення температури виводяться на операторські панелі системи управління краном.

Обмін інформаційними і керуючими сигналами між основним ПЛК, перетворювачами частоти, операторськими панелями і додатковим ПЛК проводиться по мережі Profibus DP.

Налагодження електроприводів і системи управління проведена в стислі терміни частково з використанням програм автоналагодження, що входять в програмне забезпечення перетворювачів частоти, і частково використовуючи досвід налагодження подібних механізмів, виходячи з отриманих результатів.

Особлива увага приділялася налагодженню систем регулювання швидкості. Так, інвертори електродвигунів всіх механізмів підйому налаштовані в режим векторного управління з використанням імпульсних датчиків швидкості електродвигунів, а регулятори швидкості цих електродвигунів - пропорційно-інтегральні. У той же час інші інвертори електроприводів введені в режим векторного безсенсорного управління, регулятори швидкості багатодвигунових електроприводів пересування головного візка і крана - пропорційні, а регулятор швидкості електроприводу пересування допоміжного візка - пропорційно-інтегральний, і має відносно невисоку швидкодію. Досвід налагодження електроприводів механізмів пересування крана та візків показав, що мати швидкодіючий ПІ регулятор швидкості недоцільно, а доцільніше мати пропорційні регулятори.

Результати налагодження електропривода головного підйому видно на осцилограмах рисунки 1.3, 1.4.

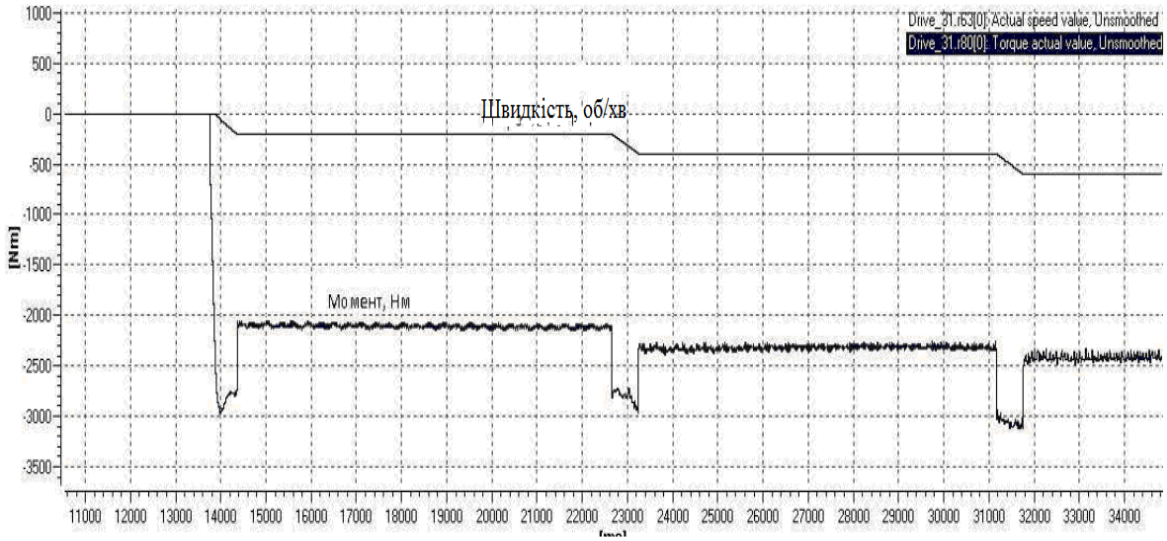


Рисунок 1.3 − Розгон електроприводу підйому

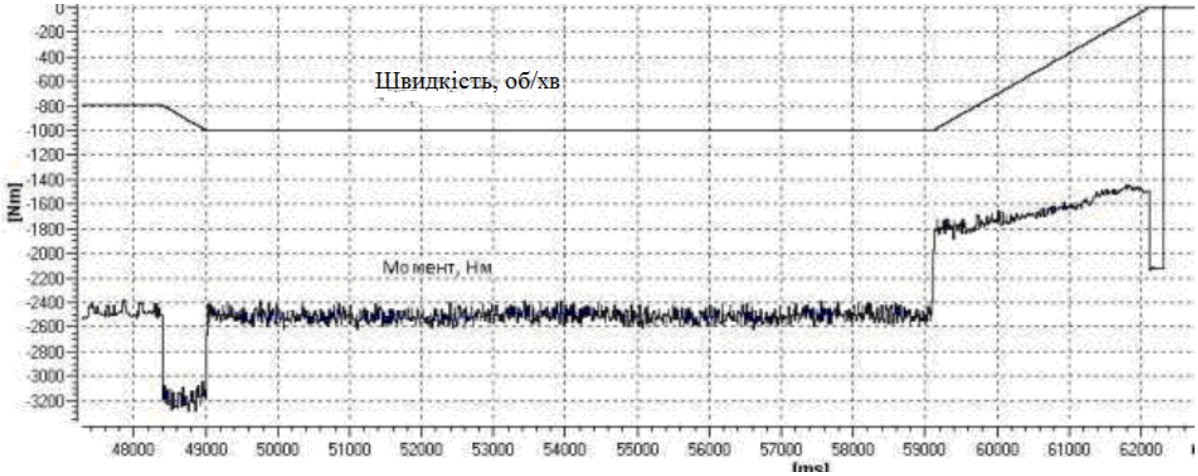


Рисунок 1.4 − Підрозгон і гальмування електропривода підйому

Особливу увагу вимагало налагодження систем управління електромеханічними гальмами електроприводів підйому.

Управління гальмами кожного механізму підйому здійснюється програмним забезпеченням відповідного інвертора. Існуючий в програмі алгоритм цього управління вимагав при налагодженні деякого коректування. У початковий момент пуску електроприводу відбувається наростання струму намагнічування електродвигуна, при цьому завдання на швидкість на вході задатчика інтенсивності дорівнює нулю. Тільки після закінчення певного часу і за умови досягнення намагнічуючим струмом заданого значення програма видає команду «відкрити гальмо» на відповідний релейний вихід.

«Закриття» гальма відбувається в наступному порядку: після подачі команди на зупинку електропривода проводиться зниження швидкості згідно з темпом задатчика інтенсивності (ЗІ). При досягненні певного, але не нульового значення швидкості (близько 5-10% від номінального), видається команда «закриття» гальма. При налагодженні подібних систем слід мати на увазі, що з моменту подачі команди на «закриття» гальма до моменту фактичного його спрацьовування проходить певний час, він залежить від механічних і електромеханічних процесів в системі управління. Цей час слід враховувати при корекції програми роботи системи гальмування в режимах пуску та зупинки. Неточна корекція може призводити до «відкатів» вантажу при рушанні або зупинці, як показано на осцилограмі рисунок 1.5. Нормальна робота системи управління гальмом показана на осцилограмі рисунок 1.6.

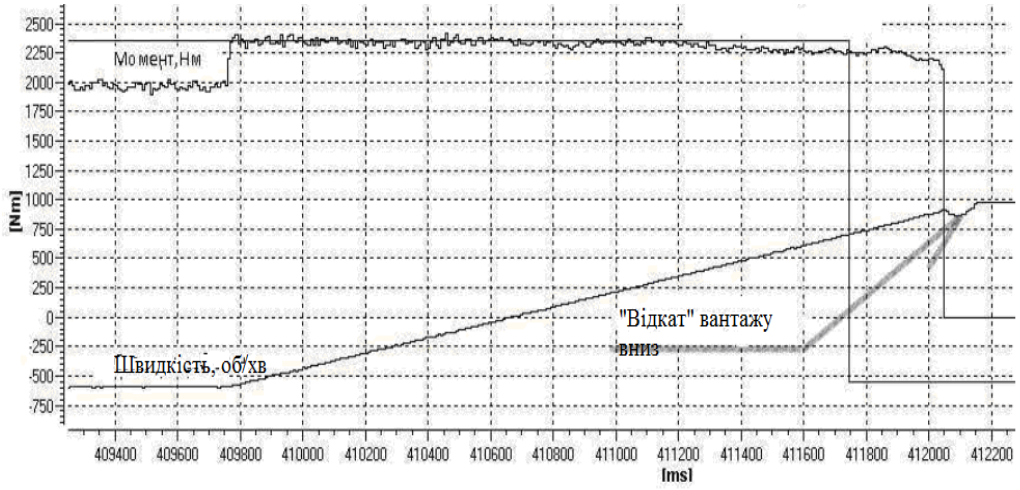


Рисунок 1.5 − Гальмування електропривода підйому (корекція неточна)

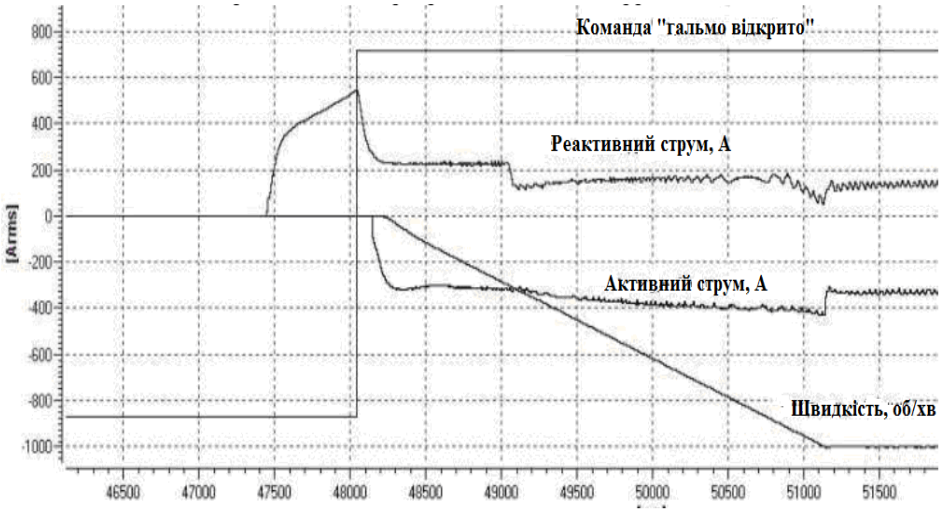


Рисунок 1.6 − Рушання електроприводу головного підйому

У зв'язку з цим актуальними задачами дослідження є:

1) розробка математичної моделі асинхронного електроприводу механізму підйому вантажу, яка включає в себе перетворювальний пристрій.

2) оцінка динаміки роботи асинхронного двигуна від частотного перетворювача за допомогою графіків перехідних процесів.

2 Дослідження динамічних режимів роботи мостового крана

2.1 Вибір системи електропривода

Останнім часом намітилась тенденція до застосування в механізмах підйомно-транспортних машин частотно-регульованого приводу. При реконструкції застарілих кранів реостатно-регульовані електроприводи, якими вони, як правило, обладнані, також все частіше замінюються на частотно-регульовані [1–8].

При цьому застосування частотного керування у крановому електроприводі досліджено недостатньо. Частотне керування приводами докладно описане в роботах із загальної теорії електропривода, але в більшості робіт розглядається електропривод загального призначення, а головна увага приділяється електричним параметрам двигунів і перетворювальної техніки, як, наприклад, в роботах [5,6].

У галузі підйомно-транспортних машин питання застосування частотно-регульованого електропривода досліджувалося протягом багатьох років і на сьогодні є одним із найбільш розвинених напрямів сучасної електромеханіки. Значна кількість наукових праць, присвячених електроприводам кранових механізмів, підтверджує, що саме частотне регулювання дозволяє найбільш ефективно вирішувати задачі плавного пуску, точного позиціонування вантажу, зменшення динамічних навантажень та підвищення енергоефективності технологічних процесів [2,4]. Дослідження, проведені як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями, охоплюють питання математичного моделювання електроприводів, оптимізації алгоритмів керування, вдосконалення систем автоматичного регулювання швидкості, а також підвищення надійності роботи механізмів у складних виробничих умовах.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють асинхронним електроприводам, які працюють у складі систем «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Це пояснюється тим, що асинхронні двигуни

відзначаються простотою конструкції, високою надійністю, відносно невеликою вартістю обслуговування та здатністю працювати у важких експлуатаційних режимах. У поєднанні з сучасними перетворювачами частоти вони забезпечують широкі можливості регулювання швидкості, стабілізації режимів роботи та адаптації електропривода до змін навантаження. Саме тому у більшості сучасних мостових, козлових та ливарних кранів усе частіше застосовуються частотно-регульовані системи керування.

