МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Аналіз динамічних характеристик електропривода кліті прокатного стана 550

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1414 - з
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Лифарь К.К.
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф., Биковський О.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____другий (магістерський) рівень_____
Спеціальність __141___Електроенергетика,_____ електротехніка____та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф._____ В.Л. Коваленко
«_____»_____2025__року

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

_____Лифарь Кирил Костянтинович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи __Аналіз динамічних характеристик електропривода кліті прокатного стана 550___
_____
керівник роботи ___Биковський О.Г., д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_27_» _02__2025__року №_313 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2025 р._____
3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом кліті прокатного стана 550
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Аналіз існуючого електрообладнання прокатного стана 550 2) Модернізація та дослідження динамічних властивостей електроприводу кліті прокатного стана 550 3) Охорона праці та захист навколишнього середовища: аналіз умов праці та пожежної безпеки 4) Економічна частина: характеристика об'єкта проєктування; проєктні рішення; розрахунок потреби в інвестиціях; розрахунок собівартості продукції й економічної ефективності проєктних рішень.
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _1) постановка задачі дослідження; 2) схема після модернізації; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) техніко-економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 2	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 3	Биковський О.Г., д.т.н., професор		
Розділ 4	Биковський О.Г., д.т.н., професор		

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого електрообладнання прокатного стана 550	30.09.2025	
2	Модернізація та дослідження динамічних властивостей електроприводу кліті прокатного стана 550	15.10.2025	
3	Охорона праці та захист навколишнього середовища	25.11.2025	
4	Економічна частина	30. 11.2025	

Студент _____ К.К. Лифарь
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.Г. Биковський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

АНОТАЦІЯ

Лифарь Кирил Костянтинович. Аналіз динамічних характеристик електропривода кліті прокатного стана 550.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Биковський О.Г. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

У пояснювальній записці розглядається модернізація електропривода кліті №6 сортопрокатного стана 550, яка працює в умовах важких, ударних та повторно-перемінних навантажень. Основна увага приділяється тому, як змінюється робота привода внаслідок впровадження двох ключових рішень: нового адаптивного регулятора струму в існуючій тиристорній системі та переходу на сучасний частотно-регульований електропривід із високовольтним перетворювачем частоти.

На початковому етапі аналізується штатна система приводу. Її основу становить двигун постійного струму типу П22/52-2,5МУ4, номінальною потужністю 2500 кВт, напругою 750 В, номінальною частотою обертання 110 об/хв і максимальними 220 об/хв. Для живлення якоря використовується тиристорний перетворювач ТПП-1-5000/5000-825, розрахований на Ud = 825 В та Id = 5000 А, а для живлення обмотки збудження застосовується тиристорний збудник КТЕ-320/440-912. У роботі детально простежується, як ця система реагує на зміни навантаження, наскільки вона чутлива до переривчастих режимів струму та чому в умовах частих переналагоджень виникають збої й аварійні зупинки. Саме ці особливості стали передумовою для створення нового

адаптивного регулятора струму, здатного стабільно працювати як у режимах холостого ходу, так і на малих швидкостях.

Другий етап модернізації передбачає повну зміну роду струму та побудову електропривода на основі високовольтного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ. Цей двигун має потужність 3600 кВт, номінальну напругу 6 кВ, струм 440 А, ККД 95,5% та коефіцієнт потужності 0,81. Проведені розрахунки навантажувальних діаграм та еквівалентного моменту показують, що такий двигун повністю відповідає реальним механічним вимогам кліті №6. Він забезпечує достатню перевантажувальну здатність, надійність та термічну стійкість навіть у режимах захвату металу, де спостерігаються пікові динамічні моменти.

Для живлення нового двигуна обрано високовольтний багаторівневий перетворювач частоти Perfect Harmony (Siemens). Він працює в діапазоні вихідної напруги 2–14,5 кВ та потужності 149–6000 кВт, у системі кліті №6 застосовується модифікація з номінальною потужністю 5500 кВА, номінальним струмом 500 А, вихідною частотою 0,5–120 Гц і векторним методом керування. Перетворювач має каскадну структуру з багатообмотковим трансформатором і послідовно з’єднаними силовими комірками на IGBT-транзисторах. Така архітектура забезпечує чисту форму напруги, низький рівень гармонік, високу надійність і відсутність потреби в додаткових фільтрах. Окремо у записці наголошується на простоті обслуговування завдяки модульності силових комірок, захисту оптоволоконних ліній керування від перешкод та автономності для кожної фази.

Математичне моделювання, виконане в роботі, демонструє, як після переходу на систему «ПЧ – АД» поліпшується якість перехідних процесів, зменшується коливальність моменту, покращується стійкість привода у режимах навантаження та холостого ходу. Розрахункові характеристики підтверджують відповідність двигуна та перетворювача вимогам до прискорення, реверсу, точності регулювання та компенсації динамічних моментів.

Завершальні розділи подають аналіз умов праці, пожежної та електробезпеки, а також оцінку економічного ефекту від модернізації. Вказується, що заміна застарілої тиристорної системи на високовольтний частотний привід дозволяє значно знизити енергоспоживання, скоротити час простоїв та забезпечити стабільний технологічний режим, що є критично важливим для безперервного сортопрокатного виробництва.

Об'єкт дослідження – система керування електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 в умовах ПрАТ «Дніпровський металургійний завод»

Мета роботи – модернізація та дослідження динамічних властивостей електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 в умовах ПрАТ «ДМЗ» шляхом заміни існуючої системи керування тиристорний перетворювач - двигун постійного струму на сучасну – перетворювач частоти - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з векторною системою керування.

Метод дослідження та засоби – дослідження електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 в умовах ПрАТ «ДМЗ» із застосуванням програмного продукту Mathcad та Matlab.

Результати роботи можуть бути основою для побудови реальної системи автоматичного регулювання швидкості електроприводом кліті № 6 прокатного стану 550 в умовах ПрАТ «ДМЗ», яка дозволить регулювати швидкість двигуна у необхідних діапазонах. Результат роботи дозволяє значно підвищити надійність електропривода, зменшити його габарити та значно скоротити економічно-експлуатаційні витрати.

Ключові слова: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, прокатний стан 550, система керування, пуск асинхронного двигуна, регулятори струму, тиристорний перетворювач – двигун постійного струму, програмований логічний контролер, безконтактні елементи, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, перетворювач частоти, мікроконтролерний пристрій.

ABSTRACT

Lifar Kyryl Kostiantynovych. Analysis of the Dynamic Characteristics of the Drive System of the Stand No. 6 of Rolling Mill 550. Master's qualification thesis for obtaining the degree of Master of Higher Education in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Scientific supervisor: Bykovskyi O.H. Zaporizhzhia National University, Yurii Potebnia Institute of Engineering and Educational Technologies, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

The thesis examines the modernization of the electric drive of stand No. 6 of the 550 rolling mill, which operates under severe, impact-type, and frequently changing dynamic loads. The main focus is placed on how the performance of the drive system changes as a result of implementing two key solutions: a new adaptive current regulator within the existing thyristor-based system and the transition to a modern adjustable-speed drive using a high-voltage frequency converter.

At the initial stage, the standard drive system is analyzed. Its core is a DC motor of type П22/52-2.5МУ4 with a rated power of 2500 kW, a supply voltage of 750 V, a rated speed of 110 rpm, and a maximum speed of 220 rpm. The armature circuit is powered by a thyristor converter TPP-1-5000/5000-825 (Ud = 825 V, Id = 5000 A), while a thyristor exciter KTE-320/440-912 supplies the field winding. The thesis provides a detailed examination of how this system responds to load variations, its sensitivity to discontinuous current modes, and the reasons why frequent readjustments cause malfunctions and emergency shutdowns. These operational issues became the basis for developing a new adaptive current regulator capable of ensuring stable operation both at low speeds under load and in no-load conditions.

The second stage of modernization involves a full change of the motor type and the construction of a new drive system based on a high-voltage squirrel-cage induction

motor of type H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ. This motor features a power rating of 3600 kW, a nominal voltage of 6 kV, a rated current of 440 A, an efficiency of 95.5%, and a power factor of 0.81. Calculations of load diagrams and equivalent torque show that this motor fully meets the actual mechanical requirements of stand No. 6. It provides adequate overload capacity, reliability, and thermal stability even during metal gripping, when peak dynamic torques occur.

To supply and control this motor, a high-voltage multilevel frequency converter Perfect Harmony (Siemens) is used. Operating in the voltage range 2–14.5 kV and power range 149–6000 kW, the system of stand No. 6 employs a configuration rated at 5500 kVA, with a nominal current of 500 A, an output frequency of 0.5–120 Hz, and a vector control method. The converter features a cascaded architecture with a multi-winding transformer and series-connected power cells based on IGBT transistors. This design provides a high-quality output waveform, low harmonic distortion, high reliability, and eliminates the need for additional harmonic filters. The thesis also highlights the ease of maintenance due to the modularity of the power cells, the electromagnetic immunity of fiber-optic control interfaces, and the autonomous operation of each phase.

Mathematical modelling demonstrates how the adoption of the “VFD–IM” system improves transient performance, reduces torque pulsations, and enhances the drive stability both under load and in no-load operation. The results confirm the compliance of the motor and converter with the required acceleration characteristics, reversing capability, speed control accuracy, and dynamic torque compensation.

The final sections present an analysis of working conditions, fire safety, and electrical safety, as well as an assessment of the economic effects of modernization. It is shown that replacing the outdated thyristor system with a high-voltage frequency-controlled electric drive significantly reduces energy consumption, minimizes downtime, and ensures a stable technological process, which is critically important for continuous rolling production.

Object of study: the control system of the electric drive of stand No. 6 of rolling mill 550 at PJSC “Dnipro Metallurgical Plant” (DMZ).
Purpose of the work: modernization and investigation of the dynamic properties of the electric drive of stand No. 6 by replacing the existing “thyristor converter – DC motor” system with a modern “frequency converter – squirrel-cage induction motor” system using vector control.

Research methods and tools: study of the electric drive of stand No. 6 using Mathcad and Matlab software environments.

Practical value: the obtained results may serve as the basis for designing a real automated speed control system for the electric drive of stand No. 6, enabling precise speed regulation within the required ranges. The modernization significantly increases system reliability, reduces overall dimensions, and lowers operational and maintenance costs.

Keywords: squirrel-cage induction motor, rolling mill 550, control system, induction motor starting, current regulators, thyristor converter – DC motor, programmable logic controller, contactless elements, efficiency, power factor, frequency converter, microcontroller device.

ЗМІСТ

ВСТУП……...13
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА……...15
1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами……..…15
1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу роботи прокатного стана 550 …… .16
1.3 Характеристики базового електропривода кліті № 6 прокатного стану 550, що працює в умовах ПрАТ «ДМЗ»……..19
1.4 Вибір шляхів та постановка задачі модернізації електропривода кліті № 6 прокатного стану 550……..21
2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КЛІТІ ПРОКАТНОГО СТАНА 550…….....24
2.1 Вибір системи електропривода кліті № 6 прокатного стану 550…….....24
2.2 Розрахунок параметрів та вибір елементів силової частини електропривода кліті № 6 прокатного стану 550……..25
2.2.1 Вибір параметрів та елементів існуючої системи електропривода кліті № 6 виконаною схемою тиристорний перетворювач – двигун постійного струму……..……25
2.2.2 Вибір параметрів та елементів модернізованої системи електропривода кліті № 6 виконаною за схемою перетворювач частоти – високовольтний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором…….. 33
2.3 Складання структурної схеми електропривода кліті № 6 за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму та її оптимізація……40
2.3.1 Регулятор струму……40
2.3.2 Розрахунок і вибір елементів силової схеми електропривода кліті № 6 за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму……43

2.3.2.1 Вибір тиристорного перетворювача та розрахунок параметрів схеми…….. 44
2.3.2.2 Розрахунок параметрів об'єкту регулювання…….....48
2.4 Синтез структурної схеми електроприводу…….....50
2.4.1 Оптимізація контуру регулювання струму якоря з ПІ – регулятором……...50
2.4.2 Оптимізація контуру регулювання швидкості з П – регулятором….....51
2.4.3 Контур регулювання швидкості з П – регулятором…….....52
2.4.4 Контур регулювання струму з ПІ – регулятором…….....53
2.4.5 Складання принципової схеми електроприводу…….....54
2.4.6 Переклад структурної схеми електропривода у відносні одиниці та моделювання перехідних процесів пуску двигуна без навантаження та під навантаженням……...…….56
2.5 Розрахунок параметрів системи керування електроприводом кліті № 6 прокатного стану «550»……60
2.5.1 Розрахунок параметрів математичної моделі електропривода…….....60
2.6 Моделювання електропривода виконаного за системою ПЧ-АД з векторним керуванням……..67
2.7 Енергозбереження……....72
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА….....78
3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки……....78
3.2 Заходи з поліпшення умов праці……....83
3.2.1 Розрахунок аерації цеху та освітлення приміщення……....84
3.3 Захист навколишнього середовища ……...86
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА……....88
4.1 Характеристика об’єкту дослідження……....88
4.2 Проектні рішення……....88
4.3 Розрахунок собівартості продукції ……....89

4.4 Економічна ефективність проектних рішень та розрахунок основних техніко-економічних показників…….....92
ВИСНОВКИ…….96
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……98

ВСТУП

Обробка металу прокаткою займає важливе місце в металургійному виробництві. Прокатний стан - це пристрій, що складається з великої кількості механізмів, об'єднаних єдиним технологічним процесом. У прокатному стані є головні механізми - робочі валки прокатної кліті і допоміжні механізми, що забезпечують безперервність технологічного процесу. Головні механізми, призначені для обробки металу, забезпечують обтискання металу і надають йому необхідну перетин і форму готової продукції. Цифрові системи управління знаходять широке застосування в промисловості. Вони грають важливу роль в управлінні виробничими процесами, в яких спільна робота комп'ютера і виконавчого пристрою забезпечує виконання ряду відповідальних операцій.

Одним з основних показників рівня розвитку економіки держави є енергоємність валового внутрішнього продукту (ВВП). Енергоємність ВВП в Україні досить висока і становить (за даними Міжнародного енергетичного агентства та органів державної статистики) 0,5 кілограма нафтового еквівалента на 1 долар США. При цьому її величина в Данії і Японії - 0,11, у Великобританії - 0,14, Німеччині та Франції - 0,18, США - 0,21, Росії - 0,47. Проблема високої енергоємності ВВП має загальнодержавний характер, так як впливає на рівень собівартості продукції та її конкурентоспроможність [1]. Серед великої кількості причин виникнення проблеми виділяють наступні: надмірна зношеність основних фондів, низькі темпи їх оновлення; недостатній рівень впровадження нових технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, альтернативних джерел енергії. Цю проблему можна вирішити шляхом впровадження сучасних енергоефективних технологій, машин і устаткування, що вимагає значних інвестицій. В умовах обмежених інвестиційних ресурсів модернізацію слід проводити в галузях, що забезпечують нагальні потреби

суспільства, а також в галузях, що випускають конкурентоспроможну продукцію для зовнішнього ринку, в першу чергу, в металургії [2].