Аналіз останніх тенденцій розвитку кранових електроприводів показує, що традиційні релейно-контакторні системи поступово втрачають актуальність. Хоча вони тривалий час широко використовувалися на промислових підприємствах, їх основними недоліками є значні пускові струми, різкі механічні ривки, підвищений знос механічних вузлів та складність забезпечення плавного регулювання швидкості. Крім того, такі системи мають обмежені можливості автоматизації та не дозволяють ефективно реалізовувати сучасні алгоритми керування технологічними процесами. У результаті цього значно збільшуються витрати на технічне обслуговування обладнання, скорочується ресурс механічних елементів і підвищується ризик виникнення аварійних ситуацій.

На відміну від застарілих систем, частотно-регульований електропривод забезпечує плавний розгін і гальмування механізму, що суттєво знижує динамічні навантаження на редуктори, барабани, канати та металоконструкції крана. Завдяки цьому підвищується довговічність обладнання та зменшується ймовірність виникнення механічних пошкоджень. Особливо важливим це є для мостових кранів великої вантажопідйомності, які працюють у металургійній промисловості, де механізми експлуатуються в умовах високих температур, пилу, вібрацій та значних перевантажень.

Останній практичний досвід застосування частотно-регульованих приводів у кранових механізмах [1–3] переконливо доводить їх актуальність та економічну доцільність. На багатьох підприємствах модернізація електроприводів дозволила суттєво скоротити споживання електроенергії, підвищити продуктивність роботи кранів та покращити якість виконання вантажопідйомних операцій. Використання

сучасних систем векторного керування забезпечує високу точність підтримання швидкості навіть при зміні маси вантажу або виникненні зовнішніх збурень. Це особливо важливо під час транспортування рідкого металу, великогабаритних конструкцій чи інших небезпечних вантажів, де будь-які коливання можуть призвести до аварійної ситуації.

Крім того, застосування частотних перетворювачів створює широкі можливості для впровадження автоматизованих систем керування, діагностики та моніторингу технічного стану обладнання. Сучасні перетворювачі частоти можуть інтегруватися у промислові мережі та працювати спільно з програмованими логічними контролерами, системами диспетчеризації та цифровими платформами управління виробництвом. Це дозволяє здійснювати контроль параметрів роботи електропривода у режимі реального часу, оперативно виявляти несправності та прогнозувати технічний стан обладнання.

Таким чином, сучасний розвиток підйомно-транспортної техніки підтверджує, що використання частотно-регульованого електропривода є не лише технічно обґрунтованим, але й стратегічно важливим напрямом модернізації промислових підприємств. Застосування таких систем дозволяє забезпечити підвищення енергоефективності, надійності та безпеки роботи кранових механізмів, а також створює передумови для подальшого розвитку інтелектуальних систем автоматичного керування у галузі електромеханіки.

2.2 Розрахунок параметрів та вибір елементів силової частини електропривода

В таблиці 2.1 наведено вихідні дані розрахунку механізму допоміжного підйому мостового крана

Таблиця 2.1− Вихідні дані розрахунку механізму допоміжного підйому мостового крана

Вантажопідйомність, т	$G_{гр}$	80
Вага вантажозахватного обладнання, т	G_0	10
Швидкість піднімання вантажу, м/хв.	$V_п$	12
Висота піднімання вантажу, м	H	16
Режим роботи крана	-	Важкий
Тривалість включення механізму, %	ПВ	35
Тип підшипника блоку поліспаста	-	гойдання
ККД механізму при номінальному навантаженні, %	$\eta_{нп}$	90
Синхронна швидкість обертання двигуна на 380В, об/хв	n_0	750(1000)

Поліспаст характеризується його кратністю або передавальним числом:

$$i_п = \frac{v_б}{v_п} = \frac{z}{a}, \qquad (2.1)$$

де z – число несучих гілок канату в поліспасті; a – число гілок канату, що спускаються з барабана; $v_б$ – навколишня швидкість барабану м/с; $v_п$ – швидкість піднімання вантажу.

В кранах застосовуються тільки здвоєні поліспасти, тому число гілок канату, що спускаються з барабана, завжди рівно a = 2. З [12] для вантажопідйомності 80 т вибираємо поліспаст для блоків на підшипниках із $\eta_п$ = 0,90. Число несучих гілок канату z = 10. Таким чином згідно з (2.1):

$$i_п = \frac{10}{2} = 5.$$

Згідно з [12], канат слід вибирати за розрахунковим розривним зусиллям каната $S_р$ в наступному порядку з урахуванням того, що при виході зі строю одного з двигунів, вантаж необхідно піднімати за допомогою одного робочого АД, тому в якості номінальної ваги вантажу необхідно врахувати це відповідним коефіцієнтом запасу $К_З$=1,562:

а) визначається найбільше зусилля S, що приходиться на одну гілку каната:

$$S = \frac{G_{гр} + G_0}{z \cdot \eta_п}, \qquad (2.2)$$

де $G_{гр}$ – номінальна вага вантажу, що піднімається, Н; G_0 – вага вантажозахватного пристрою, Н; z − число несучих гілок канату в поліспасті; $\eta_п$ – коефіцієнт корисної дії поліспаста.

$$S = \frac{(125+10)\cdot 10^3 \cdot 9{,}81}{10 \cdot 0{,}9} = 98{,}800 \text{ кН},$$

б) визначається розрахункове розривне зусилля:

$$S_р = к_з \cdot S \qquad (2.3)$$

де $к_з = 5{,}5$ – коефіцієнт запасу міцності канату, з [4], для важкого режиму роботи механізму підйому.

Вибір канату згідно ДСТУ здійснюється за розрахунковим розривним зусиллям $S_р$ з [5], при цьому повинна виконуватися умова:

$$S_к \geq S_р,$$

де $S_к$ – найбільше розривне зусилля у вибраному з [12] канаті.

$$S_р = 5{,}5 \cdot 98{,}800 = 543{,}361 \text{ кН}.$$

Обираємо [13] канат типу ЛК-З 1666, що має діаметр $d_К = 35{,}5$ мм, $S_К = 600$ кН.

Розрахуємо фактичний коефіцієнт запасу міцності вибраного каната $к_{з.ф}$:

$$\kappa_{з.ф} = \frac{S_k}{S} = \frac{600}{98{,}8} = 6{,}073$$

Діаметр канатного барабана визначається за формулою [12]:

$$D_б \geq (e\text{-}1)\cdot d_k\ , \qquad (2.4)$$

де e – коефіцієнт, який залежить від режиму експлуатації механізму [13]; d_k – діаметр каната, мм.

$$D_б = (25\text{-}1)\cdot 35{,}5 = 852 \text{ мм.}$$

Вибір барабана проводиться по розрахунковому діаметру $D_б$, діаметру канату d_k і висоті піднімання вантажу [12].Так як стандартні барабани не підходять виготовляємо барабан на заказ БК860 з такими параметрами: $D_б$ = 860 мм, діаметр канату d_k = 35,5мм, висота підйому h = 16м.

За заданою швидкістю піднімання вантажу υ_n і синхронною швидкістю електродвигуна n_o розраховується передаточне число редуктора:

$$i_p = \frac{n_o}{n_б} = \frac{\omega_o}{\omega_б}, \qquad (2.5)$$

Де $n_б$ – швидкість обертання барабана, об/хв.; $\omega_б$ – кутова швидкість барабана, рад/с; ω_0 – синхронна кутова швидкість електродвигуна, рад/с:

$$\omega_o = \frac{\pi n_o}{30} = \frac{3{,}14\cdot 1000}{30} = 104{,}72 \text{ рад/с.}$$

Кутова швидкість барабана визначається співвідношенням:

$$\omega_б = \frac{2\cdot \upsilon_k}{D'_б}; \qquad (2.6)$$

де v_k – швидкість каната, навиваного на барабан $v_k = v_п \cdot i_п$; $v_п$ – швидкість підйому вантажу; $i_п$ – кратність поліспаста.

$$v_k = 12 \cdot 10 = 120 \text{ м/хв.}$$

$$\omega_б = \frac{2 \cdot 120}{60 \cdot 860 \cdot 10^{-3}} = 3,28 \text{ рад/с.}$$

Таким чином, передаточне число редуктора, необхідне для розрахунку статичних моментів механізму піднімання, дорівнює:

$$i_р = \frac{104,72}{3,28} = 31,94 .$$

Редуктор вибираємо пізніше, виходячи з розрахункової потужності, числа обертів вала електродвигуна, передаточного числа і режиму роботи механізму.

Статичний момент, який розвиває електродвигун і який приведений до його валу, при підйомі корисного (номінального) вантажу визначається за формулою:

$$M_{с.1} = \frac{(G + G_о) \cdot D'_б}{2 \cdot i_п \cdot i_р \cdot \eta_н}, \qquad (2.7)$$

де G – вага корисного (номінального) вантажу, Н; G_0 – вага вантажозахватного пристрою, Н; $D'_б$ – діаметр барабана, м; $\eta_н$ – ККД підйомного механізму, що враховує втрати на тертя в редукторах, барабані, підшипниках, блоках $\eta_н = 0,9$ [5].

Повне передатне число: $i = i_Р \cdot i_П = 31,94 \cdot 5 = 160$.

$$M_{с.1} = \frac{(125 + 10) \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,86}{2 \cdot 160 \cdot 0,9} = 2636 \text{ Н·м.}$$

Статичний момент при підніманні порожнього вантажозахватного пристрою розраховують за формулою:

$$M_{с.2} = \frac{G_0 \cdot D'_б}{2 \cdot i_п \cdot i_р \cdot \eta_0} \quad (2.8)$$

Де η_0 – ККД холостого ходу (G=0), який визначається за кривою, відповідно співвідношенню (2.9) і $\eta_н$ =0,9 [5].

$$\frac{G_0}{G_н + G_0} = \frac{10}{125+10} = 0,099. \quad (2.9)$$

Із графіків, ККД холостого ходу $\eta_0 = 0,38$.

$$M_{с.2} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,86}{2 \cdot 160 \cdot 0,38} = 693 \text{ Н·м.}$$

При гальмівному спуску номінального вантажу $G_н$:

$$M_{с.3} = \frac{(G_н + G_0) \cdot D'_б \cdot \eta_н}{2 \cdot i_п \cdot i_р}, \quad (2.10)$$

$$M_{с.3} = \frac{(125+10) \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,86 \cdot 0,9}{2 \cdot 160} = 2135 \text{ Н·м.}$$

При силовому спуску порожнього (G = 0) вантажозахватного пристрою момент, що розвивається електродвигуном, розраховується за формулою:

$$M_{с.4} = \frac{G_0 \cdot D'_б}{2 \cdot i_п \cdot i_р}\left(\frac{1}{\eta_0} - 2\right), \quad (2.11)$$

$$M_{с.4} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,86}{2 \cdot 160} \cdot \left(\frac{1}{0,38} - 2\right) = 166 \text{ Н·м.}$$

Попередній вибір потужності двигуна механізму здійснюється методом середньоквадратичного моменту:

$$M_{ср} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 t_2 + M_{c3}^2 t_3 + M_{c4}^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}, \qquad (2.12)$$

де t_1, t_2, t_3, t_4 – тривалість роботи механізму в режимах піднімання і спуску вантажу при відповідних статичних моментах.

При відсутності точних даних про час перехідних процесів приймають $t_1=t_2=t_3=t_4$, тоді вираз (2.12) матиме вигляд:

$$M_{ср} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 + M_{c2}^2 + M_{c3}^2 + M_{c4}^2}{4}}, \qquad (2.13)$$

$$M_{ср} = \sqrt{\frac{2636^2 + 693^2 + 2135^2 + 166^2}{4}} = 1733 \text{ Н·м.}$$

Для врахування перехідних процесів в електроприводі при пуску і гальмуванні попередній розрахунок потужності двигуна, кВт, здійснюється з деяким запасом:

$$P = K_1 \cdot M_{ср} \cdot \omega_0 \cdot 10^{-3} \qquad (2.14)$$

де $K_1=1,2$ – коефіцієнт запасу, що враховує вплив динамічних навантажень.

$$P = 1,2 \cdot 1733 \cdot 104,72 \cdot 10^{-3} = 217,7 \text{ кВт.}$$

Перерахунок потужності двигуна, кВт, на стандартну тривалість (ТВ) у відсотках проводиться за спрощеною формулою:

$$P_к = P \cdot \sqrt{\frac{ТВ\%}{ТВ_к\%}}, \qquad (2.15)$$

де $Р_к$ – розрахункова потужність двигуна, що відповідає стандартній тривалості включення $ТВ_к$, %; Р – потужність двигуна при розрахунковій (заданій) тривалості включення ТВ,%.

$$P_к = 217,7 \cdot \sqrt{\frac{35}{40}} = 203,6 \text{ кВт.}$$

За розрахунковим значенням потужності $Р_к$ та відповідній їй стандартній тривалості включення $ТВ_к$, а також за заданою синхронною швидкістю ω_0 проводимо попередній вибір двигуна за каталогом [1], при цьому слідкуємо за виконанням умови:

$$Р_н > Р_к, \qquad (2.16)$$

де $Р_н$ – номінальна потужність вибраного двигуна.

Обираємо двигун SIMOTICS N-compact параметри якого наведені у таблиці 2.2 [9].

Таблиця 2.2 − Параметри двигуна SIMOTICS N-compact

Р, кВт	$n_н$, об/хв	$I_{1н}$, А	cosφ	η %	$М_{макс}$, Нм	GD^2, кгм^2
250	960	420	0,85	88	4723	26,5

Після вибору двигуна слід уточнити передаточне число редуктора і визначити фактичну швидкість піднімання вантажу $\upsilon_{пф}$:

$$i_р^* = \frac{\omega_н}{\omega_0} \cdot i_р = \frac{n_н}{n_0} \cdot i_р \ , \qquad (2.17)$$

де $i_р$ – передаточне число редуктора з урахуванням; $\omega_н$ – номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с; $n_н$ – номінальна швидкість обертання валу двигуна, об/хв.

$$i_p^* = \frac{960}{1000} \cdot 31{,}94 = 30{,}66$$

За потужністю $P_н$, уточненим передавальним числом $i_р$* та заданим режимом роботи крана, користуючись [14] вибираємо редуктор Ц2-500, що має загальне передаточне число $i_р = 24{,}9$; потужність $P_{рн} = 260$ кВт.

Фактична швидкість піднімання вантажу:

$$\upsilon_{п.ф} = \frac{30 \cdot \omega_н \cdot D'_б}{2 \cdot i_{р.ст} \cdot i_п} \ , \qquad (2.18)$$

де $i_{р.ст}$ – стандартне передаточне число вибраного редуктора ($i_{р.ст} = 24{,}9$).

$$\omega_н = \frac{\pi \cdot n_н}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 960}{30} = 100{,}53 \text{ рад/с}$$

$$\upsilon_{п.ф} = \frac{30 \cdot 100{,}53 \cdot 0{,}86}{2 \cdot 24{,}9 \cdot 5} = 14{,}78 \text{ м/хв.}$$

Отримане значення $\upsilon_{пф}$ мало відрізняється від величини заданої швидкості піднімання $\upsilon_п = 12$м/хв. Знайдемо похибку:

$$\Delta\upsilon_n\% = \left|\frac{\upsilon_{пз} - \upsilon_{пф}}{\upsilon_{пз}}\right| = \left|\frac{12 - 14{,}78}{12}\right| \cdot 100 = 2{,}3\%$$

Оскільки припустима похибка у 7%, то розрахунок вважаємо задовільним.

Вибір гальмівного пристрою механізму здійснюється за умовами надійного утримання вантажу в піднятому стані. Для розрахунку необхідного в цьому випадку гальмівного моменту $M_т$ використовується співвідношення:

$$M_г = K_т \cdot M_{с3}, \qquad (2.19)$$

де $M_{с3}$ – статичний момент при спуску номінального вантажу; $K_т$ – коефіцієнт запасу гальмування, що вибраний [5] для важкого режиму роботи ($K_т$ = 1,75).

$$M_г = 1{,}75 \cdot 2135 = 3736 \text{ Н·м.}$$

Знаючи величину гальмівного моменту $M_т$, з [14] обираємо колодочне гальмо з гідроштовхачем ТКТГ-500М з такими параметрами: гальмівний момент $M_г$ = 4000 Н·м; маса m = 210 кг; діаметр гальмівного шківа $d_ш$ = 500 мм.

За діаметром гальмівного шківа $d_ш$ = 500 мм, підбираємо з'єднувальну втулочно-пальцеву муфту, що призначена для механічного сполучення привідного двигуна з редуктором. Муфта обирається [14] і має наступні технічні характеристики: найбільший момент що передається, M_{max} = 7000 Н·м; момент інерції, J_M = 5,1 кг·м^2; маса m = 175 кг.

Щоб перевірити попередньо вибрані двигуни механізмів крану на нагрівання, необхідно побудувати навантажувальні діаграми електроприводів для заданого циклу роботи.

Навантажувальну діаграму механізму піднімання (протягом циклу) представимо як діаграму, що складається з навантажень приводу при підніманні

та опусканні номінального вантажу, а також при підніманні та опусканні порожнього вантажозахватного пристрою за відсутності електричного гальмування.

Час пуску приводу при цьому визначається як:

$$t_{п.і} = \frac{J_{пр.і} \cdot \omega_н}{M_{п.ср} \pm M_{сі}}, \qquad (2.20)$$

де $t_{п.і}$ – час пуску на і-ій дільниці навантажувальної діаграми, с; $J_{пр.і}$ – приведений до валу двигуна момент інерції всіх мас, що обертаються та поступально рухаються при підйомі і опусканні вантажів, кг·м^2; $M_{п.ср}$ – середній пусковий момент привідного двигуна, Н·м; $\omega_н$ – номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с; $M_{с.і}$ – статичний момент на валу двигуна при підйомі і опусканні вантажів, Н·м.

Знак «мінус» в формулі (2.20) відповідає пуску двигуна при підйомі вантажу, знак «плюс» – при його опусканні.

Приведений до валу двигуна момент інерції при підйомі вантажу:

$$J_{пр\,і} = \delta \cdot (J_д + J_м) + G_i \cdot \frac{(\upsilon_{п.ф})^2}{\omega_н^2 \cdot \eta_н}, \qquad (2.21)$$

де $m_і$ – маса вантажів, що рухаються поступально, кг; $\upsilon_{п.ф}$ – фактична швидкість переміщення вантажу, м/с; η – ККД механізму піднімання; δ – коефіцієнт, що враховує моменти інерції частин що обертаються повільніше, ніж вал електродвигуна (δ = 1,05-1,25 , приймаємо δ = 1,1); $J_д$, $J_м$ – моменти інерції відповідно ротора привідного електродвигуна та муфти з гальмівним шківом, кг·м^2.

$$J_д = \frac{GD^2}{4} = \frac{26,5}{4} = 6,625 \text{ кг·м}^2;$$

$$J_{пр\ 1} = 1{,}1 \cdot (6{,}625 + 5{,}1) + (80 + 10) \cdot \frac{(14.78)^2}{100{,}53^2 \cdot 0{,}9} = 11{,}53 \text{ кг·м}^2;$$

Приведений до валу двигуна момент інерції при гальмівному спуску вантажів співвідношення (2.21) прийме вигляд:

$$J_{пр.i} = \delta \cdot (J_д + J_м) + G_i \cdot \frac{(\upsilon_{п.ф})^2 \cdot \eta_н}{\omega_н^2}, \qquad (2.22)$$

$$J_{пр.3} = 1{,}1 \cdot (6{,}625 + 5{,}1) + (80 + 10) \cdot \frac{(14{,}78)^2 \cdot 0{,}9}{100{,}53^2} = 11{,}27 \text{ кг·м}^2.$$

Приведений до валу двигуна момент інерції при підйомі порожнього вантажозахватного пристрою:

$$J_{пр.\ .2} = 1{,}1 \cdot (6{,}625 + 5{,}1) + 10 \cdot \frac{(14{,}78)^2}{100{,}53^2 \cdot 0{,}38} = 10{,}29 \text{ кг·м}^2.$$

Приведений до валу двигуна момент інерції при спуску порожнього вантажозахватного пристрою:

$$J_{пр.\ .4} = 1{,}1 \cdot (6{,}625 + 5{,}1) + 10 \cdot \frac{(14{,}78)^2 \cdot 0{,}38}{100{,}53^2} = 10{,}17 \text{ кг·м}^2.$$

Середній пусковий момент двигуна:

$$M_{п.ср} = \frac{M_1 + M_2}{2} \qquad (2.23)$$

де M_1 – пусковий момент; M_2 – момент переключення.

Для знаходження пускового моменту необхідно визначити кратність λ_m, тобто відношення максимального і номінального моментів вибраного двигуна:

$M_н$ визначається співвідношенням:

$$M_н = \frac{P_{ном}}{\omega_н} = \frac{250000}{100,53} = 2486,98 \text{ Н·м.}$$

$$\lambda_m = \frac{M_{\max}}{M_н} = \frac{4723}{2486} = 1,89.$$

Для асинхронних двигунів, які мають кратність по максимальному моменту $\lambda_m > 1,9$, пусковий момент може бути прийнятий:

$$M_1 = (2 \div 2.5)M_н , \qquad (2.24)$$

де $M_н$ – номінальний момент двигуна.

$$M_1 = 2,5 \cdot M_н = 2,5 \cdot 2486,98 = 6215 \text{ Н·м.}$$

Момент переключення:

$$M_2 = 1,2 \cdot M_{ср} = 1,2 \cdot 1733 = 2079 \text{ Н·м,}$$

де $M_{ср}$ – середній статичний момент механізму піднімання, розрахований по співвідношенню (2.12).

Таким чином, маючи значення M_1 і M_2 визначаємо середній пусковий момент двигуна за співвідношенням (2.23):

$$M_{п.ср} = \frac{6215 + 2079}{2} = 4147 \text{ Н·м.}$$

За формулою (2.20) знаходимо час пуску приводу при підніманні номінального вантажу:

$$t_{n.1} = \frac{11,53 \cdot 100,53}{4147 - 2636} = 2,58 \text{ с.}$$

Час пуску приводу при підніманні порожнього вантажозахватного пристрою:

$$t_{n.2} = \frac{10,29 \cdot 100,53}{4147 - 693} = 0,68 \text{ с.}$$

Час пуску приводу при опусканні номінального вантажу:

$$t_{n.3} = \frac{11,27 \cdot 100,53}{4147 + 2135} = 0,43 \text{ с.}$$

Час пуску приводу при опусканні порожнього вантажозахватного пристрою за відсутності електричного гальмування:

$$t_{n.4} = \frac{10,17 \cdot 100,53}{4147 + 166} = 0,61 \text{ с.}$$

Сумарний час пуску за цикл:

$$\sum_{i=1}^{n} t_{п.i} = t_{п.1} + t_{п.2} + t_{п.3} + t_{п.4}, \qquad (2.25)$$

$$\sum_{i=1}^{n} t_{n.i} = 2,58 + 0,68 + 0,43 + 0,61 = 4,31c.$$

Знаючи фактичну швидкість переміщення $\upsilon_{п.ф}$ і висоту піднімання вантажу Н, визначається час руху, що встановився при підніманні номінального вантажу:

$$t_y = \frac{0{,}5 \cdot H \cdot 60}{\upsilon_{п.ф}} = \frac{0{,}5 \cdot 16 \cdot 60}{14{,}78} = 32{,}48 \text{ с.} \qquad (2.26)$$

Розрахунок і вибір двигуна механізму ми проводили без розрахунку динамічних навантажень при пуску та гальмуванні двигуна. Ці навантаження ми врахували в коефіцієнті запасу $К_1$.