Велика частина технологічних заходів, пов'язаних з поліпшенням використання енергоресурсів, повинна орієнтуватися на підвищення рівня експлуатації існуючого обладнання [3], модернізацію технологічних процесів за рахунок малозатратних заходів, спрямованих на оптимізацію режимів роботи та енергозбереження. За різними оцінками структура споживання енергоресурсів найбільш енергоємними виробництвами металургії виглядає наступним чином: близько 40% припадає на доменне виробництво, близько 20% на прокатне виробництво, менше 10% на коксохімічне та виробництво агломерату, приблизно 5% - електросталеплавильне виробництво [4]. Таким чином, виробництво прокату посідає друге місце по споживанню енергоресурсів металургійних підприємств. Тому актуальними є завдання модернізації енергоємного прокатного виробництва, дослідження процесів енергоперетворення і розробка ефективних систем управління його агрегатами. Як відомо, головні приводи прокатних станів є одними з основних споживачів енергії прокатних цехів: потужність окремих двигунів приводів коливається від 200 до 9000 кВт, напруга живлення головних приводів 6-10 кВ, режим їх роботи характеризується різкими поштовхами навантаження, мають тривалість декілька секунд і величину до 2-2,5 номінальної потужності двигунів постійного струму і до 4-4,5 двигунів змінного струму. Тому проведення попередніх експериментів при модернізації приводів і їх систем автоматичного управління (САУ) доцільно проводити, використовуючи комплекс комп'ютерних моделей елементів прокатного обладнання, що надасть значний енергозберігаючий ефект у порівнянні з експериментом на реальному виробничому обладнанні.

У зв'язку з цим актуальною є розробка та дослідження автоматизованого електропривода кліті № 6 прокатного стану 550, що працює в умовах ПрАТ «ДМЗ», як єдиної електромеханічної системи в комплексі з сучасними інформаційними системами.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПРОКАТНОГО СТАНА 550

1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами

Динамічні навантаження в приводах металургійних машин істотно впливають на їх надійність і довговічність. У деяких випадках величини динамічних навантажень в 5-8 разів перевищують статичні навантаження, необхідні для реалізації технологічної операції. У цих випадках саме динамічні навантаження обмежують можливості інтенсифікації режимів роботи машин і їх надійність [5].

Серед машин, для яких врахування динамічних навантажень найбільш важливе, особливе місце займає обладнання прокатних цехів і, зокрема, головні лінії прокатних станів. Це пояснюється важким режимом роботи прокатних станів, для яких характерні часто повторюване прикладення і зняття великих робочих навантажень, реверси, значні прискорення при розгоні і гальмуванні, а також конструктивними особливостями головних ліній (довгі податливі вали, зазори в шарнірних з'єднаннях валів).

Тому при проектуванні і експлуатації головних електроприводів (ЕП) клітей прокатних станів важливим завданням є знаходження фактичних динамічних навантажень електричного і механічного обладнання, основні з яких створюються моментами пружних сил механічної передачі в режимах ударного захоплення і викиду металу. Динамічні навантаження коливального характеру призводять до різкого скорочення терміну служби деталей механічної передачі по зносу і витривалості і відхилення процесів від таких, що вимагає технологія.

Як фактор обмеження динамічних навантажень використовується на практиці демпфіруючий ефект ЕП [6]. Для головних ЕП клітей прокатних станів з двигунами постійного струму зниження коливальності моментів в

пружній механічній передачі може бути досягнуто за рахунок формування оптимальної жорсткості механічної характеристики ЕП [7].

Методи оптимізації електромеханічних систем головного приводу клітей прокатних станів засновані на посиленні електромеханічного зв'язку [8], використанні принципу електромеханічної сумісності [9] і синтезі параметрів з метою мінімізації реакції ЕП на дію коливань моменту пружної механічної частини як зовнішнього збурення.

Широке застосування для головних приводів клітей прокатних станів знаходить асинхронний ЕП з частотним регулюванням. Структура таких ЕП реалізує стратегію підлеглого регулювання з широким діапазоном регулювання і високими динамічними показниками [10], але в ЕП металургійних машин застосування асинхронних двигунів обмежене через зростання додаткових динамічних навантажень [11].

Розрахунок динамічних навантажень в головних ЕП з асинхронними двигунами являє собою складну задачу і аналіз перехідних процесів з метою зниження коливальності виконують за умови лінеаризації динамічної механічної характеристики [12].

1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу роботи прокатного стана 550

В сортопрокатний цех вихідні заготовки квадратного і прямокутного перерізу поступають з прокатного цеху № 1 чи з інших підприємств залізничним транспортом. Заготовки проходять вхідний контроль якості поверхні, розмірів, кількості і складуються в штабелі на складі. Зі складу кранами заготовки вкладаються на загрузочні пристрої і подаються до нагрівальних печей з крокуючими балками. Завантажені у піч заготовки нагріваються до температури 1150-1200 ^{0}C і рольгангом подаються до

робочих клітей стану. Прокатка усього сортаменту стану проводиться в 8 клітях, які встановлені на 2-х паралельних лініях. Після прокатки в чистовій кліті розкат передається на ділянки пил гарячого різання для різання на штанги мірної, кратної мірної і немірної довжини. Для обрізі заднього кінця готового прокату і добору проб на лінії, що підводить до холодильників рольганга встановлена стаціонарна пила гарячого різання. Порізані штанги передаються на два паралельні холодильники. Після охолодження метал направляється на ділянки холодного різання, правки і далі на стелажі огляду. Увесь прокат, крім періодичного, проходить правку на 8-роликових правильних машинах. На ножицях холодного різання проводиться обрізання кінців з наступним діленням розкату на мірні довжини. Після огляду увесь прокат направляється в сортоукладники. Після завершення набору пачки сортоукладник відводиться з лінії рольганга для обв'язки пачки, яка потім передається на стелажі прийомки і маркірування з наступною видачею пачки краном на склад готової продукції.

Вихідна заготовка – перерізом 90-200×140-350 мм, довжиною 2,3-5,3 м – нагрівається в двох методичних печах з крокуючим подом до 1200-1220 ^{0}С. Прокатка ведеться на 8-клітьовому стані, що розташований у дві паралельні чотирьохклітьові робочі лінії. Перша кліть – обтискна реверсивна двовалкова 670 з довжиною бочки 1900 мм. Валки встановлені на підшипниках кочення. Кліть оснащена робочими і розкатними рольгангами, роликовими кантувачами-маніпуляторами – по два з кожної сторони. Перед кліттю має місце установка гідрозбиву окалини. В кліті 670 здійснюється від 1 до 5 проходів, в решті клітей – по одному проходу. Кліті № 2-8 нереверсивні попередньо напружені, валки діаметром 630 мм з довжиною бочки 800 мм встановлені на підшипниках рідинного тертя. Усі кліті стану мають індивідуальний електропривод. Кліті № 2-3 і № 5-6 складають безперервні групи. Після виходу з четвертої кліті розкат шлеперами передається на другу лінію. Для кантівки розкатів на 45 і 90^0 перед клітями № 2, 4, 5, 7, 8 встановлено шайбові кантувачі. Кліті № 2 і № 3 оснащені

валками. При прокатці періодичних профілів використовується спеціальна кліть № 8. Перед чистовим проходом в кліті № 8 проводиться гідрозбив окалини. Температура кінця прокатки – не нижче 780-800 ^{0}С. Після виходу з чистової кліті розкат подається до пил гарячого різання.

Схема напівнеперервного стана використана для середньосортного стана 550 наведена на рисунку 1.1. Стан призначений для прокатки автообводів, автовісей, коленвалів, автопетель, лемешної смуги.

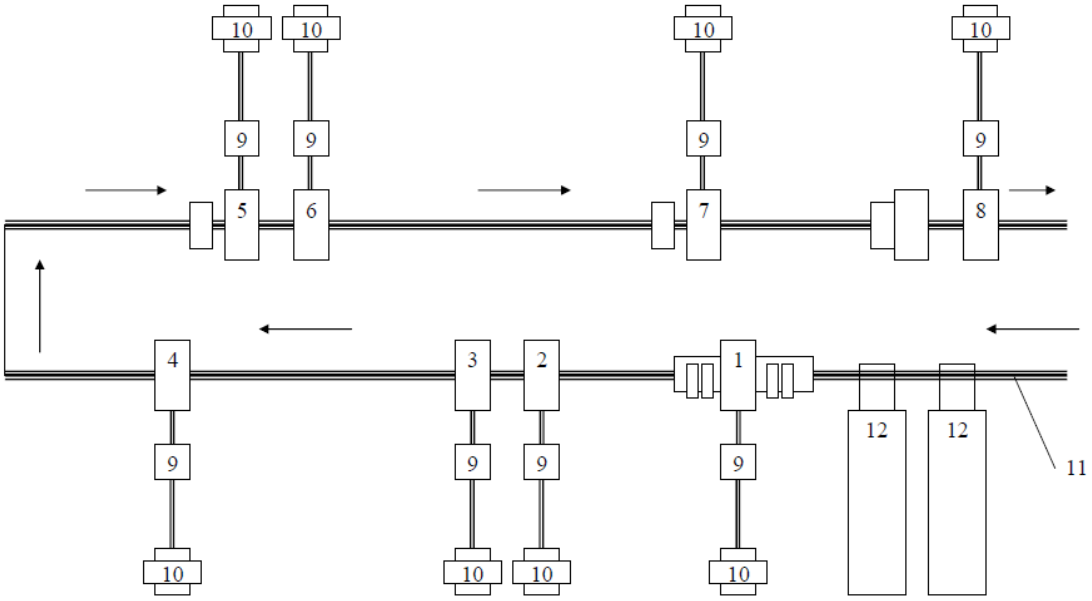


Рисунок 1.1 – Схема розташування клітей напівнеперервного сереньосортного стана 550

Згідно зі схемою злитки надходять за допомогою рольгангів 11 у печі 12, підігріваються до необхідної кондиції й направляються у обтискну реверсивну кліть дуо 1 з потужністю двигуна головного привода 2500 кВт й кутовою швидкістю 110/220 об/хв. Далі іде неперервна група з двох нереверсивних клітей дуо 2 (1530 кВт, 68/138 об/хв) і 3 (2100 кВт, 92/184об/хв), де прокатка виконується одночасно. Після цього заготовка надходить у нереверсивну кліть дуо 4 з потужністю двигуна 2100 кВт кВт й кутовою швидкістю 92/184 об/хв, яка стоїть окремо. Розташування обладнання стана 550, що розглядається, передбачає зміну напрямку прокатки для більш компактного розташування обладнання. Після четвертої

кліті заготовка змінює напрямок руху на протилежний і надходить у неперервну нереверсивну групу клітей 5 і 6 (2500 кВт, 110/220 об/хв).

Далі у напрямку прокатки знаходяться дві кліті 7 і 8. Кліть 7 стоїть окремо і є нереверсивною. Прокатка в ній виконується окремо від попередньої групи клітей. Потужність двигуна головного привода кліті складає 2500 кВт, кутова швидкість 110/220 об/хв. Нереверсивна кліть 8 вважається чистовою й має суміщену робочу лінію з кліттю для прокатки періодичних профілів. При прокатці автоободів, швелерів, куточків й інших профілів в робочу лінію встановлюється кліть №8 (4000 кВт, 110/220 об/хв). При прокатці періодичних профілів кліть №8 прибирається краном й замість неї встановлюється кліть для прокатки періодичних профілів.

1.3 Характеристики базового електропривода кліті № 6 прокатного стану 550, що працює в умовах ПрАТ «ДМЗ»

В таблиці 1.1 наведено основні характеристики електроприводів стану 550.

Таблиця 1.1 - Головні приводи стану 550 і установки захисту

Найменування	Кліті 1,5-7	Кліті 2-4	Кліть 8	Сист. резерв ування
1	2	3	4	5
Тип та номінальні дані двигуна	П22/52-2,5 МУ4 2500кВт; 750 В; 110/220 об/хв; 3650А	П22/52-2,5 МУ4 кліть 3,4 2100квт 630 В 92/184 об/хв;3650А кліть 2 1530кВт 460 В 68/136 об/хв.; 3650А	П2-21/90-4У4 4000кВт 750 В; 100/250 об/хв; 5700А	

Продовження табл.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Тип та номінальні дані перетворювача	Перетворювач для живлення якоря ТПП1 – 5000/5000 – 825 (кл.1) ТПП1 – 5000/2500 – 825 (кл.5-7) Ud–825B Id-5000A	Збуджувач КТЕ 320/440-912 ; Ud-440B Id-320A	Перетворю-вач для живлення якоря ТПП1 – 5000/2500 – 660 Ud–660B Id-5000A	Збуджу-вач КТЕ 320/440-912 Ud-440B Id-320A	Перетвор ювач для живлення якоря ТПП1 – 6300/6300 – 825 Ud–825B Id-6300A	Збуджу-вач КТЕ 320/440-912 Ud-440B Id-320A	Збуджу вач КТЕ 100/440 -912 Ud-440B Id-100A
Захист від перевищення випрямленого струму (геркони), А	6625*	480	6625*	480	8350*	480	150
Захист від перевищення випрямленого струму (датчик струму), А	13250	400	13250	400	16700	400	
Захист від перевищення випрямленого струму (рдш), А	10000		10000		15670		10000
Захист від перевантаження тиристорів по середньо-квадратичному струму, А /за час, с		480/130 550/70		480/130 550/70		480/130 550/70	150/130 175/70
Захист від стоянки двигуна під струмом, А /за час, с	3650/30		3650/30		5700/30		3650/30
Захист від перевищення струму збудження, А		265		265		330	265
Захист від зниження струму збудження, А		50		50		45	50
Захист від перевищення частоти обертання двигуна, об/хв		240		200 (для кліті 2 – 150)		275	240
Захист від перевищення струму двигуна (обмеження вхідного сигналу регулятора струму в САР), А		730		730		11400	730

Продовження табл.1.1

1	2	3	4	5	6	7	
Час зростання сигналу струмового задавача (обмеження проізводної струму двигуна) , мс		30		30		30	
Час зростання сигналу задавача інтенсивності швидкості (обмеження динамічного струму двигуна), с		2,75		2,1 (для кліті 2-1,7)		1,11	2,75
Захист від зниження напруги, власних потреб, В	300						
Захист від включення перетворювача на двигун, В	27						

*для одного випрямляючого моста

1.4 Вибір шляхів та постановка задачі модернізації електропривода кліті № 6 прокатного стану 550

У процесі експлуатації електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 з’ясувалося, що регулятор струму, встановлений у систему автоматичного управління електроприводом кліті №6, не відповідає умовам технологічного процесу.

Насамперед це пов’язано зі змінами у технології виробництва, а саме з частим переналагоджєнням прокатного стану, та браком під час виробництва.

Склалася така ситуація, коли при роботі прокатного двигуна в режимі холостого ходу, на низьких обертах, або при незначному навантаженні тиристорний перетворювач (ТП) працює у режимі переривчастих струмів, як наслідок переривчастий струм ТП помилково багаторазово підсилюється

регулятором струму, та подається на ТП у вигляді завдання, а потім на двигун.

Проведені дослідження з застосуванням сучасних вимірювальних спостерігаючи систем показали, що система керування через невдале рішення видає “фальшиві” керуючі імпульси. Це відбувається внаслідок того, що система має завищену чутливість і, поряд зі швидкодією, великий коефіцієнт підсилення. Випадкова перешкода за короткий час значно підсилюється і може прийматися за керуючий сигнал.

При такому режимі роботи двигун почитає розгойдуватися, спрацьовує захист, двигун відмикається від мережі та зупиняється. У процесі безперервної прокатки це призводить до аварії на виробництві, а саме браку прокату (готової продукції) та простоїв цеху.

Передбачається розробка та встановлення нового регулятору струму в існуючу систему керування електропривода кліті № 6 прокатного стану 550. При використанні нового типу регулятора (адаптивний регулятор струму), очікується надійна робота системи регулювання струму якоря двигуна на низьких обертах (під навантаженням) та холостому ходу, також це повинно істотно збільшити надійність роботи усього механізму прокатної кліті, а також скоротити витрати часу і засобів на ремонт і простої пов'язані з ним.

Інший етап модернізації передбачає заміну існуючої системи тиристорний перетворювач-двигун, на систему перетворювач частоти-асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

У новій системі регулювання швидкості привода кліті № 6 прокатного стану 550 планується встановити сучасний високовольтний перетворювач частоти, що буде отримувати живлення від існуючої мережі 6кВ, яка до цього використовувалася для живлення тиристорного перетворювача ТПП1 – 5000/5000 – 825, що надавав живлення двигуну постійного струму П22/52-2,5 МУ4 потужністю 2500кВт.

У зв'язку з цим актуальними задачами дослідження є:

1) розробка та дослідження динамічних властивостей автоматизваного електропривода кліті № 6 стану 550 з новим адаптивним регулятором струму для існуючої системи тиристорний перетворювач – двигун постійного струму;

2) розробка та дослідження динамічних властивостей автоматизваного електропривода кліті № 6 стану 550 з новою системою керування перетворювач частоти-асинхронний двигун з короткозамкненим ротором;

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

2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КЛІТІ ПРОКАТНОГО СТАНА 550

2.1 Вибір системи електропривода кліті № 6 прокатного стану 550

З умов технологічного процесу прокатки на прокатних станах випливають такі загальні вимоги: мінімальний час протікання перехідних процесів при заданих значеннях максимуму динамічного струму; велика кількість вмикання приводного двигуна (1000 вмикань на годину та більше); широкий діапазон регулювання швидкості (10:1); незалежність величини прискорення від швидкості, до якої буде розігнаний двигун; висока перевантажувальна здатність приводного двигуна за струмом та моментом з врахуванням того, що після захвату металу на протязі деякого проміжку часу двигун повинен переборювати одночасно динамічні зусилля та зусилля деформації металу; високий ступінь надійності роботи системи електропривода.

Для головних приводів подібних прокатних станів можливе застосування як двигуна змінного струму (асинхронного), так і двигуна постійного струму, причому застосування двигунів змінного струму стало можливим завдяки розширенню їх можливостей регулювання швидкості.

Вирішальним у виборі роду струму двигуна є те, що на цей момент головний електропривод кліті № 6 прокатного стану 550 приводиться в рух двигуном постійного струму при живленні від тиристорного перетворювача. Існуюча система регулювання швидкості є досить складною, та за наявністю двох комплектних тиристорних електроприводів, що застосовуються для жиалення якірного кола та обмотки збудження двигуна П22/52-2,5 МУ4 має дуже низький показник надійності роботи. Якщо ж виконати заміну даної системи регулювання швидкості на сучасну систему перетворювач частоти-асинхронний двигун, то значно підвищиться надійність системи, скоротиться час перехідного процесу при накиду навантаження на двигун, розшириться діапазон регулювання швидкості (вище за 10:1) і т.п.

З урахуванням усього сказаного вище, для електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 прийняте рішення про застосування сучасної системи перетворювач частоти-асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Порівняння економічних показників електроприводів постійного та змінного струмів показує, що у теперішній час електропривод змінного струму є дешевшим. Середня вартість електроприводу змінного струму приблизно на 15% менша, ніж вартість електропривода постійного струму. Для отримання високих динамічних характеристик електропривод змінного струму виконують з векторним керуванням, яке реалізовано з застосуванням засобів мікропроцесорної техніки. Векторне керування електроприводів з асинхронними двигунами має таку перевагу як незалежне регулювання складових сили струму, що створюють потік та момент [6-8].

2.2 Розрахунок параметрів та вибір елементів силової частини електропривода кліті № 6 прокатного стану 550

2.2.1 Вибір параметрів та елементів існуючої системи електропривода кліті № 6 виконаною схемою тиристорний перетворювач – двигун постійного струму

На підставі досвідчених даних для конкретного стану з відомими умовами прокатки, заздалегідь вибирається двигун. Потужність його заздалегідь вибирається на підставі графіку статичних моментів, складеному за даними технологічного процесу.

Сумарний момент опору при прокатуванні, приведений до валу двигуна:

$$M_C = \frac{M_{ПР}}{\eta} + M_{XX} \ , \qquad (2.1)$$

де $М_{ПР} = М_П + М_{ПШ}$ - момент прокатки з урахуванням тертя; $М_П$ − момент плющення за схемою плющення; $М_{ПШ}$ − момент тертя в підшипниках валків:

$$M_{ПШ} = Pd\mu,$$

де P − тиск металу на валок (за схемою прокатки); d − діаметр цапф валка; μ − коефіцієнт тертя в підшипниках валків (для підшипників з текстолітовими вкладишами μ = 0,05); η − ККД привода:

$$\eta = \eta_{ШП} \cdot \eta_{ШК} \cdot \eta_{ММ} = 0,94 \cdot 0,92 \cdot 0,99 = 0,85 , \qquad (2.2)$$

де $\eta_{ШП}$ = 0,94 − ККД шпинделя; $\eta_{ШК}$ = 0,92 − ККД шестерінчастій кліті; $\eta_{ММ}$ = 0,99 − ККД моторної муфти; $М_{ХХ}$ = 9,81 кНм − момент холостого ходу.

Фіктивний статичний момент, приведений до двигуна при роботі з послабленням поля збудження (при $\omega_В > \omega_Н$):

$$M'_C = M_C \cdot \frac{\omega_B}{\omega_H}, \qquad (2.3)$$

де $\omega_В$ − швидкість обертання двигуна, що встановилася; $\omega_Н$ − номінальна швидкість обертання двигуна.

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 110}{30} = 11,519 \; рад/сек, \qquad (2.4)$$

де $n_Н$ − номінальна швидкість обертання двигуна (об/хв).

Для побудови графіку кутової швидкості задаються величинами прискорення α = dω/dt і уповільнення приводу β = dω/dt:

$$\alpha = \beta = 70 \text{ (об/хв)/сек} = 7,33 \text{ рад/сек}^2.$$

Час розгону приводу до швидкості захвату:

$$t_P = \frac{\omega_З}{\alpha}, \qquad (2.5)$$

де $\omega_З$ − швидкість захоплення прокату (швидкість валків: $\omega_З = \omega$).

Розгон робиться один раз, у момент запуску двигуна. В цей час на двигуні − M_{XX} (момент холостого ходу). Гальмування також робиться один раз, при зупинці двигуна.

Кутова швидкість валків в режимі прокатування, м/с, що встановився:

$$V_{ПР} = \frac{Д_К \cdot \omega_У}{2}, \qquad (2.6)$$

де $Д_К$ − катаючий діаметр валків, м; $\omega_У = \omega$ − швидкість плющення, що встановилася, рад/сек.

Розрахункові значення вище перелічених величин найбільш важких для двигуна профілів, приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 − Розрахунок швидкісний, навантаженням діаграм, еквівалентного моменту

Найменування параметру прокатки	Позна-чення	Розмірність	Обід	Обід	Обід
			МАЗ - 500	БелАЗ - 035	БелАЗ - 023
Довжина смуги	L	м	11,0	14,76	7,75
Катаючий діаметр валків	$Д_К$	мм	608,3	615,4	603,4
Швидкість двигуна	ω	рад/с	11,51	9,95	9,42
Коефіцієнт послаблення поля	к	—	1,2	1,03	—
Швидкість прокатки	$V_{ПР}$	м/с	3,5	3,06	2,84
Момент прокатки	M	кНм	313,92	241,326	309,996
Момент холостого ходу	M_{XX}	кНм	9,81	9,81	9,81
Статичний момент	M_C	кНм	—	—	309,996
Фіктивний статичний момент	M'_C	кНм	376,704	248,566	—

Продовження таблиці 2.1

Машинний час прокатки	$t_М$	с	3,14	4,8	2,73
Час паузи	$t_П$	с	13,86	11,2	13,27
Час циклу	$t_Ц$	с	17	16	16
Розрахунок еквівалентного моменту	$M^2_С I_М$	$(кНм)^2 \cdot 10^3$ с	—	—	262,346
	$M'^2_С t_М$	$(кНм)^2 \cdot 10^3$ с	445,584	296,568	
	$M_Е$	кНм	162,139	55,145	56,049
Завантаження двигуна по нагріву	—	%	90	71	66
Завантаження двигуна по моменту	λ	%	1,7	1,34	1,7

Оскільки першим варіантом модернізації системи електропривода прокатної кліті № 6 передбачена розробка та встановлення нового регулятору струму в існуючу систему керування електропривода, то нам необхідно обрати двигун постійного струму. При виборі потужності двигуна приймають за основу найбільший момент, потрібний від електродвигуна.

$$P_{НПР} = 1,2 \frac{M_{СМАХ} \cdot \omega_У}{\lambda_{ДВ}} = 1,2 \frac{376,704 \cdot 11,519}{2,5} = 2082,84\ кВт, \qquad (2.7)$$

де $M_{СМАХ}$ − максимальний статичний момент, приведений до валу двигуна; 1,2 − коефіцієнт запасу; $\lambda_{ДВ}$ − перевантажувальна здатність двигуна.

Електродвигун встановлюється в машинному залі, недалеко від перетворювача, отже, необхідно вибирати двигун захищеного виконання, з примусовою вентиляцією, з напругою живлення 750В. Двигун вибирається по каталогу з серії П22, виходячи з номіналів: $P_Н$ = 2083кВт; $n_Н$ = 110 об/хв; $n_{МАХ}$ = 220 об/хв.

Поставленим умовам задовольняє електродвигун типу П22/52-2,5МУ4 технічних характеристики якого приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики електродвигуна П22/52-2,5МУ4

Найменування	Позначення	Номінал	Розмір-ність
Номінальна потужність	$P_Н$	2500	кВт
Номінальна частота обертання	$n_Н$	110	об/хв
Максимальна частота обертання	$n_{МАХ}$	220	об/хв
Номінальна напруга	$U_Н$	750	В
Номінальний струм	$I_Н$	3650	А
Опір якоря	$R_Я$	0,00818	Ом
Індуктивність якоря	$L_Я$	0,637	мГн
Напруга збудження	$U_{З.Н}$	130	В
Струм збудження	$I_{З.Н}$	245	А
Опір кола збудження	$R_{З.Н.}$	0,5647	Ом
Момент інерції двигуна	$J_{ДВ}$	$139{,}7 \cdot 10^3$	кг·м^2

Для перевірки попереднього вибраного двигуна за умовами нагріву і перевантажувальної здатності, будується діаграма навантаження M=f(t). Її побудова робиться на підставі рівняння руху електроприводу :

$$M = M_C + M_{ДИН}, \qquad (2.8)$$

де M − момент розвиваємий двигуном; M_C − статичний момент опору, приведений до валу двигуна, Нм; $M_{ДИН}$ − динамічний момент, приведений до валу двигуна.

Динамічний момент дорівнює:

$$M_{ДИН} = J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (2.9)$$

В даному випадку $M_{ДИН} = 0$, оскільки $d\omega = 0$, отже, з обліком цього отримаємо:

$$M = M_C, \qquad (2.10)$$

Для перевірки двигуна на нагрів застосовується метод еквівалентного моменту. Значення еквівалентного моменту знаходиться, з обліком (2.10), за формулою:

$$M_E = \sqrt{\frac{M_{XX}^2 \cdot t_П + M_C'^2 \cdot t_M}{t_Ц}}, \qquad (2.11)$$

де $t_Ц = t_П + t_M$ − час циклу, сек; $t_П$ − час паузи, сек; t_M − машинний час прокатки, с.

Отримані значення еквівалентного моменту для кожного з найбільш тяжких видів профілів наведені в таблиці 2.1. Найбільший еквівалентний момент M_E = 162,139 кНм.

Номінальний момент електродвигуна :

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{2500}{11,519} = 217\ кНм, \qquad (2.12)$$

Після перевірки:

$$M_H = 217\ кНм > M_E = 162,139\ кНм,$$

можна зробити висновок про те, що заздалегідь вибраний електродвигун задовольняє умовам нагріву.

Коефіцієнт перевантаження двигуна λ визначається по формулі:

$$\lambda = \frac{M_{MAX}}{M_H} = \frac{376,704}{217} = 1,74\ , \qquad (2.13)$$

де M_{MAX} − максимальний момент прокатки профілю "Обід МАЗ - 500".

Допустимий коефіцієнт перевантаження двигуна за технічними даними $\lambda_{ДОП}$ = 2,5; $\lambda_{ДОП}$ = 2,5 > λ = 1,74, тобто, заздалегідь вибраний двигун проходить по перевантаженню. Отже, вибір двигуна можна вважати задовільним.

Для управління і живлення електродвигуна постійного струму П22/52-2,5МУ4 головного приводу кліті №6 доцільно застосовувати

комплектний тиристорний перетворювач, який має малу потужність управління, високий ККД і чималу надійність. Він є універсальним засобом перетворення змінної напруги живлячої мережі в регульовану постійну напругу. Управління електродвигуном здійснюється системою регулювання, побудованою на базі універсальної блокової системи регулювання (УБСР).