Час гальмування ми не визначаємо, оскільки гальмування проходить за допомогою колодочного гальма і двигун протягом гальмування – від'єднується від мережі, тому і немає необхідності при перевірці двигуна на нагрівання обчислювати час гальмування.

Сумарний час усталеного руху привода за цикл роботи при підніманні і спусканні повного вантажу, а також при підніманні і спусканні порожнього вантажозахвату:

$$\sum_{i=1}^{n} t_{y.i} \approx 4t_{y.} \qquad (2.27)$$

$$\sum_{i=1}^{n} t_{y.i} \approx 4 \cdot 32{,}48 = 129{,}93 \text{ с.}$$

Робочий час за цикл:

$$t_p = \sum_{i=1}^{n} t_{y.i} + \sum_{i=1}^{n} t_{п.i}, \qquad (2.28)$$

$$t_p = 129{,}93 + 4{,}31 = 134{,}24 \text{ с.}$$

Тоді загальний час пауз при заданому ТВ % визначиться співвідношенням:

$$t_0 = \frac{t_p(100\% - TB\%)}{TB\%} \qquad (2.29)$$

$$t_0 = \frac{134{,}24 \cdot (100 - 35)}{35} = 249{,}3 \text{ с.}$$

Повний час циклу:

$$t_ц = t_p + t_o = 134{,}24 + 249{,}3 = 383{,}54 \text{ с.}$$

Загальний час циклу $t_ц$ = 383,54/60 = 6,39 хв. < 10 хв. – для повторно-короткочасного режиму роботи.

Перевірка вибраного двигуна на нагрівання проводиться методом еквівалентного моменту, який знаходиться по формулі:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_{п.ср}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} t_{п.i} + \sum_{i=1}^{n} M_{с.i}^2 \cdot t_{у.i}}{\beta \sum_{i=1}^{n} t_{п.i} + \sum_{i=1}^{n} t_{у.i} + \beta_0 \sum_{i=1}^{n} t_{о.i}}}, \qquad (2.30)$$

де $M_{п.ср}$ – середній пусковий момент електродвигуна;

$M_{с.i}$ – статичні моменти на валу двигуна при підніманні і опусканні вантажів, різноманітних по вазі;

$\sum_{i=1}^{n} t_{п.i.}$ – сумарний час пуску протягом одного циклу;

$\sum_{i=1}^{n} t_{у.i.}$ – сумарний час усталеного руху;

$\sum_{i=1}^{n} t_{о.i.}$ – загальний час пауз;

$\beta = \frac{1 + \beta_0}{2}$ – коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолодження при пуску та гальмуванні;

β_0 – коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолодження під час пауз.

Приймаємо $\beta_0 = 0,75$ – для закритих двигунів.

$$M_e = \sqrt{\frac{4147^2 \cdot 4,31 + (2636^2 + 693^2 + 2135^2 + 166^2) \cdot 32,48}{0,88 \cdot 4,31 + 129,93 + 0,75 \cdot 249,3}} = 1172,63 \text{ Н·м.} \quad (2.31)$$

Перевірка обраного двигуна на нагрівання задовольняє умові:

$$M_e < M_н,$$

$$1172,63\text{Нм} < 2486,98\text{Нм},$$

2.3 Розрахунок параметрів та вибір елементів системи керування електроприводом

2.3.1 Вибір перетворювача частоти

Як правило, номінальний лінійний струм двигуна змінного струму Ілн., та повна потужність, яку споживає двигун Sндв розраховується за формулами:

$$I_{лн} = \frac{P_н \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot \eta_н \cdot \cos f_н} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 420 \text{ А}, \quad (2.32)$$

$$S_{ндв} = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн} \cdot 10^{-3} = 1,73 \cdot 380 \cdot 420 = 276,9 \text{ кВА}, \quad (2.33)$$

де $P_н$ – номінальна потужність двигуна; $\eta н$ – номінальний ККД двигуна;

$cosf_н$ – номінальний коефіцієнт потужності двигуна

Вибір перетворювача частоти виконуємо за умовами:

$$U_н \geq U_{лн}; \quad I_н \geq I_{лн}; \quad S_н \geq S_{ндв}. \qquad (2.34)$$

Згідно розрахунку обираємо перетворювач частоти торгівельної марки Siemens. Модель V-080915A-Aux HoistB790S, параметри якого зводимо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Номінальні параметри частотного перетворювача V-080915A-Aux HoistB790S

Тип	Потужність, кВА	Номінальна потужність, кВт	Максимальний струм А	Напруга живлення,В	Частота (вихідна), Гц	Частота (живлення),Гц	Метод керування
V-080915A-Aux HoistB790S	300	250	721	380	0,01-200	50/60	векторне/ скалярне

Після вибору перетворювача частоти та асинхронного двигуна необхідно виконати математичний опис системи електропривода.

2.4 Складання структурної схеми електропривода

Виконаємо розрахунок параметрів схеми заміщення (опорні дані у відносних одиницях).

R_1=0,023; R_2=0,016; X_1=0,12; X_2 =0,14; $X\mu = 4,5$.

Перехід від системи відносних одиниць:

$$Z_{ф} = \frac{U_{ф}}{I_{ф}} = \frac{220}{355,8} = 0,618 \text{ Ом},$$

$$r_1 = R_1 \cdot Z_{ф} = 0,023 \cdot 0,618 = 0,0142 \text{ Ом},$$

$$x_1 = X_1 \cdot Z_{ф} = 0,12 \cdot 0,618 = 0,0742 \text{ Ом},$$

$$r_2 = R_2 \cdot Z_{ф} = 0,016 \cdot 0,618 = 0,0098 \text{ Ом},$$

$$x_2 = X_2 \cdot Z_{ф} = 0,14 \cdot 0,618 = 0,0865 \text{ Ом},$$

$$x_{\mu} = X\mu \cdot Z_{ф} = 4,5 \cdot 0,618 = 2,781 \text{ Ом}.$$

Кутова частота мережі живлення:

$$\omega_{o} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$$

Кутова максимальна швидкість двигуна:

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_{o}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ с}^{-1} \ .$$

Кількість пар полюсів електродвигуна:

$$Р_{п}=3.$$

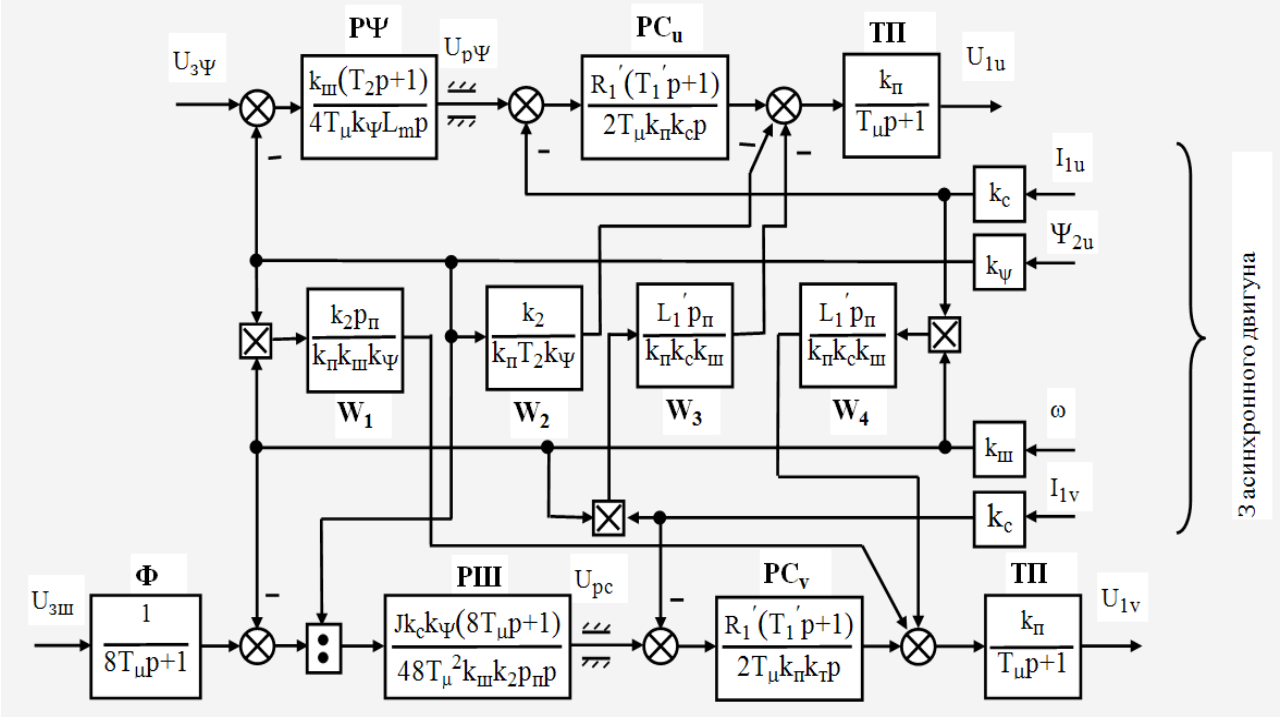


Рисунок 2.1 – Структурна схема векторної системи керування асинхронним двигуном

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\delta} = \frac{x_1}{\omega_o} = \frac{0,0742}{104} = 0,000473 \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{2\delta} = \frac{x_2}{\omega_o} = \frac{0,0865}{104} = 0,00055 \text{Гн.}$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора та ротора:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_o} = \frac{2,781}{104} = 0,018 \text{ Гн.}$$

Загальна індуктивність обмотки статору:

$$L_1 = L_{1\delta} + L_m = 0,000473 + 0,018 = 0,0185 \text{ Гн}.$$

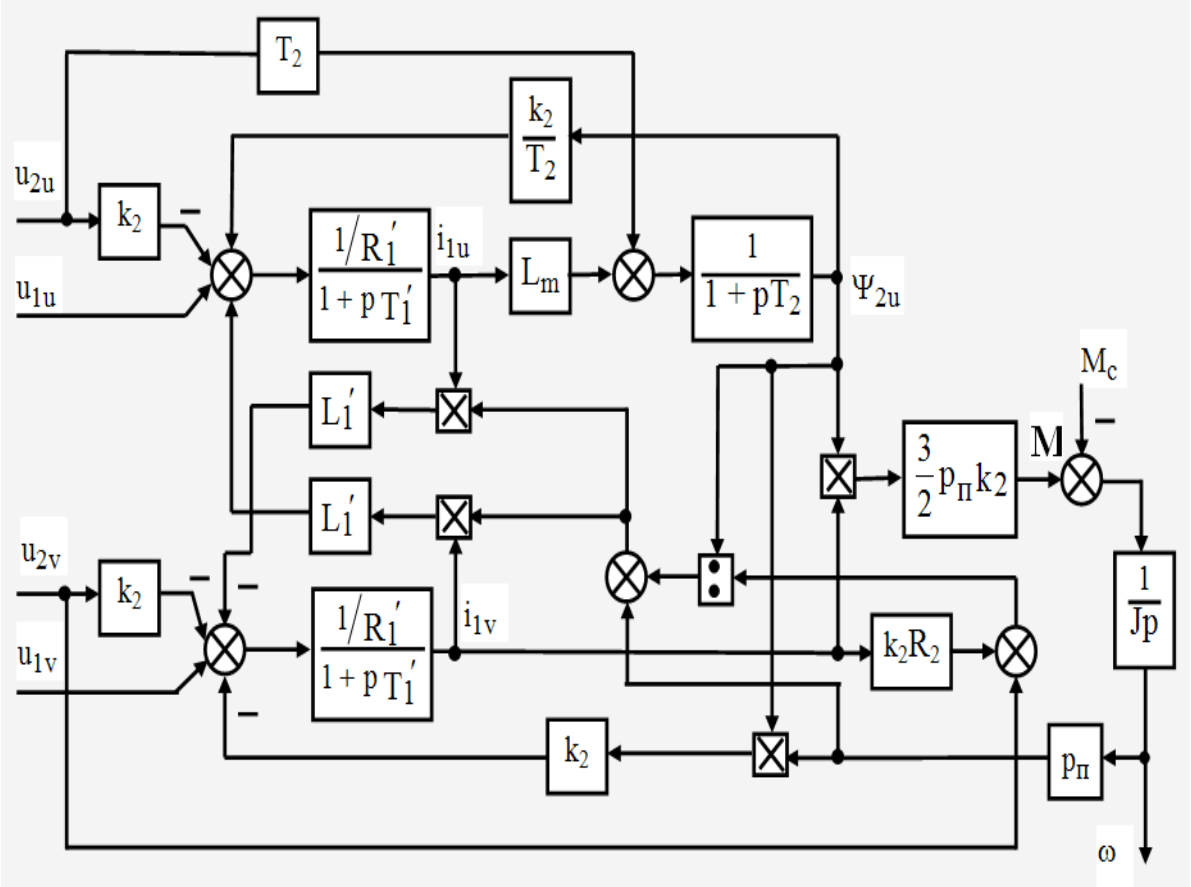


Рисунок 2.2 – Структурна схема асинхронного двигуна

Загальна індуктивність обмотки ротору:

$$L_2 = L_{2\delta} + L_m = 0,00055 + 0,018 = 0,0185 \text{ Гн}.$$

Коефіцієнт електромагнітного зв’язку ротору:

$$k_2 = \frac{L_m}{L_2} = \frac{0,018}{0,0185} = 0,97.$$

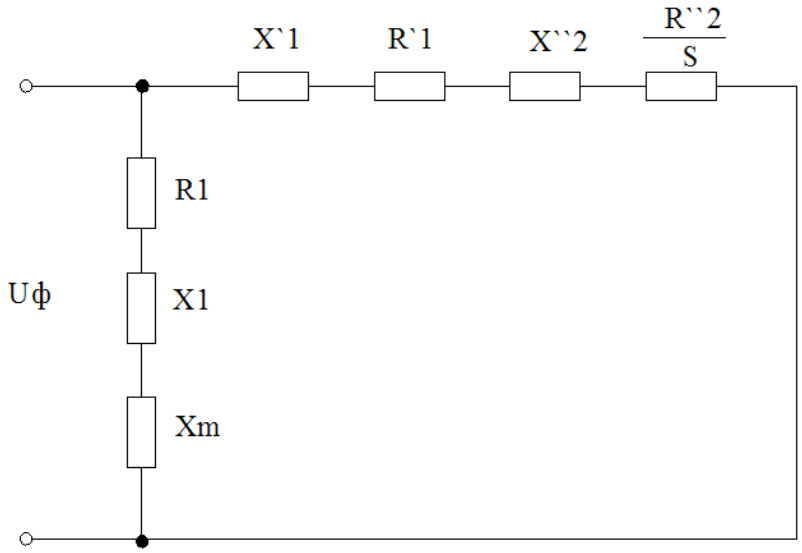


Рисунок 2.3 – Заступна схема асинхронного двигуна

Еквівалентна індуктивність розсіювання двигуна:

$$L`_1 = L_{1\delta} + k_2 \cdot L_{2\delta} = 0,000473 + 0,97 \cdot 0,00055 = 0,001 \text{ Гн.}$$

Еквівалентний активний опір двигуна:

$$R`_1 = r_1 + k_2 \cdot r_2 = 0,0142 + 0,97 \cdot 0,0098 = 0,0237 \text{ Ом.}$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки статора:

$$T`_1 = \frac{L`_1}{R`_1} = \frac{0,001}{0,0237} = 0,042 \text{ с.}$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2} = \frac{0,0185}{0,0098} = 1,89 \text{ с.}$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\psi = \frac{\text{Ілн}}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{Інф} \cdot \text{р}_\text{п} \cdot \text{k}_2} = \frac{355,8}{1,5 \cdot 1,41 \cdot 355,8 \cdot 2 \cdot 0,97} = 0,24 \text{ Вб}.$$

Максимальна напруга у системі керування: Ucmax = 10В.

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$\text{kc} = \frac{\text{Uc max}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \text{I}_{\text{нф}}} = \frac{10}{1,41 \cdot 2 \cdot 355,8} = 0,009.$$

Коефіцієнт передачі датчика швидкості:

$$\text{kш} = \frac{\text{Uc max}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{10}{104} = 0,064.$$

Коефіцієнт передачі силового перетворювача:

$$\text{kп} = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{Uф}}{\text{Uc max}} = \frac{1,41 \cdot 220}{10} = 31,02.$$

Коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення:

$$\text{k}\psi = \frac{\text{Uc max}}{\psi} = \frac{10}{0,24} = 41,67.$$

Постійна часу силового перетворювача: $\text{T}\mu = 0,0005$ с.

Розрахуємо передатні функції, що наведені на рисунках 2.1-2.2.

Перетворювач частоти:

$$\frac{\text{kп}}{\text{T}\mu\text{p} + 1} = \frac{31,02}{0,0005\text{p} + 1}.$$

Ланка зв’язку W1:

$$\frac{k_2 \cdot p_п}{kп \cdot kш \cdot k\psi} = \frac{0,97 \cdot 2}{31,02 \cdot 0,064 \cdot 41,67} = 0,023.$$

Ланка зв’язку W2:

$$\frac{k_2}{kп \cdot T_2 \cdot k\psi} = \frac{0,97}{31,02 \cdot 1,89 \cdot 41,67} = 0,00039.$$

Ланка зв’язку W3:

$$\frac{L`_1 \cdot p_п}{kп \cdot kc \cdot kш} = \frac{0,001 \cdot 2}{31,02 \cdot 0,009 \cdot 0,064} = 0,11.$$

Ланка зв’язку W4:

$$\frac{L`_1 \cdot p_п}{kп \cdot kc \cdot kш} = \frac{0,001 \cdot 2}{31,02 \cdot 0,009 \cdot 0,064} = 0,11.$$

Ланка $P\psi$:

$$\frac{kc \cdot (T_2 \cdot p + 1)}{4 \cdot T\mu \cdot k\psi \cdot L_m \cdot p} = \frac{0,009 \cdot (1,89 \cdot p + 1)}{4 \cdot 0,0005 \cdot 41,67 \cdot 0,018 \cdot p} = 5,9 \cdot \frac{1,89 \cdot p + 1}{p}.$$

Ланка PT_u:

$$\frac{R`_1 \cdot (T`_1 p + 1)}{2 \cdot T\mu \cdot kп \cdot kc \cdot p} = \frac{0,0237 \cdot (0,042p + 1)}{2 \cdot 0,0005 \cdot 31,02 \cdot 0,009 \cdot p} = 84,89 \cdot \frac{0,042p + 1}{p}.$$

Ланка Ф:

$$\frac{1}{8 \cdot T\mu \cdot p + 1} = \frac{1}{8 \cdot 0,0005p + 1} = \frac{1}{0,004p + 1}.$$

Ланка $\frac{k_2}{T_2}$:

$$\frac{k_2}{T_2} = \frac{0,97}{1,89} = 0,51.$$

Ланка РШ:

$$\frac{J \cdot kc \cdot k\psi \cdot (8 \cdot T\mu \cdot p + 1)}{48 \cdot T\mu^2 \cdot k\text{ш} \cdot k_2 \cdot p_\text{п} \cdot p} = \frac{3,97 \cdot 0,009 \cdot 41,67 \cdot (8 \cdot 0,0005p + 1)}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 0,064 \cdot 0,97 \cdot 2 \cdot p} = 999294,66 \cdot \frac{0,004p + 1}{p}.$$

Ланка $k_2 \cdot r_2$:

$$k_2 \cdot r_2 = 0,97 \cdot 0,0098 = 0,0095.$$

Ланка $\frac{3}{2} \cdot p_\text{п} \cdot k_2$:

$$\frac{3}{2} \cdot p_\text{п} \cdot k_2 = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0,97 = 2,91.$$

Ланка $\frac{1}{J \cdot p}$:

$$\frac{1}{J \cdot p} = \frac{1}{3,97 \cdot p} = 0,25 \cdot \frac{1}{p}.$$

Ланка $\frac{1}{1 + T_2 \cdot p}$:

$$\frac{1}{1 + T_2 \cdot p} = \frac{1}{1 + 1,89 \cdot p}.$$

Ланка $\frac{1/R`_1}{1 + T`_1 p}$:

$$\frac{1/R`_1}{1 + T`_1 p} = \frac{1/0,0237}{1 + 0,042p} = \frac{42,2}{1 + 0,042p}.$$

2.5 Математична модель електропривода

2.5.1 Синтез математичної моделі системи векторного керування електродвигуном

Для моделювання, імітації та аналізу динамічних властивостей досліджувального електроприводу, у даному дипломному проекті використовуємо інтерактивний інструмент MATLAB Simulink [17].

Структурна схема моделі асинхронного двигуна електроприводу засобами Matlab наведена на рисунку 2.4, яка зібрана згідно з розрахованою структурною схемою асинхронного двигуна.

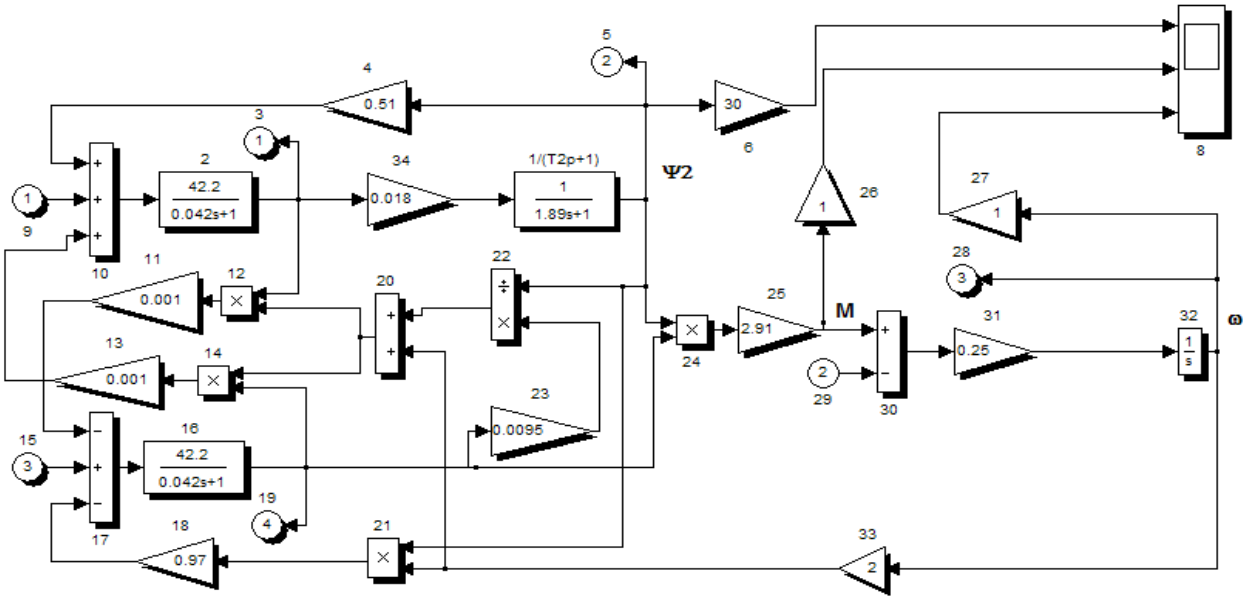


Рисунок 2.4 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна

На рисунку 2.4 прийняті наступні позначення: 10, 17, 20, 30 – блоки додавання та віднімання; 12, 14, 21, 24 - блоки множення; 22 – блок помноження та ділення; 9, 15 – блоки вхідних значень напруг u_{1u}, u_{1v}, із системи керування двигуном; 3, 19 – блоки вихідних значень струмів i_{1u}, i_{1v} у систему керування двигуном; 5 – блок завдання вихідного значення вектора потокозчеплення ψ_{2u}; 6 – блок масштабу потокозчеплення; 26 – блок масштабу моменту; 27 – блок

масштабу швидкості; 28 – блок вихідного значення швидкості; 29 – завдання моменту опору із системи керування; 11, 13 – блоки завдання еквівалентної індуктивності розсіювання двигуна $L_1^{`}$; 34 – блок завдання максимальної взаємної індуктивності між статором і ротором $L_m$; 18 – блок завдання коефіцієнту електромагнітного зв'язку ротору $k_2$; 2, 16 – передатна функція ланки $(1/R_1^{`})/(1+T_1^{`}p)$; 23 – передатна функція ланки $k_2 \cdot r_2$; 25 – передатна функція ланки $\frac{3}{2} \cdot p_п \cdot k_2$; 31, 32 – передатна функція ланки $1/(Jp)$; 4 – передатна функція ланки k_2 / T_2; 33 – блок завдання кількості пар полюсів асинхронного двигуна $p_п$; 8 – засіб відображення перехідних процесів (осцилограф); 7 – блок об'єднання сигналів, для їхнього наступного відображення на осцилографі 8.