При виборі перетворювача необхідно дотримуватися умов:

$$I_{dH} > I_H,\ U_{dH} > 1{,}05U_H,\ I_{d\,MAX} \geq I_{ДВ\,MAX} \text{ або } \lambda_П I_{dH} \geq \lambda_{ДВ} I_H, \qquad (2.14)$$

де I_{dH} − номінальний струм перетворювача; I_H − номінальний струм двигуна; U_{dH} − номінальна напруга перетворювача; U_H − номінальна напруга двигуна; $\lambda_П$ − коефіцієнт перевантаження по струму перетворювача; $\lambda_{ДВ}$ − коефіцієнт перевантаження по струму двигуна. Для живлення якірної обмотки електродвигуна, тому приймається тиристорний перетворювач серії ТПП-1, що випускається ЗПО "Перетворювач".

Характеристики агрегату ТПП-1-5000/5000- 825 - УХЛ4 задовольняють поставленим умовам: $I_{dH} = 5000А > I_H = 3650А$; $U_{dH} = 825В > 1{,}05U_H = 787{,}5В$; $I_{d\,MAX} = \lambda_П I_{dH} = 2 \cdot 5000А > I_{ДВ\,MAX} = \lambda_{ДВ} I_H = 2{,}5 \cdot 3650А$.

Для живлення обмотки збудження приводного електродвигуна кліті № 6 вибирається комплектний тиристорний електропривод КТЭ - 320/440 - 912 - 24 МТ - УХЛ4, виробник ЗПО "Перетворювач" - тиристорний збудник, однодвигунний, нереверсивний, з підключенням до мережі через трансформатор.

Характеристики електропривода задовольняють умовам:

$$U_{dH} = 440В > К_Ф \cdot U_{В.Н}\ 130 \cdot 3 = 390В,$$
$$I_{dH} = 320А > I_{В.Н} = 245А,$$

де $К_Ф$ − коефіцієнт форсування; $U_{В.Н}$ − напруга збудження двигуна; $I_{В.Н}$ − струм збудження двигуна. Схема системи тиристорний перетворювач –

двигун постійного струму наведена на листі графічної частини випускної роботи магістра 1.

Електропривод складається з функціональних частин: шафа силова (ШС), шафа управління (ШУ), шафа додаткової апаратури (ШДА), шафа трансформатора (ШТ). Охолодження силової частини - природне повітряне. У силову шафу поміщені блоки імпульсних пристроїв, запобіжників, блок захисту від перенапружень. Індукційна апаратура і вимірювальні прилади розташовуються на дверях шафи. У шафі управління розташовуються системи імпульсно - фазового управління, регулювання, захисту і сигналізації. Вони конструктивно виконані в уніфікованих осередках БУК - б, встановлюваних в касети, які кріпляться на поворотній рамі. Під поворотною рамою поміщуються автоматичні вимикачі включення живлення власних потреб. У шафу додаткової апаратури встановлюються джерела живлення системи збудження, тахогенератора, вивідні шини постійного струму. Шафа трансформатора містить силовий трансформатор типу ТСЗП - 250/0,7 УЗ Δ/Δ - 0 (мережева обмотка: S_1 = 235 кВА, U_1 = 380В вентильна обмотка U_2 = 416В, I_2 = 326А).

Реверсування електродвигуна відбувається шляхом використання реверсивного перетворювача ТПП-1 у колі якоря. Це дозволяє широко використати перевагу тиристорного електроприводу: швидкодія; можливість рекуперативного гальмування з віддачею енергії в мережу; відсутність контактів в силовому колі. Випрямляч серії ТПП-1 включає конструктивні одиниці: силовий трансформатор; вентильну секцію (шафа введення і силові шафи); шафа управління; шафа із струмообмежувальним вимикачем; реактори в захищеному виконанні. У силову шафу вентильних секцій поміщається тиристорний міст, в кожному плечі якого паралельно включені дванадцять тиристорів. У шафі введення вентильної секції розміщуються системи захисту від зовнішніх перенапружень (на основі варисторів) і від внутрішніх комутаційних перенапружень (на основі RC - кола), датчики закритого стану вентилів, датчики струму і напруги, автоматичні вимикачі власних потреб постійного і змінного струму. У шафу з автоматичним

вимикачем поміщений струмообмежувальний вимикач ВАТ - 42 - 6300/10ЛА - У4 ($I_Н$ = 5000А), апарати управління вимикачем, реле РДШ - 6000 ($I_{УСТ}$ = 11000А). У шафі управління розташовуються елементи СІФУ, гальванічної розв'язки, захисту і сигналізації, вихідних каскадів. У шафу вводу вбудований трансформатор ТМП - 4000/10 У2, Δ/Δ- 0, виконання 6, $S_Н$ = 4000кВА (мережева обмотка: U_1 = 6 кВ, вентильна обмотка: U_2=710В, I=4080А), охолодження - масляне. Перетворювач укомплектовується згладжуючим реактором СРОСЗ - 3200М ($I_{НОМ\ Р}$ = 6300А, $L_{Р\ 1}$ = 0,125 мГн). Випрямляч ТПП живиться від мережі 6 кВ, через знижувальний трансформатор ТМП - 4000/10 У2. Він подає живлення на мости "вперед" і "назад". Номінальний струм моста "вперед" - 5000А, моста "назад" - 5000А.

У цій системі живлення електродвигуна використовується дванадцяти-пульсна схема пульсацій напруги. Вона забезпечує зрушення векторів напруги вторинної обмотки трансформатора на 60 електричних градусів. Управління тиристорами випрямляючих мостів - роздільне. Управляючі імпульси подаються на групу вентилів, яка в даний момент повинна працювати. На непрацюючій групі імпульсів немає. Зняття управляючих імпульсів робиться логічним перемикальним пристроєм (ЛПП), який визначає момент рівності нулю струму перетворювача, блокує імпульси для раніш працюючої групи і по закінченню безструмової паузи (для компенсації зони нечутливості датчика нульового струму), дозволяє подання управляючих імпульсів на вентилі іншої групи.

2.2.2 Вибір параметрів та елементів модернізованої системи електропривода кліті № 6 виконаною за схемою перетворювач частоти – високовольтний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором

Другим етапом модернізації електропривода кліті № 6 передбачено заміну існуючої системи тиристорний перетворювач-двигун, на систему

перетворювач частоти-асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. У новій системі регулювання швидкості привода кліті № 6 прокатного стану 550 планується встановити сучасний високовольтний перетворювач частоти, що буде отримувати живлення від існуючої мережі 6кВ,

Згідно технологічних особливостей роботи стану 550 підприємство ПрАТ «ДМЗ» зупинило випуск ободів МАЗ-500 ще на початку 2000 року, із за того, що дана марка автомобіля Мінським автомобільним заводом була припинена. Необхідність у встановленні двигуна великої потужності відсутня. Використавши данні таблиці 2.1 найбільший еквівалентний момент для профілю ободу БелАЗ-023 M_E = 56,049 кНм. При виборі потужності двигуна приймають за основу найбільший момент, потрібний від електродвигуна.

$$P_{НПР} = 1,3 \cdot \frac{M_{СМАХ} \cdot \omega_{\max}}{\lambda_{ДВ}} = 1,3 \cdot \frac{376,704 \cdot 23,02}{3,2} = 3516,67\ кВт, \qquad (2.15)$$

де M_{CMAX} − максимальний статичний момент, приведений до валу двигуна; 1,3 − коефіцієнт запасу; $\lambda_{ДВ}$=3,2 − перевантажувальна здатність двигуна.

Двигун обирається по каталогу з серії H-compact Plus, виходячи з номіналів: P_H = 3600 кВт; U_H = 6кВ; Iн=440А; $\omega_H = 62,41 рад/с$.

Поставленим умовам задовольняє електродвигун H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ асинхронний з короткозамкненим ротором: U=6кВ; P=3600 кВт; I=440А; ККД=95,5 %; коефіцієнт потужності - 0,81[13].

Найбільший еквівалентний момент для умови роботи заданого типу двигуна M_E = 56,049 кНм.

Номінальний момент електродвигуна :

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{3600}{62,41} = 57,687\ кНм, \qquad (2.16)$$

Після перевірки:

$$M_H = 57{,}687 \text{ кНм} ; M_E = 56{,}049 \text{ кНм},$$

можна зробити висновок про те, що заздалегідь вибраний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ задовольняє умовам нагріву.

Темою випускної роботи магістра передбачена модернізація привода кліті № 6 стану 550. У якості приводного двигуна вибраний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором типу H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ .

Номінальний лінійний струм двигуна змінного струму Ілн., та повна потужність, яку споживає двигун Sндв розраховуються за формулами:

$$\text{Ілн} = \frac{\text{Рн} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \text{Улн} \cdot \eta\text{н} \cdot \cos f_н} = \frac{3600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0{,}955 \cdot 0{,}81} = 440 \text{ А}, \quad (2.17)$$

$$\text{Sндв} = \sqrt{3} \cdot \text{Улн} \cdot \text{Ілн} \cdot 10^{-3} = 1{,}73 \cdot 6000 \cdot 440{,}2 = 4567{,}32 \text{ кВА}, \quad (2.18)$$

де Рн – номінальна потужність двигуна; ηн - номінальний ККД двигуна; $\cos f_н$ – номінальний коефіцієнт потужності двигуна.

Вибір перетворювача частоти виконуємо за умовами:

$$\text{Uн} \geq \text{Улн}; \quad \text{Ін} \geq \text{Ілн}; \quad \text{Sн} \geq \text{Sндв}. \quad (2.19)$$

В таблиці 2.3 наведена порівняльна характеристика трьох перетворювачів частоти.

Таблиця 2.3 – порівняльна характеристика перетворювачів частоти

Назва перетворювача	Power Flex 7000	TMdrive – MVG	Perfect Harmony
Фірма виробника	Rockwell Automation (USA)	Mitsubishi – Toshiba(Japan)	Siemens (Germany)
Елементна база	тиристори з симетричним керуючим електродом (SGCT)	IGBT транзистори	IGBT транзистори
ККД	98%	97%	97%
Коефіцієнт потужності	0,95	0,95	0,95
Вплив гармонік	≤ 5%	≤ 4%	≤ 3%
Необхідність встановлення фільтру гармонік	Потребує фільтр гармонік	Не потребує фільтр гармонік	Не потребує фільтр гармонік
Принцип керування	Векторний	Векторний	Векторний
Діапазон потужностей	3-6,6 кВ 373-6340 кВт	3-11 кВ 300-9300 кВт	2-14,5 кВ 149-6000 кВт
Діапазон регулювання швидкості	1:1500	1:1500	1:1500

Вибираємо високовольтний перетворювач частоти типу Perfect Harmony фірми Siemens з такими паспортними даними: номінальний струм – 500 А; номінальна потужність – 5500 кВА; вихідна частота – 0,5-120Гц; метод керування – безсенсорне векторне керування+багаторівнева широтно-імпульсна модуляція (ШІМ); габарити В/Ш/Г, мм – 2934/9366/1500; вага – 32000кг [14].

Високовольтні перетворювачі частоти «Perfect Harmony» призначені для частотного регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів потужністю від 149кВт до 6000кВт та номінальною напругою 2-14,5кВ. Перетворювач частоти реалізований за схемою багаторівневого інвертора напруги з інтегрованим багатообмотковим (фазообертаючим) трансформатором. У якості силових елементів використовуються IGBT транзистори (біполярний транзистор з ізольованим затвором). Багаторівнева структура інвертора дозволяє забезпечувати високу якість показників пуску та гальмування зі сторони електродвигуна, повну відсутність гармонійних складових. Багатообмотковий трансформатор забезпечує високу пульсність випрямляча на стороні мережі, більше 24, відповідно відсутність впливу на показники якості напруги мережі.

До силової схеми «Perfect Harmony» (рисунок 2.1) входить силовий багатообмотковий трансформатор з повітряним охолодженням силових комірок. Висока напруга на виході перетворювача формується за рахунок послідовного увімкнення силових комірок. У залежності від вихідної номінальної напруги електродвигуна, кількість комірок на фазу складає: для 3кВ (3,3кВ) по 3(4) послідовно з'єднані комірки у кожній фазі; з виходом 6кВ (6,6кВ) по 6(7) комірок у кожній фазі, з виходом 10кВ (11кВ) по 8(9) комірок у кожній фазі.

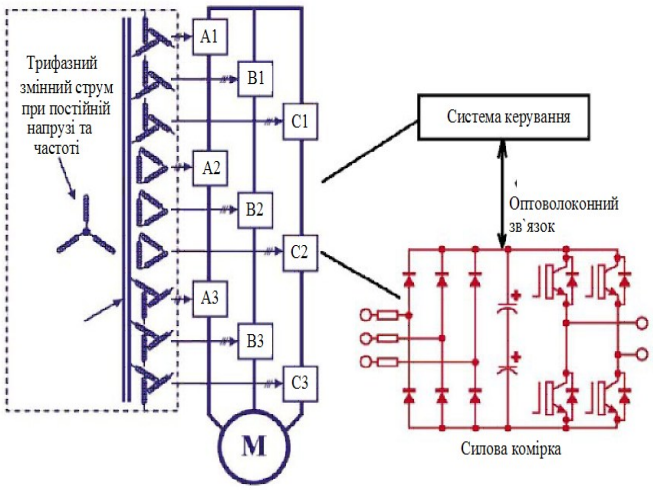


Рисунок 2.1 – Силова схема перетворювача частоти «Perfect Harmony»

Частота перемикання кожної комірки ШІМ складає 700Гц. Так як у лінійній вихідній напруги завжди приймають участь дві фази, то результуюча частота подвоюється. Кількість комірок на фазу діє як помножувач. Таким чином, результуюча частота модуляції складає 1,4кГц. Основні складові перетворювача частоти наведені на рисунку 2.2.

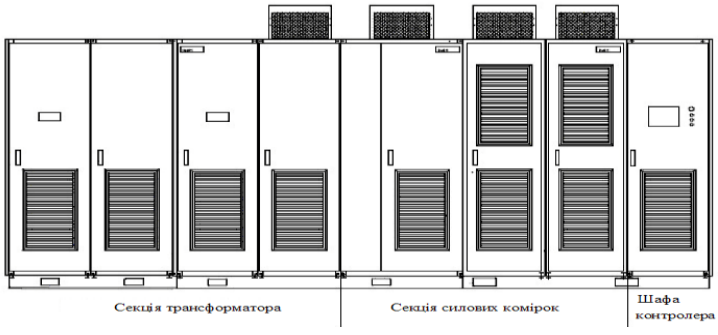


Рисунок 2.2 – Основні складові перетворювача частоти «Perfect Harmony»

Шафа перетворювача частоти складається з таких секцій:

1. Секція трансформатора: силовий трансформатор змонтований у шафі. Клеми підключення силового живлення та електродвигуна також знаходяться у шафі трансформатора. Підвід силових кабелів можливий як знизу, з кабельної шахти, та і з верху. У залежності від потужності для охолодження трансформатора на даху встановлено два та більше витяжних вентиляторів.