Структурна схема моделі системи векторного керування асинхронним двигуном наведена на рисунку 2.5.

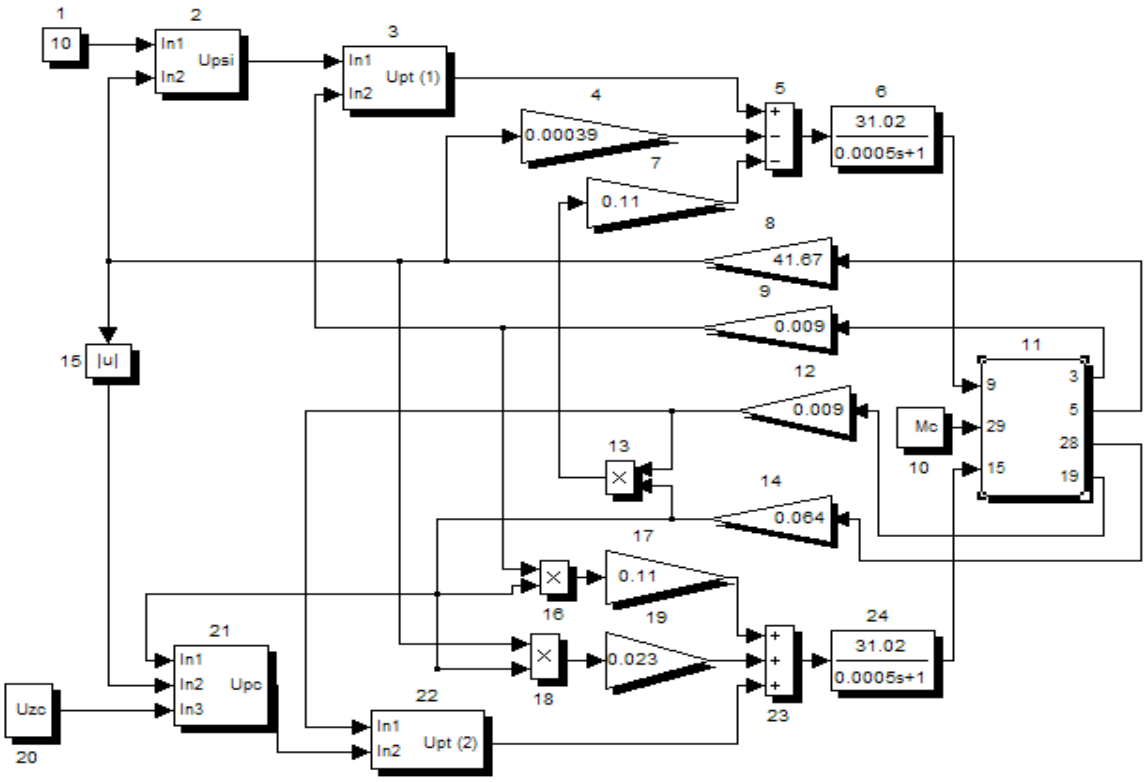


Рисунок 2.5 – Структурна схема моделі системи векторного керування асинхронним двигуном

На структурній схемі (рисунок 2.5) прийняті наступні позначення блоків: 1 – блок завдання потокозчеплення; 2 – передатна функція $(k_c \cdot (T_2 p + 1)) / (4 \cdot T_\mu \cdot k_\psi \cdot L_m \cdot p)$ контуру потокозчеплення; 3,22 – блоки підсистем регуляторів струму $(R_1^{`} \cdot (T_1^{`} p + 1) / (2 \cdot T_\mu \cdot k_{ï} \cdot k_c p)$; 4 , 7, 17, 19 – блоки передатних функцій ланок W1-W4; 11 – блок підсистеми асинхронного двигуна, модель якого зображена на рис.2.8; 9,15 – вхідні сигнали напруг u_{1u}, u_{1v}; 29 – вхідне значення струму навантаження; 3,19 – вихідні значення струмів i_{1u} та i_{1v} ; 5 – вихідне значення потокозчеплення; 28 – вихідне значення швидкості; 10 − блок завдання моменту опору; 6,24 – передатна функція тиристорного перетворювача; 5, 23 – блоки додавання та віднімання; 13, 16, 18 – блоки множення; 9,12 − коефіцієнти регулятору струму k_c; 14 − коефіцієнт підсилення регулятора швидкості $k_ø$; 21 − підсистема регулятора швидкості.

2.5.2 Моделювання електропривода при пуску двигуна без навантаження та з накидом номінального навантаження

Графіки перехідних процесів зміни потокозчеплення, струму навантаження та швидкості у часі, при пуску двигуна без навантаження та з накидом номінального навантаження наведені на рисунку 2.6.

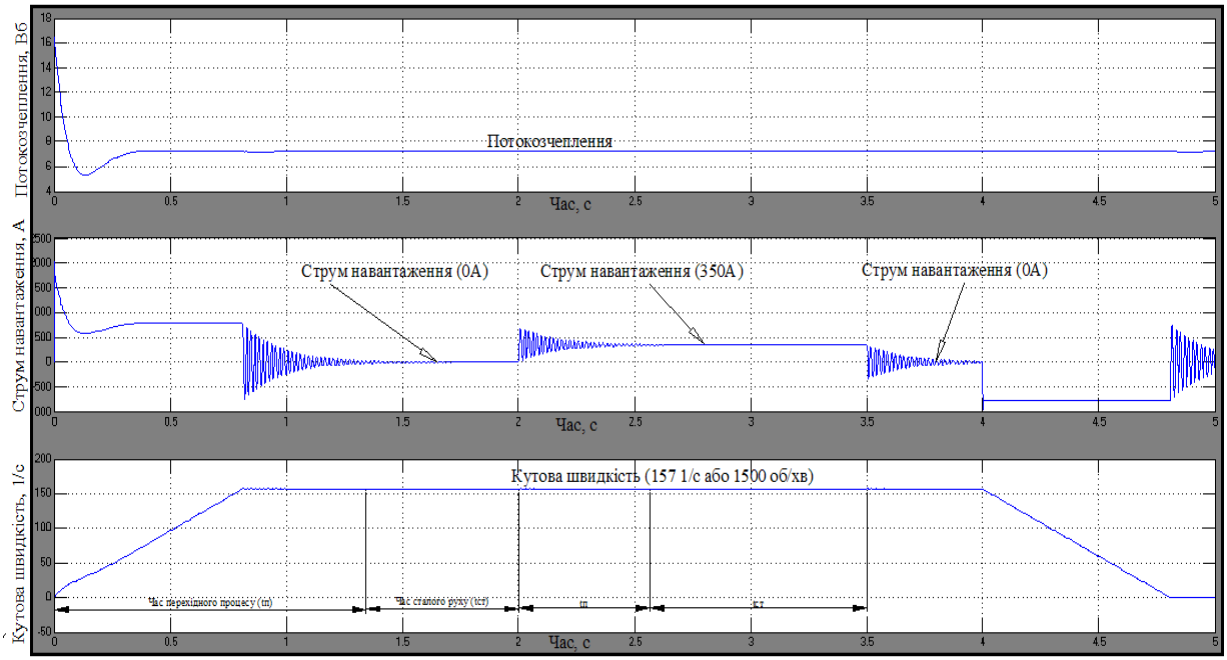


Рисунок 2.6 – Графіки перехідного процесу при пуску двигуна при накиді номінального навантаження

З графіку перехідних процесів (рисунок 2.6) видно, що перехідний процес за струмом триває 1,35с, після чого двигун працює у холосту (від 1,35 до 2с). Далі за часом 2-2,6с триває перехідний процес накиду номінального навантаження на вал двигуна (струм навантаження 350А). Характерним є те, що пусковий струм складає приблизно 2000А та триває цей процес 0,35с. Після чого пусковий струм досягає значення 600А тривалістю 0,5с. Далі процес спаду струму від 600А до 0 складає 0,75с.

Оцінити динаміку роботи асинхронного двигуна від частотного перетворювача можна виходячи з набору графіків перехідних процесів, що були отримані в результаті математичного моделювання при різних варіантах завдання швидкості та навантаження.

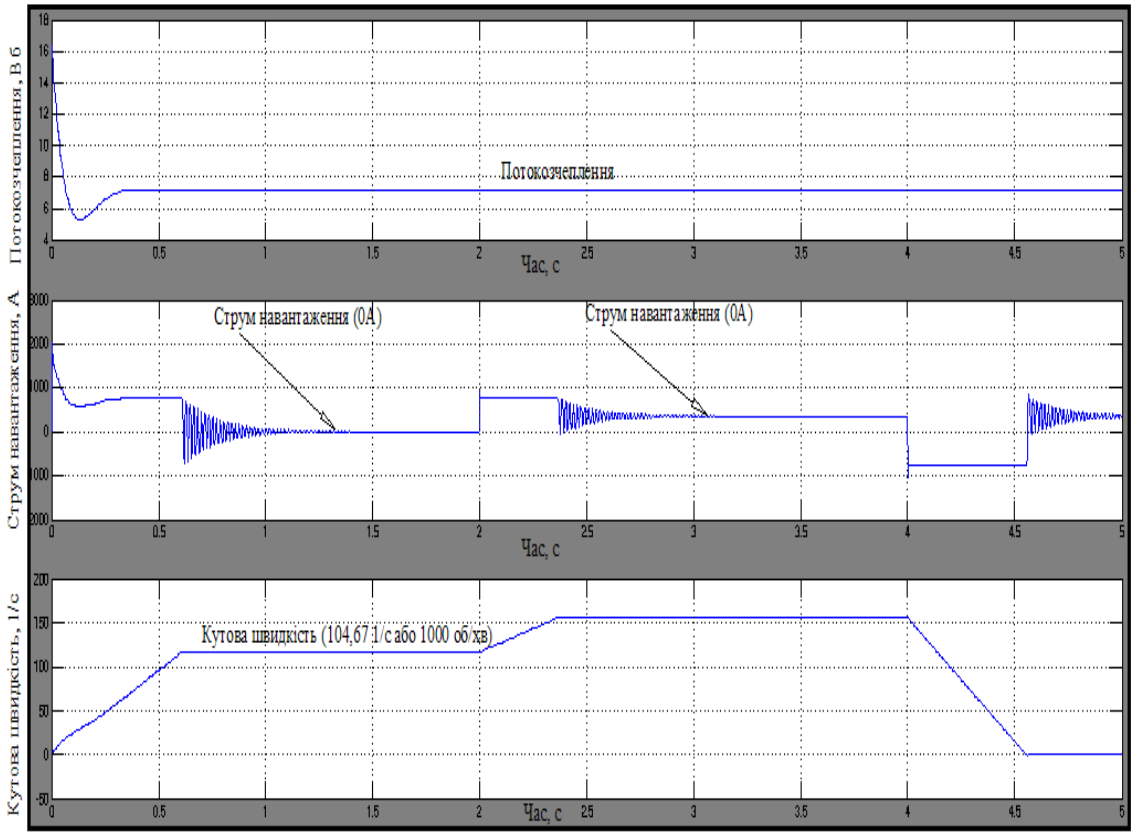
Розглянемо можливість пуску двигуна вхолосту на низьких обертах а при прикладенні навантаження на номінальній швидкості для чотирьох значень швидкості:

1. Пуск при швидкості 104,67$с^{-1}$ (1000об/хв) – рисунок 2.7(а).