2. Секція силових комірок: у залежності від номінальної напруги двигуна кількість силових комірок на фазу від трьох до дев’яти. Силові комірки з’єднані послідовно по 4, 8 або 9 на кожну фазу.

3. Шафа керування: містить компоненти для керування перетворювачем частоти, має сенсорну панель для відображення робочих параметрів та введення керуючих впливів, різноманітні інтерфейси для передачі даних на верхній рівень керування.

На рисунку 2.3 представлена векторна діаграма формування фазної та лінійної напруги на виході перетворювача частоти.

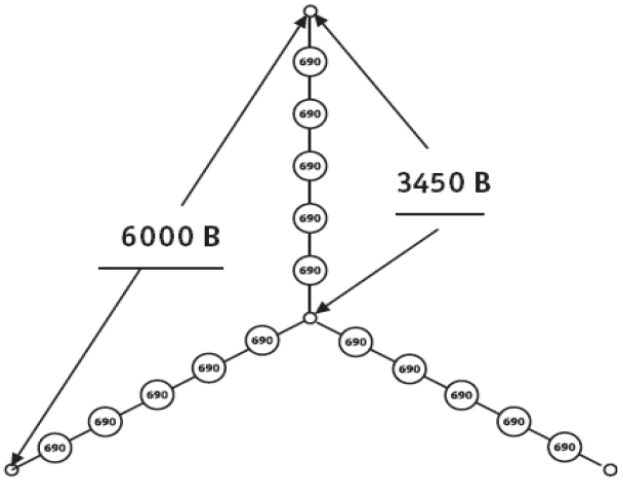


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма формування фазної та лінійної напруги на виході перетворювача частоти «Perfect Harmony»

Кожна силова комірка ізольована від шафи керування. Керуючі та контрольні сигнали передаються за оптоволоконним зв’язком. Це рішення забезпечує високий ступінь захисту від перешкод та пробою високої напруги

на систему керування. Силова комірка складається з мостової схеми некерованого випрямляча, ланки постійного струму, керованого інвертора на IGBT модулях та плат власного живлення та керування.

Силові комірки ідентичні (рисунок 2.4) та встановлені на шасі для зручності монтажу-демонтажу та локального ремонту. Модульна конструкція передбачає середній час ремонту 20хв. Комірка легко заміняється, при цьому відключаються п’ять з’єднувальних проводів та два кабеля оптоволоконної оптики.

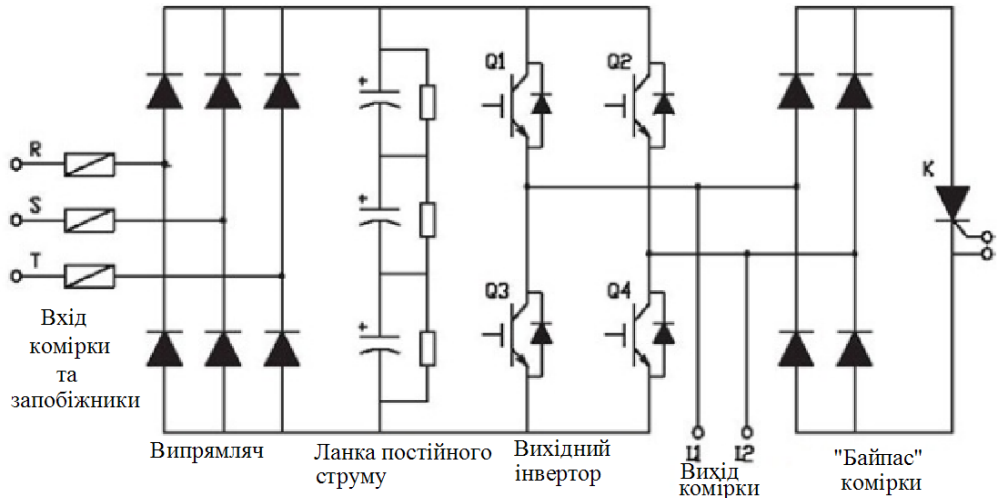


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд силової комірки

Керування та контроль процесу формування вихідної напруги здійснюється високошвидкісним контролером. Спеціалізоване програмне забезпечення дозволяє досягнути найкращого алгоритму взаємодії перетворювач-двигун. Вбудований у ПЧ промисловий логічний контролер (PLC) забезпечує логічну обробку вхідних/вихідних сигналів керування перетворювачем та комутацію з периферійним обладнанням. За конструкцією програмований логічний контролер включає до себе центральний процесор SIEMENS S7-200, модулі вводу/виводу аналогових та дискретних сигналів.

Схема підключення перетворювача частоти Perfect Harmony фірми Siemens до мережі наведена на рисунку 2.5.

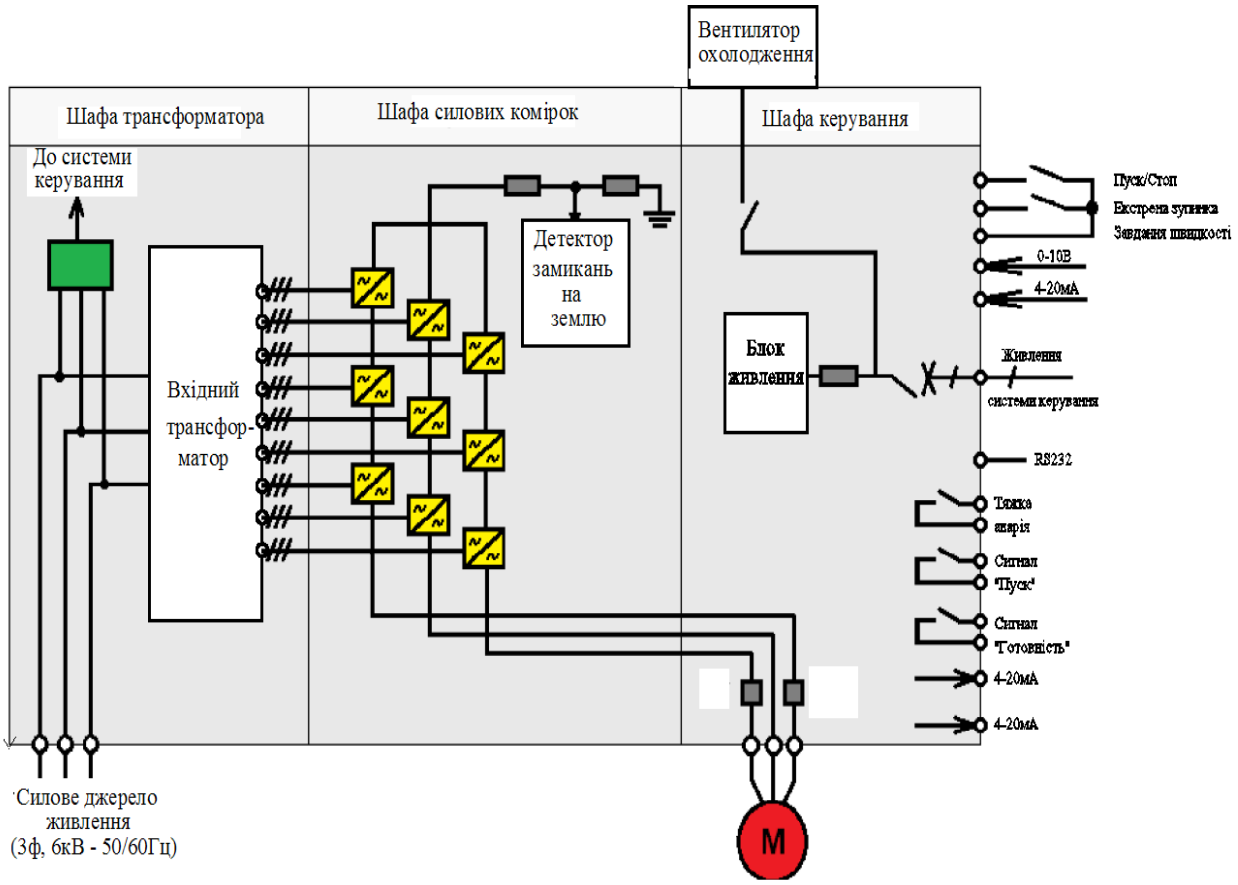


Рисунок 2.5 – Схема підключення перетворювача частоти Perfect Harmony фірми Siemens

2.3 Складання структурної схеми електропривода кліті № 6 за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму та її оптимізація

2.3.1 Регулятор струму

Провівши попереднє вивчення ефективності роботи середньосортного стану 550, зокрема кліті № 6, з’ясувалося, що регулятор струму, встановлений у систему автоматичного керування електроприводом кліті №6 не відповідає умовам технологічного процесу. Насамперед це пов’язано зі змінами у технології виробництва, а саме з частим переналагоджєнням прокатного стану, та браком під час виробництва. Склалася така ситуації,

коли при роботі прокатного двигуна в режимі холостого ходу, на низьких обертах та при малому навантаженні ТП працює у режимі переривчастих струмів, як наслідок переривчастий струм ТП помилково багаторазово підсилюється регулятором струму (РС), та подається на ТП у вигляді завдання, а потім на двигун. При такому режимі роботи двигун почитає розгойдуватися, спрацьовує захист, двигун відмикається від мережі та зупиняється. У процесі безперервної прокатки це призводить до аварії на виробництві, а саме браку прокату (готової продукції) та простоїв цеху.

Тому, було запропоновано розробити новий регулятор струму (адаптивній регулятор струму) на базі наявного. При використанні такого типу регулятора (адаптивній регулятор струму), очікується надійна робота системи регулювання струму якоря двигуна на низьких обертах (під навантаженням) та холостому ходу, також це повинно істотно збільшити надійність роботи усього механізму прокатної кліті, а також скоротити витрати часу і засобів на ремонт і простої пов'язані з ним.

Сучасні комплектні електроприводи (КЕП) на відміну від старих, аналогових не використовують у своїй структурі адаптивний регулятор (АР) [15-17], але в тих економічних умовах, в яких знаходиться підприємство ПрАТ «ДМЗ» використання сучасних КЕП неможливо. Тому перший шлях модернізації передюачає використання АР. Наявність останнього [18-20] дозволяє суттєво покращити показники якості керування, особливо коли цьому регулятору притаманні нелінійні властивості.

В процесі порівняльного аналізу способів регулювання струму якоря [14-17], було віддано перевагу регулятору струму якоря фірми Westinghouse, і на його основі розроблений поліпшений нелінійний регулятор струму [20], який поєднує в собі позитивні властивості регулятора змінної динамічної структури, але до того ж має змінну постійну часу інтегрування, яка є функцією своєї вихідної напруги.

Принципова схема поліпшеного нелінійного регулятора струму наводиться на рис. 2.9.

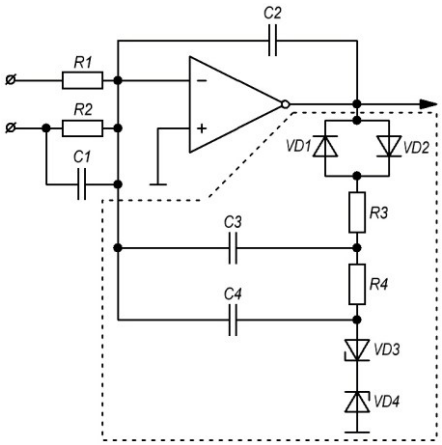


Рисунок 2.6 − Поліпшений нелінійний регулятор струму якоря

Для початкової ділянки характеристики вентильного перетворювача напруга виходу регулятора струму якоря $U_{СЯ}$ залежно від кута початкового фазування складає 0,4 … 1,2 В. При цьому діоди VD1,2 закриті, і постійна інтегрування регулятора визначається величиною ємності С2. При збільшенні напруги вище 0,6 В, через ці діоди підключаються ємності С3 і С4 і постійна часу інтегратора визначається вже сумарним значенням С2, С3 і С4. Перехід до ділянки визначєної нелінійністю характеристики ТП для СІФУ з опорною пилкоподібною напругою, відбувається при вихідній напрузі регулятора струму 4,5….5 В. При цьому пробиваються стабілітрони VD3 і VD4, конденсатор С4 відключається від схеми. Постійна інтегрування регулятора визначається ємностями С2 і С3. Таким чином, ємності С3 і С4 призначені для компенсації нелінійності статичної характеристики перетворювача. У разі ж виникнення субгармонійних коливань при напрузі якоря, близькій до нуля, неминуче зміниться амплітудне значення вихідної напруги регулятора, що приведе до відповідного підключення ємностей С3 і С4 і збільшенню постійної інтегрування. Значне зменшення постійної інтеграції регулятора сприяє швидшому проходженні зони нечутливості в тиристорному перетворювачі, що дуже важливо при реверсах струму якоря і дозволяє реалізувати розсунення кутів початкового фазування до 100 - 110^0 електричних градусів, що є значним резервом підвищення надійності СІФУ.

Таким чином на головних приводах, де подібний регулятор застосовується для 12 - пульсних схем випрямлення і для 6 - пульсних схем, (аналогічно приводам КТЕ) - кут початкового фазування може бути встановлений 105^0 електричних градусів. Зниження коефіцієнта посилення регулятора призводить до того, що в переривчастому режимі частота зрізу контура частоти обертання відводиться вліво (обмежується частота пропускання), незалежно від якості налаштування контура струму система залишається сильно демпфованою, і на холостому ходу не виникає ніяких коливань і ривків.

Застосування такого регулятора в уніфікованій системі має мету підвищення надійності автоматичної системи управління (АСУ) електроприводу в цілому, оскільки в принципі, контур регулювання струму якоря із запропонованим поліпшеним нелінійним регулятором в переривчастому режимі "розладнується" украй трохи (час перехідного процесу у гіршому разі зростає до 40 мс при розрахунковому значенні 30 мс) при гарантованій відсутності перерегулювання по струму. Як показала практика впровадження, такий регулятор не потребує підстроювання при наладці [14-20].

2.3.2 Розрахунок і вибір елементів силової схеми електропривода кліті № 6 за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму

Метою моделювання оновленої системи є доказ, того що нове схемне рішення регулятора струму не поступається за технічними характеристиками раніш встановленому.