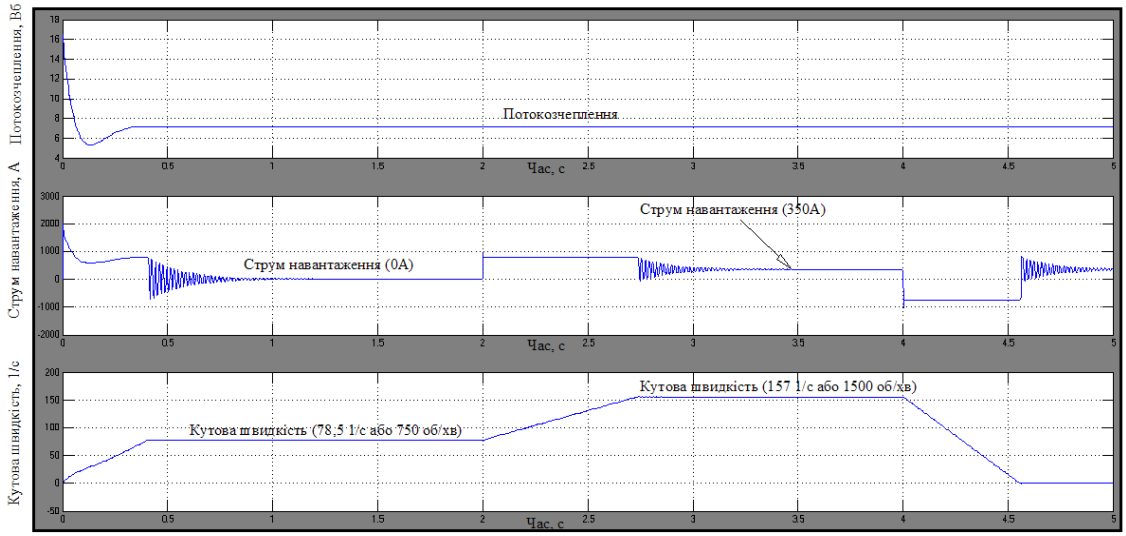
2. Пуск при швидкості 78,5$с^{-1}$ (750об/хв) – рисунок 2.7(б).

3. Пуск при швидкості 52,3с$^{-1}$ (500об/хв) – рисунок 2.7(в).

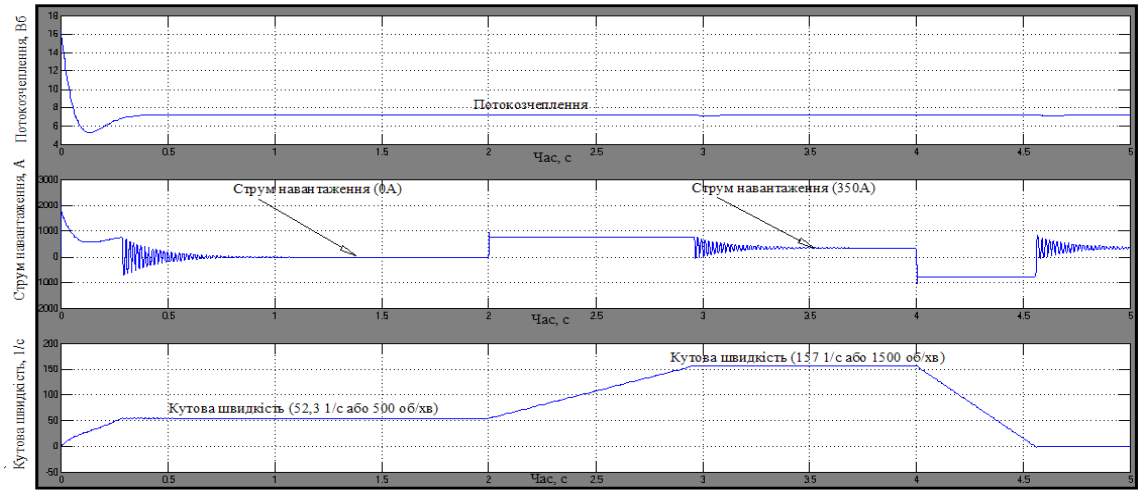
4. Пуск при швидкості 26,2с$^{-1}$ (250об/хв) – рисунок 2.8.



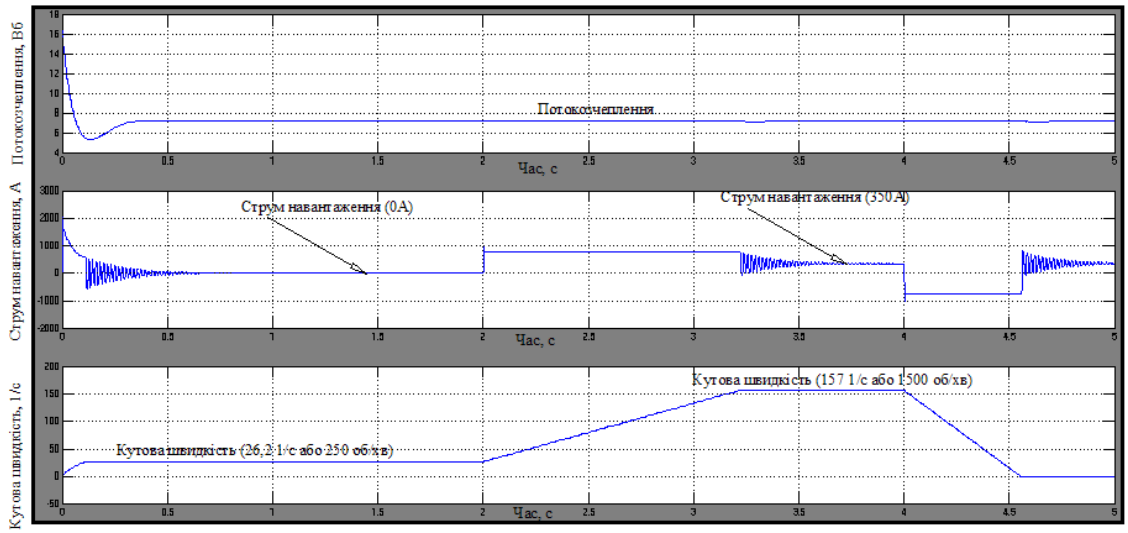
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.7 – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна при частоті обертання та навантаженні відповідно 1000-1000об/хв та 350А (а); 750-1000об/хв та 350А (б); 500-1000об/хв та 350А (в) 250-1000об/хв та 350А (г)

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

Даний дипломний проект передбачає реконструкцію електропривода механізму підйому мостового крана вантажопідйомністю 80/20 тон в умовах електросталеплавильного комплексу. В даному розділі розглянуті основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху, узагальнені питання техніки безпеки, пожежної профілактики та захисту навколишнього середовища.

3.1 Загальна характеристика умов праці

Підприємство збудовано за найсучаснішими технологіями. Меткомплекс складається: електродугова піч; установки для позапічної обробки сталі; установка для вакуумування сталі; дві машини безперервного лиття заготовок діаметром від 150 до 470 мм.

Згідно ДСП 173-96 [24] ТОВ МЗ «Дніпросталь» належить до І класу, тому розмір санітарно-захистної зони 1000 м.

Санітарні норми мікроклімату встановлюються залежно від категорії робіт відповідно ДСН 3.3.6.042-99.

Класифікація робіт, що виконуються залежно від спільних енерговитрат організму згідно ДСН 3.36.042-99 [25] наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація робіт за важкістю та енерговитратами

Категорія робіт	Характеристика робіт	Енерговитрати
Іб - легка	кранівник	141-175 Вт (121-150 ккал/год.)
IIа - середньої важкості	наладчик електрообладнання	176-232 Вт (151-200 ккал/год.)

Оптимальні і допустимі величини метеоумов на ділянці мостового крану відповідно до ГОСТ 12.1.005.-88 [26] і ДСН 3.3.6.042-99 [25] приводяться в таблиці 3.2. Фактичні величини – в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Допустимі і оптимальні параметри мікроклімату для робочої зони виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с, не більше	
		Оптимальна	Допустима	Оптимальна	Допустима	Оптимальна	Допустима
Холодний	Іб	21-23	20-24	40-60	75	0,1	<0,2
	IIа	19-21	17-23	40-60	75	0,2	<0,3
Теплий	Іб	22-24	21-28	40-60	60 при 27 °С	0,2	0,1-0,3
	IIа	21-23	18-27	40-60	65 при 27 °С	0,3	0,2-0,4

Таблиця 3.3 – Фактичні параметри метеоумов в робочій зоні машинного залу

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с, не більше
Холодний	Іб	21-23	40-60	0,1
	IIа	20-22	40-60	0,1
Теплий	Іб	22-24	50-60	0,2
	IIа	21-23	50-60	0,3

Як видно з таблиці 3.2 і 3.3 параметри мікроклімату мають задовільні значення.

До основних шкідливих і небезпечних виробничих чинників у сталеплавильному виробництві належать: підвищені надлишки тепла, високий вміст пилу і шкідливих отруйних газів, велика кількість рухомих механізмів і електроустаткування, шум та вібрація.

Основними джерелами теплового (інфрачервоного) випромінювання у сталеплавильному виробництві є дугові електропечі, печі нагріву феросплавів, ковші та виливниці, наповнені розжареним металом, поверхні міксера і ковшів з розплавленим чавуном, нагріті поверхні технологічного устаткування та кладки печей. За відсутності

засобів індивідуального захисту вплив теплового випромінювання може призвести до порушення водно-сольового обміну і зневоднення тканин, а також до теплового удару. Контакт із нагрітими виробами, іскри, бризки і викиди розплавлених матеріалів можуть стати причиною опіків.

Дисперсний склад пилу сталеплавильних цехів залежить від технологічного режиму плавки, її періоду, марки сталі, що виплавляється, умов утворення аерозолів, конденсації та пори року. За хімічним складом пил представлений оксидами заліза, хрому, марганцю, магнію, двоокисом кремнію, містить домішки алюмінію, титану, вольфраму, ванадію, молібдену. Технологічний процес також є джерелом інтенсивних викидів у повітря робочих зон виробничих ділянок цеху окису вуглецю, оксидів азоту, двоокису сірки, ціанідів і сполук селену. Вплив на організм твердих та газоподібних токсичних речовин може стати причиною хронічних і професійних захворювань. Згідно ГОСТ12.1.005-88 [26] гранично допустимі концентрації різного пилу в робочій зоні коливаються від 1 до 10 мг/м^3.

Виробниче середовище сталеплавильних цехів характеризується наявністю шуму. Джерелами його є дугова електропіч, робота електромостових кранів, процеси розвантаження і завантаження завалочної корзини, система газоочищення. Рівень звукового тиску залежить від стадії виплавки, дисперсності використовуваної шихти, газокисневого дуття, швидкості навантажувально-розвантажувальних робіт, кількості працюючих кранів тощо. Вплив шуму на організм залежить від спектральної характеристики і рівня звукового тиску. Шум нормується згідно ДСН-3.3.6.037-99 [27]. Основний шум електросталеплавильного цеху лежить в області частот до 1000 Гц і має значення звукового тиску в межах 75-95 дБ і може досягати 110 дБ.

Виробничі операції в цехах при роботі дугових електропечей, а також окремих машин і механізмів (електромостових кранів, стрічково-кидкових мульдозавалочних машин) супроводжуються загальною вібрацією. Максимальні величини віброшвидкості

спостерігаються на майданчику біля сталевипускного жолоба і на пульті майстра з випуску сталі, при закладенні і обробленні сталевипускного отвору, підготовці жолоба до зливання металу, його формуванні після випуску плавки.

Працівники цеху піддаються впливу вібрації. допустимі та фактичні значення параметрів локальної вібрації згідно [28] наведені в таблиці 3.4 і 3.5.