Моделювання проводиться за допомогою програми MatLab Simulink. Для виконання моделювання використовуються технічні характеристики, наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 − Технічні характеристики

Найменування	Позначення	Номінал
Втрати холостого ходу трансформатора	ΔP_{XX}	7100Вт
Втрати короткого замикання трансформатора	$\Delta P_{КЗ}$	30500Вт
Номінальна потужність трансформатора	$S_{ТР}$	4000 кВА
Лінійна напруга вентильної обмотки трансформатора	$U_{2Л}$	710 В
Напруга короткого замикання трансформатора	$\Delta U_{КЗ}$	7,5%
Пульсність мостовий схеми тиристорного перетворювача	m	12
Номінальний струм електродвигуна	$I_{Н}$	3650 А
Номінальна напруга електродвигуна	$U_Н$	750 В
Номінальна потужність електродвигуна	$P_Н$	2500 кВт
Номінальна частота обертання електродвигуна	$n_Н$	110 об/хв
Кутова швидкість обертання електродвигуна	$\omega_Н$	11,519 рад/с
Активний опір якоря електродвигуна	$R_Я$	0,00818 Ом
Індуктивний опір якоря електродвигуна	$L_Я$	$0{,}7 \cdot 10^{-3}$ Гн
Максимальна статична похибка	δ	0,11
Кратність максимального струму	I_{max}	$2{,}5 \cdot I_Н$
Коеффіцієнт інерції	FI	1,65
Постійна часу ТП	$T_μ$	0,010 с
ККД електродвигуна	η	0,875
Номінальний момент електродвигуна	$M_Н$	$2{,}17 \cdot 10^5$ Нм
Момент інерції електродвигуна	$J_{ДВ}$	$139{,}7 \cdot 10^3$ кг•м^2
Коефіцієнт, що враховує зміну опорів при нагріві	$\beta_Т$	1,24

2.3.2.1 Вибір тиристорного перетворювача та розрахунок параметрів схеми

ТП якірного кола вибирається по номінальній напрузі $U_Н$ і струму $I_Н$ двигуна:

$$U_{ДН} \geq U_Н, \quad I_{ДН} \geq I_Н, \tag{2.20}$$

де $U_{ДН}$, $I_{ДН}$ − номінальні значення випрямленої напруги і струму ТП.

Тип тиристорного перетворювача: ТПП1 – 5000/5000 – 825;

Тип трансформатора: ТСЗП-25 з параметрами: $S_Н$ = 4000 кВА; $U_{2Л}$ = 710 В%; $U_{ДН}$ = 825 В; $I_{ДН}$ = 5000 А; $\Delta P_{КЗ}$ = 30500 Вт; $\Delta U_{КЗ}$ = 7,5%.

Активний опір фази трансформатора:

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot (U_{2Л})^2}{S_H^2 \cdot 10^6} = \frac{30500 \cdot (710)^2}{(4000 \cdot 10^3)^2} = 9,609 \cdot 10^{-4} Ом, \quad (2.21)$$

Повний опір фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки:

$$Z_{TP} = \frac{\Delta U_{K3} \cdot (U_{2Л})^2}{100 \cdot S_H \cdot 10^3} = \frac{7,5 \cdot (710)^2}{100 \cdot 4000 \cdot 10^3} = 9,452 \cdot 10^{-3} Ом, \quad (2.22)$$

Індуктивний опір фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки:

$$X_{TP} = \sqrt{Z_{TP}^2 - R_{TP}^2} = \sqrt{(9,452 \cdot 10^{-3})^2 - (9,609 \cdot 10^{-4})^2} = 9,403 \cdot 10^{-3} Ом, \quad (2.23)$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{TP} = \frac{X_{TP}}{\omega_1} = \frac{9,403 \cdot 10^{-3}}{314} = 2,993 \cdot 10^{-5} Гн, \quad (2.24)$$

$\omega_1 = 100 \cdot \pi = 314$ рад/с - кутова частота струму у живлячій мережі.

Для отримання гранично-безперервного режиму при заданому куті регулювання в коло випрямленого струму необхідно включати індуктивність, значення якої: m = 12 - пульсність мостової схеми ТП; $I_{dгр} = 0,1 \cdot I_H = 365$ - значення гранично-безперервного струму, А; $\alpha \max = \frac{\pi}{2} = \frac{3,14}{2} = 1,571$ - максимальний кут регулювання, що відповідає мінімальній швидкості обертання двигуна.

Максимальна ЕРС тиристорного перетворювача:

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2Л} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) = \frac{12}{3,14} \cdot \sqrt{2} \cdot 710 \cdot \sin\left(\frac{3,14}{12}\right) = 992,661 В, \quad (2.25)$$

$$L_{ДР} = \frac{E_{d0}}{\omega_1 \cdot I_{dгр}} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \frac{1}{\tan\cdot\left(\frac{\pi}{m}\right)}\right) \cdot \sin(\alpha \max) - L_{Я} - 2 \cdot L_{ТР} =$$

$$\frac{992,661}{314 \cdot 365} \cdot \left(1 - \frac{3,14}{12} \cdot \frac{1}{\tan\cdot\left(\frac{3,14}{12}\right)}\right) \cdot \sin(1,571) = -5,612 \cdot 10^{-4}\, Гн, \quad (2.26)$$

Відносна величина ефективного значення першої гармоніки випрямленої напруги:

$$e_1 = \frac{2}{m^2 - 1} \cdot \sqrt{\cos(\alpha \max)^2 + m^2 \cdot \sin(\alpha \max)^2} = \frac{2}{12^2 - 1} \cdot \sqrt{\cos(1,571)^2 + 12^2 \cdot \sin(1,571)^2} = 0,168\, В, \quad (2.27)$$

Необхідне значення індуктивності згладжуючого дроселя, вживаного для зменшення пульсацій випрямленого струму якоря:

$K_i = 0,05$ - допустимий коефіцієнт пульсацій струму якоря;

$$L_{ДР} = \frac{E_{d0} \cdot e_1}{\omega_1 \cdot I_Н \cdot m \cdot K_i} - L_{Я} - 2 \cdot L_{ТР} = \frac{992,661 \cdot 0,168}{314 \cdot 3650 \cdot 12 \cdot 0,05} - 7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 2,99 \cdot 10^{-5} = -5,177 \cdot 10^{-4}\, Гн, \quad (2.28)$$

При короткому замиканні на стороні постійного струму реактор повинен обмежити швидкість наростання аварійного струму, щоб він не перевищив небезпечного для тиристорів значення до спрацьовування захисних пристроїв. Індуктивність реактора розраховується за формулою:

$$L_{ДРКЗ} = \frac{2,1 \cdot U_{2Л}}{\omega_1 \cdot (I_{ДОД} - I_{ПОЧ})} - 2 \cdot L_{ТР} = \frac{2,1 \cdot 710}{314 \cdot (54750 - 3650)} - 2 \cdot 2,99 \cdot 10^{-5} = 3,302 \cdot 10^{-5}\, Гн. \quad (2.29)$$

де $I_{ДОП} = 15 \cdot I_Н = 15 \cdot 3650 = 5,475 \cdot 10^4\, А$ – максимально допустимий впродовж одного напівперіоду струм тиристора,

$I_{ПОЧ} = I_Н = 3650$ А – струм навантаження в момент короткого замикання.

У разі однофазного перекидання в мостовій схемі якір двигуна замикається через тиристори. Індуктивність реактора, необхідна для обмеження аварійного струму на час спрацьовування захисту: $R_{Я} = 8{,}18 \cdot 10^{-3}\,Ом$ - опір якірного кола; $\beta_m = 1{,}24$ - коефіцієнт, що враховує нагрів обмоток; $E_{Н} = U_{Н} - I_{Н} \cdot R_{Я} \cdot \beta_m = 950 - 3650 \cdot 8{,}18 \cdot 0^{-3} \cdot 1{,}24 = 712{,}97\ В$ – номінальна ЕРС; $E_{ПОЧ} = E_{Н} = 712{,}97\ В$ – ЕРС двигуна у момент початку перекидання інвертора.

$$L_{ДРП} = \frac{0{,}01 \cdot R_{Я}}{\ln\left(\dfrac{\dfrac{E_{ПОЧ}}{R_{Я}} - I_{ПОЧ}}{\dfrac{E_{ПОЧ}}{R_{Я}} - I_{ДОП}}\right)} - L_{Я} = \frac{0{,}01 \cdot 8{,}18 \cdot 10^{-3}}{\ln\left(\dfrac{\dfrac{712{,}97}{8{,}18 \cdot 10^{-3}} - 3650}{\dfrac{712{,}97}{8{,}18 \cdot 10^{-3}} - 54750}\right)} - 0{,}7 \cdot 10^{-3} = -6{,}136 \cdot 10^{-4}\,Гн. \qquad (2.30)$$

В якості необхідної індуктивності реактора, що встановлюється в колі випрямленого струму, приймається найбільше зі знайдених значень. Якщо отримана величина позитивна, до установки приймається один реактор. Його параметри визначаються залежно від струму двигуна:

$$I_{РН} \geq I_{Н}$$

Вибираємо реактор СРОСЗ - 3200М: $I_{НОМ\ Р} = 6300А$; $L_{Р\ 1} = 0{,}125$ мГн; $R_{ДР} = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Шунт для кола якоря вибирається за умови:

$I_{ШН} \geq I_{Н}$, $I_{ШН} = 6300$ А,

Падіння напруги на шунті при номінальному струмі:

$$U_{ШН} = 75 \cdot 10^{-3}\,В,$$

$$K_{ШН} = \frac{U_{ШН}}{I_{ШН}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{6300} = 1{,}19 \cdot 10^{-5}. \qquad (2.31)$$

Вибір тахогенератора робиться по максимальній швидкості обертання.

$\omega_{ТГ} \geq \omega_{MAX}$

Оскільки привід однозонний, тому: $\omega_{MAX} = \omega_{H} = 11,519\ рад/с,$

Обираємо тахогенератор ТП50-100 з наступними параметрами: $U_{ТГ}$ = 14 В, $n_{ТГ}$ = 200 об/хв, $R_{ТГ} = 50 \cdot 10^3$ Ом,

$$K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ}}{n_{ТГ}} = \frac{14}{200} = 0,07. \quad (2.32)$$

2.3.2.2 Розрахунок параметрів об'єкту регулювання

Опір, обумовлений перекриттям вентилів:

$$R_{ПР} = \frac{m}{2 \cdot \pi} \cdot X_{ТР} = \frac{12}{2 \cdot 3,14} \cdot 9,403 \cdot 10^{-3} = 0,018\ Ом, \quad (2.33)$$

Активний опір шин і кабелів:

$$R_{К} = 0,05 \cdot R_{Я} = 0,05 \cdot 8,18 \cdot 10^{-3} = 4,09 \cdot 10^{-4} Ом, \quad (2.34)$$

Активний опір головного кола електроприводу:

β_m = 1,24 - коефіцієнт, що враховує зміну опорів при нагріві,

$$R_{Е} = \left(R_{Я} + 2 \cdot R_{ТР} + R_{ДР} + R_{К}\right) \cdot \beta_{m} + R_{ПР} =$$
$$\left(8,18 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 9,609 \cdot 10^{-4} + 2,9 \cdot 10^{-3} + 4,09 \cdot 10^{-4}\right) \cdot 1,24 + 0,012 = 0,035\ Ом, \quad (2.35)$$

Індуктивність головного кола електроприводу:

$$L_{Е} = L_{Я} + 2 \cdot L_{ТР} + L_{ДР} = 0,7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,993 \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 10^{-3} = 1,26 \cdot 10^{-3}\ Гн, \quad (2.36)$$

Електромагнітна постійна часу головного кола електроприводу:

$$T_E = \frac{L_E}{R_E} = \frac{1,26 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 10^{-3}} = 0,036\ c, \tag{2.37}$$

Електромагнітна постійна часу двигуна:

$$T_Я = \frac{L_Я}{R_Я} = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{8,18 \cdot 10^{-3}} = 0,086\ c, \tag{2.38}$$

Момент інерції привода:

$$J = J_{ДВ} \cdot FI = 139,7 \cdot 10^3 \cdot 1,65 = 230505\ \text{кг} \cdot \text{м}^2, \tag{2.39}$$

де $J_{ДВ} = 139,7 \cdot 10^3$ – момент інерції двигуна, кг·м^2; FI = 1,65 – коефіцієнт інерції,

Електромеханічна постійна часу:

$$СФ_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_Я \cdot \beta_m}{\omega_H} = \frac{750 - 3650 \cdot 8,18 \cdot 10^{-3} \cdot 1,24}{11,519} = 61,895, \tag{2.40}$$

$$T_M = \frac{J \cdot R_E}{СФ_H^2} = \frac{230505 \cdot 0,028}{61,895^2} = 2,081\ c, \tag{2.41}$$

Коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача при косинусоїдній опорній напрузі:

$$K_{ПР} = \frac{E_{d0}}{U_{УМАХ}} = \frac{992,661}{10} = 99,266, \tag{2.42}$$

де $U_{УМАХ}$ = 10 В - максимальна величина пилкоподібної напруги СІФУ.

При розрахунку системи регулювання датчики струму якоря і швидкості приймаються безінерційними.

Коефіцієнт передачі кола негативного зворотного зв'язку по струму:

$$K_C = \frac{U_{YMAX}}{I_{MAX}} = \frac{10}{9125} = 1,096 \cdot 10^{-3}, \quad (2.43)$$

Коефіцієнт передачі кола негативного зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{Ш} = \frac{U_{YMAX}}{\omega_H} = \frac{10}{11,519} = 0,868, \quad (2.44)$$

Коефіцієнт передачі кола негативного зворотного зв'язку за напругою:

$$K_H = \frac{U_{YMAX}}{E_{ПОЧ}} = \frac{10}{992,661} = 0,011. \quad (2.45)$$

2.4 Синтез структурної схеми електроприводу

2.4.1 Оптимізація контуру регулювання струму якоря з ПІ - регулятором

При налаштуванні контуру струму на модульний оптимум передатна функція регулятора струму:

$$K_{PC} = \frac{R_E \cdot T_E}{K_{ПР} \cdot K_C \cdot 2 \cdot T_\mu} = \frac{0,035 \cdot 0,036}{99,266 \cdot 1,096 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 0,01} = 0,579, \quad (2.46)$$

$T_E = 0,036\ c,$

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \cdot \frac{T_E \cdot p + 1}{T_E \cdot p}, \quad (2.47)$$

Наявність внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна викликає статичну помилку при регулюванні струму в перехідних режимах зміни

швидкості. Значення струму, що встановилося, буде менше заданого в $1+\frac{T_\mu}{T_M}$ раз. Введення додатного зворотного зв'язку по ЕРС двигуна усуває помилку, що встановилася, по струму, зменшує некомпенсуєму постійну часу:

$$T'_\mu = \frac{T_\mu}{1+\frac{T_\mu}{T_M}} = 9{,}922\cdot 10^{-3} c, \tag{2.48}$$

Одночасно знижується коливальна процесу наростання струму. Це дозволяє збільшувати коефіцієнт посилення регулятора струму до тих пір, поки перерегулювання не досягне 4,3% ($a_C = 2$). В цьому випадку коефіцієнт посилення регулятора струму:

$$K_{ПРС} = K_{РС}\cdot\left(1+\frac{T_\mu}{T_M}\right)^2 = 0{,}579\cdot\left(1+\frac{0{,}01}{2{,}081}\right)^2 = 0{,}585\ , \tag{2.49}$$

Передатна функція замкнутого контуру струму:

$$W^3_{РС}(p) = \frac{1/K_C}{a_C\cdot T'_\mu\cdot p\cdot(T'_\mu\cdot p+1)+1}, \tag{2.50}$$

$$W^3_{РС}(p) = \frac{1/1{,}096\cdot 10^{-3}}{2\cdot 9{,}952\cdot 10^{-3} p\cdot(9{,}952\cdot 10^{-3} p+1)+1} = \frac{912{,}5}{1{,}99\cdot 10^{-4} p^2+0{,}02p+1}\ .$$

2.4.2 Оптимізація контуру регулювання швидкості з П - регулятором

Вид передатної функції регулятора швидкості обумовлений необхідним статизмом. Величина статичного падіння швидкості в одноразово інтегруючій системі. При використанні зворотного зв'язку по швидкості двигуна:

$a_C = 2$, $a_C = a_Ш$, $T_1 = a_T\cdot T'_\mu = 0{,}02$,

$$\Delta\upsilon_{Ш} = \frac{a_{Ш} \cdot T_1}{T_M} \cdot \frac{R_E \cdot I_H}{C\Phi_H \cdot \omega_H} \cdot 100 = 0,339\ , \tag{2.51}$$

Передатна функція фільтру на вході системи регулювання:

$$W_{Ф}(p) = \frac{1}{T_{Я} p + 1} = \frac{1}{0,086 p + 1}, \tag{2.52}$$

2.4.3 Контур регулювання швидкості з П – регулятором

Принципова схема П - регулятора швидкості наведена на рисунку 2.7.

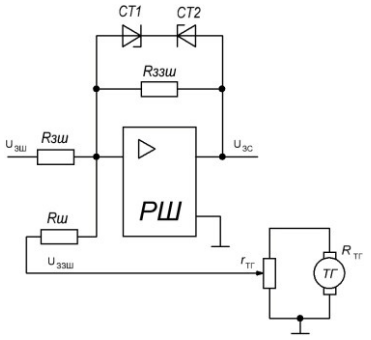


Рисунок 2.7 − Принципова схема П - регулятора швидкості

Задаємося значеннями наступних опорів: $R_{ЗШ} = 50 \cdot 10^3 Ом,\ \ R_{Ш} = R_{ЗШ} = R_{ТГ}$,

Розрахункові співвідношення для кола зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ}}{\omega_{ТГ}} = \frac{14}{11,519} = 1,215, \tag{2.53}$$

$$K_{ДТГ} = \frac{K_{Ш}}{K_{ТГ}} = \frac{0,868}{1,215} = 0,714, \tag{2.54}$$

$$K_{РШ} = K_{ТГ} \cdot K_{ДТГ} \cdot \frac{R_{ЗШ}}{R_{Ш}} = 1,215 \cdot 0,714 = 0,868, \tag{2.55}$$

Опір кола зворотного зв'язку регулятора швидкості:

$$R_{ЗЗШ} = R_{ЗШ} \cdot K_{РШ} = 50 \cdot 10^3 \cdot 0,868 = 4,341 \cdot 10^4 Ом, \quad (2.56)$$

$$r_{ТГ} = K_{ДТГ} \cdot R_{ТГ} = 0,714 \cdot 50 \cdot 10^3 = 3,57 \cdot 10^4 Ом. \quad (2.57)$$

2.4.4 Контур регулювання струму з ПІ - регулятором

Принципова схема ПІ - регулятора струму наведена на рисунку 2.8.

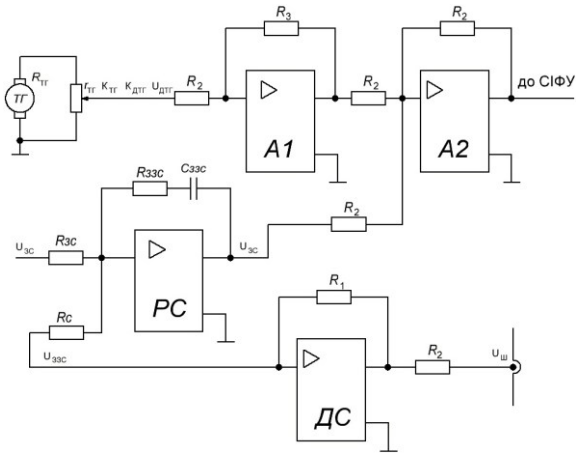


Рисунок 2.8– Принципова схема ПІ - регулятора струму

Задаємося значеннями наступних опорів: $R_{ЗС} = 50 \cdot 10^3 Ом$, $R_C = R_{ЗС} = R_2$.

Опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача (ОП):

$$R_{ЗЗС} = R_{ЗС} \cdot K_{РС} = 5 \cdot 10^4 \cdot 0,588 = 2,941 \cdot 10^4 Ом, \quad (2.58)$$

Ємність в колії зворотного зв'язку ОП:

$$C_{ЗЗС} = \frac{T_E}{R_{ЗЗС}} = \frac{0,036}{2,941 \cdot 10^4} = 1,259 \cdot 10^{-6} Ф, \quad (2.59)$$

Коефіцієнт посилення датчика струму:

$$K_{ДС} = \frac{K_C \cdot R_C}{K_{ШН} \cdot R_{ЗС}} = \frac{1,096 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4}{1,19 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^4} = 92,055\ , \tag{2.60}$$

Опір в колі зворотного зв'язку ОП датчика струму:

$$R_1 = K_{ДС} \cdot R_2 = 92,055 \cdot 50 \cdot 10^3 = 4,603 \cdot 10^6 Ом, \tag{2.61}$$

Опір в колії зворотного зв'язку ОП датчика напруги (А1):

$$R_3 = R_2 \cdot \frac{СФ_H}{K_{ПР} \cdot K_{ТГ} \cdot K_{ДТГ}} = \frac{61,895}{99,266 \cdot 1,216 \cdot 0,714} = 3,591 \cdot 10^4 Ом. \tag{2.62}$$

2.4.5 Складання принципової схеми електроприводу

На підставі принципових схем регуляторів складається принципова схема однзонної системи регулювання швидкості з підпорядкованим контуром регулювання струму.

На рис. 2.9 зображена принципова схема САР швидкості реверсивного електроприводу з П - регулятором швидкості.

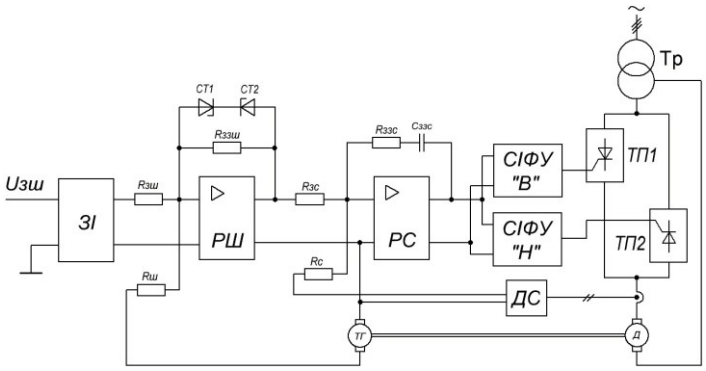


Рисунок 2.9 − Принципова схема реверсивного електроприводу з однократно - інтегруючою системою регулювання швидкості

Двигун постійного струму Д отримує живлення від реверсивного перетворювача тиристора (ТП1,ТП2) обмотка збудження ОЗ - від перетворювача ТПЗ (на схемі не показана). ПІ - регулятор струму зібраний на підсилювачі РС. Сигнал зворотнього зв'язку по струму поступає з шунта на датчик струму (ДС) і потім на суматор входу регулятора струму (РС). П - регулятор швидкості виконаний на підсилювачі (РШ). Вихідна напруга регулятора швидкості обмежується за допомогою стабілітронів (СТ1, СТ2).

Для формування сигналу негативного зворотнього зв'язку за швидкістю використовується тахогенератор (ТГ) . Задавач інтенсивності (ЗІ) забезпечує необхідний темп зміни швидкості при пуску і гальмуванні.

Структурна схема САУ швидкості, що відповідає принциповій схемі рисунку 2.9 показана на рисунку 2.10. Контур струму зображений в згорнутому виді. Передбачається, що внутрішній зворотний зв'язок по ЕРС двигуна компенсований.

Задавач інтенсивності (ЗІ) на структурній схемі не показаний. Для зручності моделювання і аналізу результатів приведемо структурну схему контуру швидкості до системи відносних одиниць.

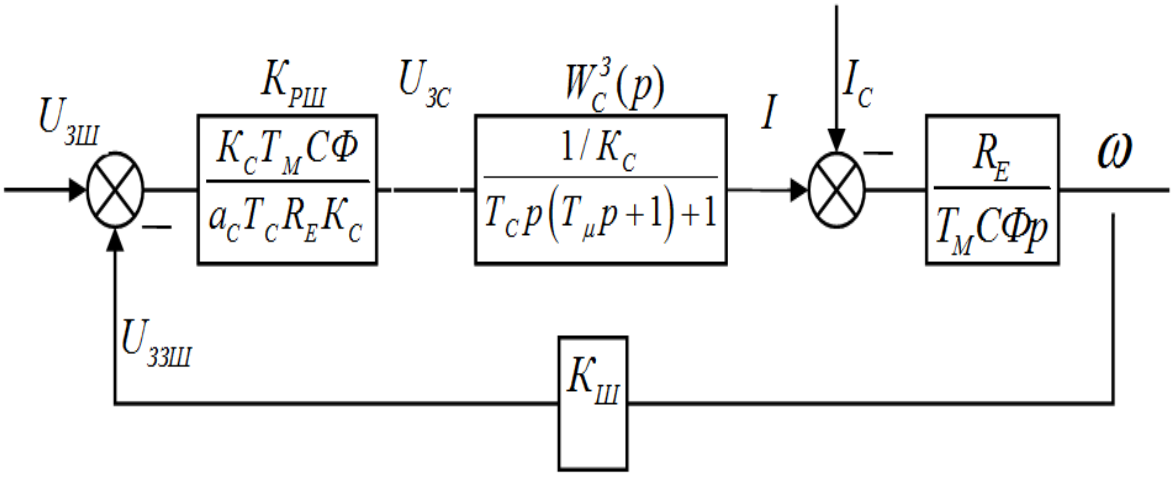


Рисунок 2.10 − Структурна схема однократно-інтегруючої САУ швидкості

2.4.6 Переклад структурної схеми електропривода у відносні одиниці та моделювання перехідних процесів пуску двигуна без навантаження та під навантаженням

Основні базові одиниці:

$$U_Б = U_Н = 750\ В; \qquad I_Б = I_Н = 3650\ А, \qquad \omega_Б = \frac{U_Н}{СФ_Н} = \frac{750}{61,895} = 12,117\ рад/с,$$

$$M_Б = СФ_Н \cdot I_Б = 61,895 \cdot 3650 = 2,259 \cdot 10^5\ Нм, \tag{2.63}$$

Коло зворотного зв'язку по струму:

$$U_{ЗЗС_Б} = K_С \cdot I_Б = 1,096 \cdot 10^{-3} \cdot 3650 = 4\ В, \tag{2.64}$$

Коло зворотному зв'язку за швидкістю:

$$U_{ЗЗШ_Б} = K_Ш \cdot \omega_Б = 0,868 \cdot 12,117 = 10,519\ В, \tag{2.65}$$

Напруга на виході регулятора швидкості:

$$U_{РШ_Б} = \frac{U_Б}{K_{ПР}} = \frac{750}{99,266} = 7,555\ \text{В}, \tag{2.66}$$

Базовий опір:

$$R_Б = \frac{U_Б}{I_Б} = \frac{750}{3650} = 0,205\ Ом, \tag{2.67}$$

Еквівалентний опір головного кола приводу:

$$\rho_E = \frac{R_E}{R_Б} = \frac{0,035}{0,205} = 0,168 \text{ } Ом, \tag{2.68}$$

Регулятор струму:

$$w_C^3(p) = W_C^3(p)\frac{U_{ЗС_Б}}{I_Б} = \frac{1}{T_M p\left(T_\mu p + 1\right) + 1} = \frac{1}{20,81 \cdot 10^{-3} p^2 + 2,081p + 1} \tag{2.69}$$

Двигун:

$$\frac{R_E}{T_M C\Phi_Б p} \cdot \frac{I_Б}{\omega_Б} = \frac{R_E}{T_M C\Phi_Б p} \cdot \frac{I_Б C\Phi_Б}{U_Б} = \frac{\rho_E}{T_M p} = \frac{0,168}{2,081p}, \tag{2.70}$$

Тиристорний перетворювач:

$$\frac{1}{T_\mu p + 1} = \frac{1}{0,01p + 1}, \tag{2.71}$$

Регулятор швидкості:

$$k_{РШ} = K_{РШ}\frac{U_{ЗШ_Б}}{U_{ЗС_Б}} = \frac{T_M}{4T_\mu \rho_E} = \frac{2,081}{4 \cdot 0,01 \cdot 0,168} = 309,673, \tag{2.72}$$

Фільтр на вході системи :

$$W_Ф(p) = \frac{1}{T_я p + 1} = \frac{1}{0,086p + 1}. \tag{2.73}$$

Після приведення передатних функцій до системи відносних одиниць структурна схема САУ швидкості матиме вигляд, приведений на рисунку 2.11.

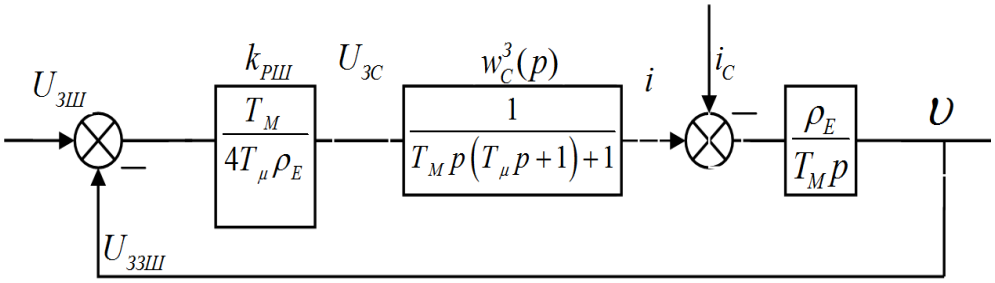


Рисунок 2.11 − Структурна схема однократно-інтегруючої САУ швидкості у відносних одиницях

Вище розраховані передатні функції і коефіцієнти були введені в ПЕВМ (відповідно до структурної схеми рисунка 2.12), яка на їх основі видала графіки перехідних процесів наведені на рисунку 2.13.