Таблиця 3.4 – Допустимі значення локальної вібрації

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	Допустимі значення локальної вібрації			
	віброприскорення		віброшвидкість	
	$м/с^2$	дБ	$м/с \cdot 10^2$	дБ
63	5,4	85	1,4	109
125	10,7	91	1,4	109

Таблиця 3.5 – Фактичні значення локальної вібрації

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	Фактичні значення локальної вібрації			
	віброприскорення		віброшвидкість	
	$м/с^2$	дБ	$м/с \cdot 10^2$	дБ
63	5,2	80	1,3	105
125	10,5	90	1,3	105

Фактичні показники вібрації на даній ділянці, як видно з таблиці 3.5 не виходять за рамки допустимих показників.

Згідно з ДБН В.2.5-28-2006 [29] робота кранівника відноситься до VI розряду зорової роботи, груба (дуже малої точності). Фактична штучна освітленість на даній ділянці складає 120 лк. Згідно [29] штучна освітленість повинна бути 200 лк.

Таблиця 3.6 – Освітленість робочих місць

Нормативне освітлення, лк	Фактичне освітлення, лк
200	120

Для створення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці у сталеплавильних цехах необхідно передбачити: ефективну аерацію будівель; облаштування вентиляційних і аспіраційних пристроїв, повітряне та повітряно-водяне душування робочих зон і робочих місць; кондиціонування повітря; захист від джерел тепловипромінювання, електричних,

ектромагнітних і магнітних полів, ультразвуку, шуму; широке використання засобів колективного та індивідуального захисту; нормальну освітленість; систематичне та ретельне прибирання приміщень.

3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

По небезпеці поразки електричним струмом, згідно НПАОП 40.1-1.32-01 [30] цех відноситься до особливо небезпечних приміщень, оскільки є струмопровідні підлоги, пил оксидів заліза, висока температура повітря в теплий період року. По доступності устаткування цех відноситься до виробничих приміщень, по напрузі – до 1000 В. Причинами поразки електричним струмом в цеху можуть бути: дія струму через дугу; випадковий дотик до струмопровідних частин; порушення ізоляції; дія крокової напруги.

Електричне обладнання, є потенційно небезпечним для працюючих, оскільки органи відчуття людини на віддалі не можуть виявити електричну напругу.

Законом України "Про охорону праці" на працівника покладається обов'язок знати і виконувати вимоги нормативних актів про охорону праці, правила поводження з машинами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту; додержуватися зобов'язань щодо охорони праці, передбачених колективним договором та правилами внутрішнього трудового розпорядку підприємства; проходити у встановленому порядку попередні та періодичні медичні огляди; співробітничати з власником у справі організації безпечних і нешкідливих умов праці; особисто вживати посильних заходів щодо усунення будь-яких виробничих ситуацій, які створюють загрозу для працюючих.

Виробничий процес в електросталеплавильному цеху за вибуховою, вибухопожежною і пожежною небезпекою згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [32] 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[33], вона має II ступінь вогнестійкості.

Пожежі на ділянці можуть виникати у випадку:

- загоряння електроустаткування при перевантаженнях, перегрівах і коротких замиканнях (клас пожежі - Е).

Небезпека виникнення пожежі на ділянці зменшується в проектній роботі наступними розробленими заходами: вчасно проводити профілактичні огляди електроустаткування, апаратури, електромережі й своєчасне усунення всіх порушень. Робоча площадка електросталеплавильного цеху відповідно до ПУЕ по пожежній небезпеці відноситься до категорії “Г”.Пожежна небезпека електросталеплавильного виробництва визначається наявністю в агрегатах горючих газів, вживанням кисню, наявністю кабельного господарства, масляних трансформаторів, вживанням горючих рідин. Велику пожежну небезпеку представляють екзотермічні суміші, що вживаються при виплавці якісних сталей. Для гасіння пожеж на трансформаторах в електросталеплавильних цехах застосовують повітряно-механічну піну. Для гасіння можливих пожеж передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначаються на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004 [32]. В таблиці 3.7 наведені нормативні [32] та фактичні показники належності вогнегасників.

Таблиця 3.7 – Нормативні та фактичні показники належності вогнегасників для виробничих і складських будинків та приміщень промислових підприємств

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

Для мостового крана, для забезпечення пожежної безпеки використовується наступне: вся апаратура управління розміщена в герметизованому контейнері; електродвигуни всіх механізмів мають ступінь захисту від зовнішнього середовища. Згідно з правилами пожежної безпеки (ППБ 01–03), в кабіні є вуглекислотний вогнегасник, який використовується в цілях гасіння електропроводки та електрообладнання.

3.3. Захист навколишнього середовища

У металургійному виробництві застосовують різноманітні технологічні процеси, що пов’язані з викидами шкідливих забруднюючих речовин у повітря та водний басейн.

Враховуючи це, потрібно визначити основні джерела цих забруднень, її параметри з тим, щоб прийняти обґрунтовані рішення по знешкодженню або зниженню їхнього шкідливого впливу на довкілля [35].

Основними джерелами забруднення довкілля у металургійному виробництві є: металовідходи; пил; стічні води.

Металовідходи краще видаляти механізованим шляхом. Потім його сортирують, подрібнюють та брикетують.

Вибір методів та засобів очищення викидів шкідливих речовин здійснюється в залежності від фізико-хімічних характеристик речовин та специфічних особливостей технологічного процесу.

Для електросталеплавильних печей, гази яких містять дрібнодисперсний пил і можуть вибухати, очистку здійснюють мокрим способом у швидкісних пиловловлювачах з високонапорними трубами Вентурі та сухим способом у пластинчатих багатопільних електрофільтрах або тканинних рукавних фільтрах.

Завод «Дніпросталь» став найбільшим в Європі, який у 2009 році в номінації «Охорона навколишнього середовища» отримав премію, за найбільш

інноваційний проект, аналогів якому немає. А в 2020 р Дніпросталь увійшов до рейтингу Топ-15 «зелених» проектів України за 2020 рік за версією Інвестгазети.

Один із головних здобутків підприємства — повна відмова від застарілих, шкідливих технологій, які отруювали повітря. Натомість тут впроваджено сучасні рукавні фільтри, які затримують до 99,2% пилових часток. Це означає, що повітря, яке виходить з вентиляційних труб, є майже чистим. Фактична концентрація пилу у викидах становить не більше 5 мг/м³, що відповідає найсуворішим європейським екологічним стандартам.

У 2023 році загальний обсяг викидів на підприємстві склав лише 1969 тонн, тоді як аналогічні підприємства в Україні можуть викидати в 25–30 разів більше. Це не просто цифри — це тисячі людей, які дихають чистішим повітрям, сотні дітей, які рідше хворіють на бронхіти й астму, і справжня надія на те, що промисловість може бути екологічною.

На заводі все продумано до дрібниць. Майже 100% металобрухту, який використовується у виробництві, — це вторинна сировина. Таким чином, підприємство не тільки зменшує потребу у видобутку нових ресурсів, а й ефективно вирішує проблему утилізації відходів. Усі небезпечні речовини зберігаються в спеціально обладнаних місцях і транспортуються згідно з вимогами екобезпеки.

Окрім цього, завод не скидає жодного літра забрудненої води у природні водойми. Система замкнутого водопостачання дозволяє використовувати воду багаторазово — після очищення вона повертається назад у технологічний процес. У 2023 році підприємство повністю виключило скиди у річку Дніпро, зменшивши навантаження на екосистему регіону до нуля.

Сталеплавильна електропіч, встановлена на заводі, споживає у вісім разів менше природного газу, ніж мартенівські печі. Крім того, за рахунок рекуперації тепла вдалося зекономити близько 120 ГВт·год теплової енергії на рік. Це дало змогу знизити викиди вуглекислого газу на 180 тисяч тонн - саме стільки CO_2 щорічно виробляють 50 тисяч легкових автомобілів.

У межах стратегії Decarbonization Path-2030, підприємство вже скоротило свої викиди CO_2 на 61% у трубному виробництві та на 46% у виробництві залізничних коліс. До 2030 року заплановане додаткове зменшення ще на 25–26%. Такі результати ставлять «Дніпросталь» серед лідерів декарбонізації у Східній Європі.

На території заводу діє сучасна лабораторія екологічного контролю, яка щоденно відстежує рівень викидів, шуму, якості води та повітря. Усі показники фіксуються автоматично та передаються до екологічних служб у режимі реального часу. Завод регулярно проходить незалежні екологічні аудити та підтверджує відповідність стандартам ISO 14001 і ISO 50001.

Окрема увага приділяється роботі з громадськістю. Завод проводить відкриті екскурсії, де жителі міста можуть на власні очі побачити, як працюють очисні споруди, як виглядає система водообігу, і як виглядає сучасна металургія зсередини — без диму, смороду й стогону заліза.

Місцева екологічна ситуація вже суттєво поліпшилась. Згідно з даними обласного департаменту екології, у промисловій зоні Дніпра рівень зважених часток PM10 знизився на 38%, а концентрація діоксиду сірки — на 42%. Медики фіксують 12-відсоткове зниження захворюваності на хвороби органів дихання серед мешканців прилеглих районів.

Крім цього, підприємство щороку інвестує близько 2 мільйонів доларів у екологічні й соціальні проєкти. За ці кошти було відновлено понад 20 гектарів зелених зон, висаджено понад 100 тисяч дерев, модернізовано міське освітлення та встановлено енергозберігаюче обладнання в школах і лікарнях.

ВИСНОВКИ ПІДСУМКОВІ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра виконані дослідження векторної системи керування ПЧ-АД.

Виконана оцінка динаміки роботи асинхронного двигуна від частотного перетворювача виходячи з набору графіків перехідних процесів, що були отримані в результаті математичного моделювання при різних варіантах завдання швидкості та навантаження, які показали їх задовільну якість.

Розглянуто можливість пуску двигуна вхолосту на низьких обертах та при прикладенні навантаження на номінальній швидкості для чотирьох значень швидкості.

В основній частині роботи проведено розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна. Було обрано електродвигун змінного струму типу Siemens SIMOTICS N-compact потужністю 250 кВт, частотою обертання $n = 960$ хв$^{-1}$, з моментом інерції J_p=26,5 Н·м·с^2.

В розділі «Основні шкідливі і небезпечні виробничі чинники в цеху де встановлений мостовий кран» розглянуто основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори досліджувальної ділянки, узагальнені питання техніки безпеки та пожежної профілактики.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mokin B. I. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters. Electrical and Computer Engineering (UKRCON) [Text] / B. I. Mokin, O. B. Mokin, O. M. Kryvonis // 2017 IEEE First Ukraine Conference on(YSF-2017). -2017. -DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100504.

2. Режими роботи механізмів кранів. [Електронний ресурс]. -Будівельна техніка. Довідник. -2016. -Режим доступу: http://budtehnika.pp.ua/6798-rezhimi-roboti-mehanzmv-kranv.html

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

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

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

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

7. Ручка О. О. Векторне управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу [Текст] / О. О. Ручка, О. О. Ніколаєв // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. -2013. -№4. -С. 159-162.

8. Григоров О. В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом [Текст] / О. В. Григоров, В. В. Стрижак // Вісник ХНАДУ. -2012. -№57. -С. 249-256.

9. SIEMENS. SIMOTICS Low-Voltage Motors. Frame sizes 63 to 450. Power range 0,09 to 1250kW. Catalog D 81.1 January 2012.

10. SIEMENS. SINAMICS S120 Chassis Format Units and Cabinet Modules. SINAMICS S150 Converter Cabinet Units. Catalog D 21.3 – 2009.

11. SIEMENS. Products for Totally Integrated Automation and Micro Automation. Catalog News ST 70 N – 2010.

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

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

14. 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.

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

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

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

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

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

20. SIEMENS. SINAMICS S120 Chassis Format Units and Cabinet Modules. SINAMICS S150 Converter Cabinet Units. Catalog D 21.8 – 2019.

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

22. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. – К: Постмаркет, 2001. − Т.1− 416 с.

23. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. Издательство: Корона принт. К. 2008.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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