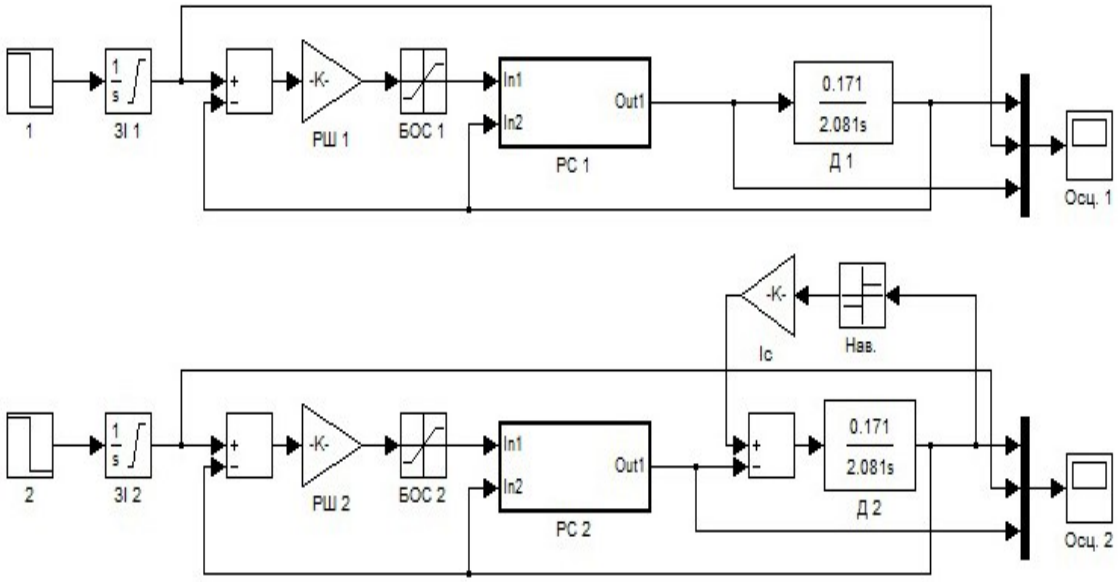
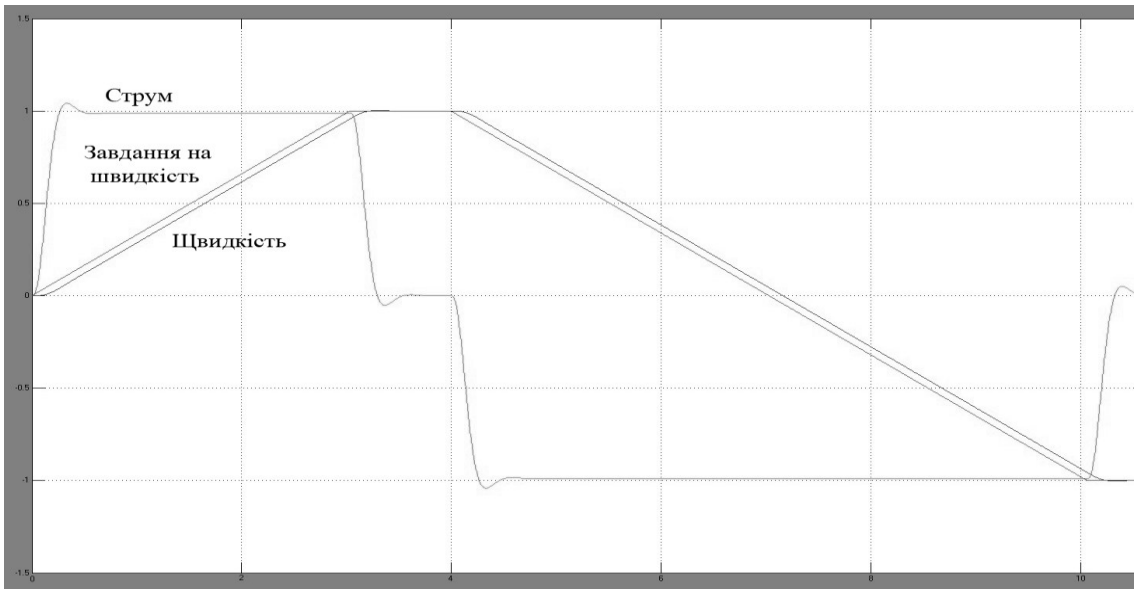
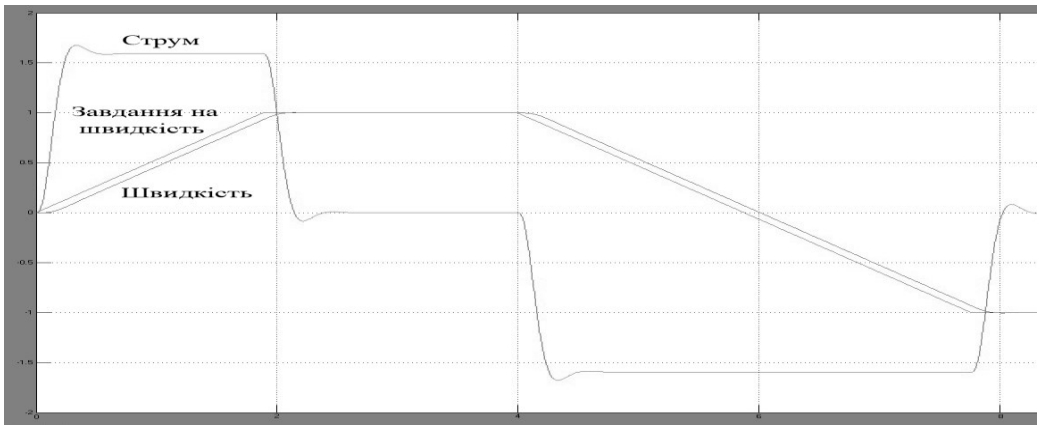


Рисунок 2.12 − Математична модель системи автоматичного керування швидкості без навантаження та з навантаженням:

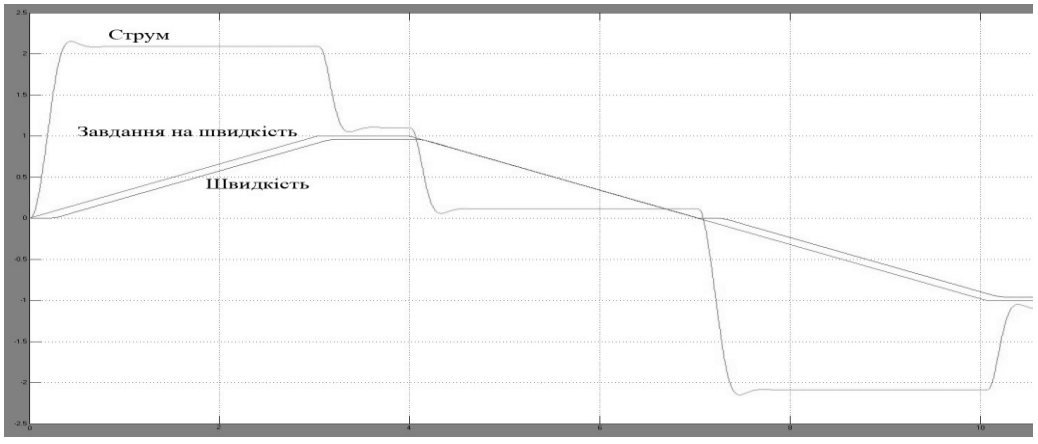
Позначення рисунка 2.12: 1,2 – блоки завдання швидкості; ЗІ-1,2 – блоки задавача інтенсивності; РШ – коефіцієнт посилення регулятора швидкості; БОС1,2 – блоки обмеження струму; РС1,2 – підсистема контуру регулювання струму; Д1,2 - передатна функція двигуна; Осц.1, 2 - осцилографи.


Струм
Завдання на швидкість
Щвидкість

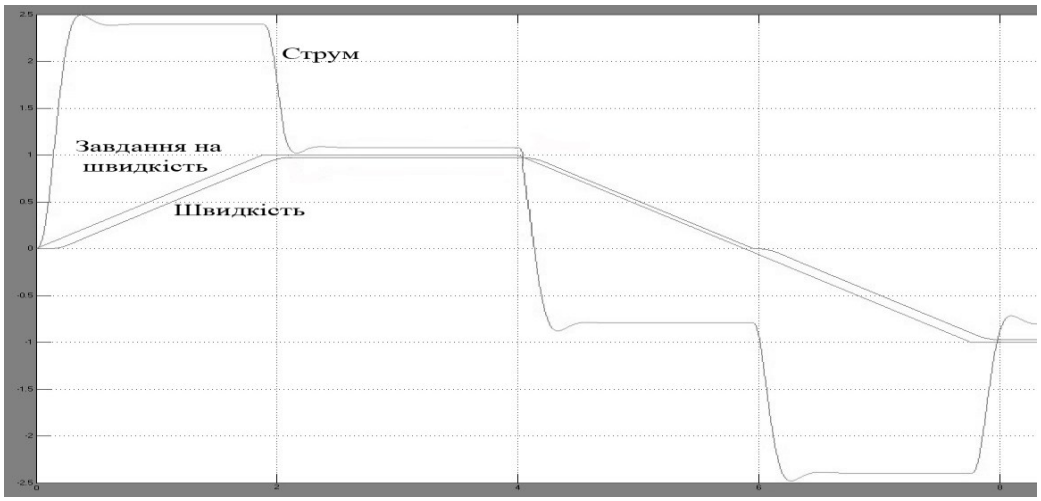
а)


Струм
Завдання на швидкість
Швидкість

б)


Струм
Завдання на швидкість
Швидкість

в)



г)

Рисунок 2.13 − Графіки перехідних процесів існуючої системи ТП-Д (а) - пуск двигуна без навантаження; (в) – пуск двигуна під номінальнам навантаженням; та графіки перехідних процесів модернізованої системи ТП-Д з адаптивним регулятором (б) - пуск двигуна без навантаження; (г) - пуск двигуна під номінальним навантаженням.

Отримані в результаті графіки перехідних процесів з новим адаптивним регулятором ясно показують, що наявність нового регулятора ніяк не вплинуло на характеристики нової системи.

2.5 Розрахунок параметрів системи керування електроприводом кліті № 6 прокатного стану «550»

2.5.1 Розрахунок параметрів математичної моделі електропривода

Система керування асинхронним двигуном – векторна. Для асинхронного двигуна H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ встановлений власний перетворювач частоти типу Perfect Harmony фірми Siemens. Метою векторного керування є поділ каналів керування швидкістю й потокозчепленням. Структурна схема векторної системи керування

швидкістю асинхронного двигуна в системі відліку, пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора зображена на рисунку 2.14.

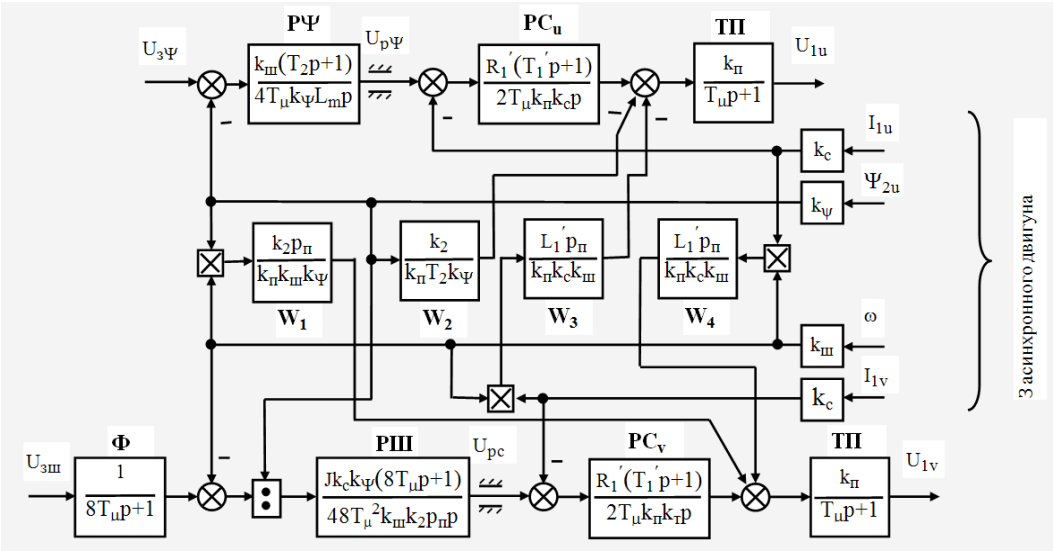


Рисунок 2.14 – Структурна схема векторної системи керування асинхронним двигуном

З рисунку 2.14 видно, що об'єкт керування характеризується наявністю нелінійних перехресних зв'язків між каналами керування. Тому при моделюванні відсутня необхідність здійснювати пряме й зворотне перетворення координат, які в дійсності присутні в реальному електроприводі. Структурна схема асинхронного двигуна наведена на рисунку 2.15.

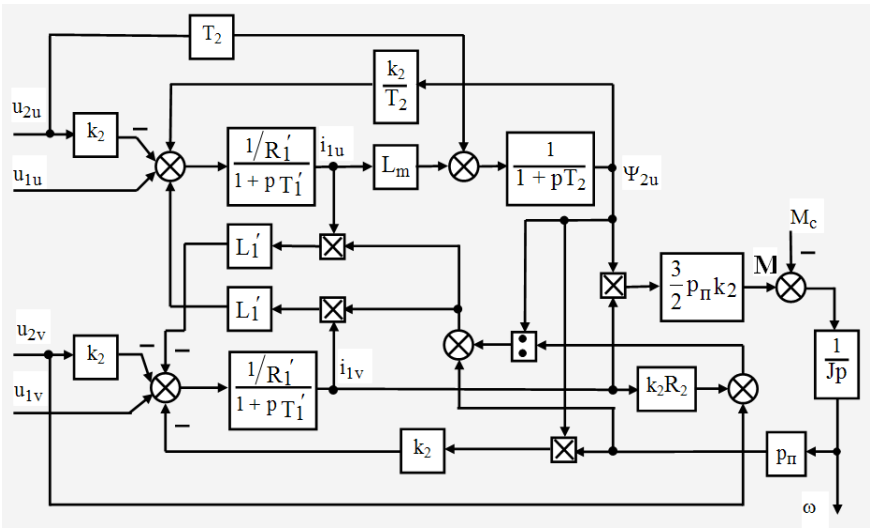


Рисунок 2.15 – Структурна схема асинхронного двигуна

Параметри заступної схеми двигуна H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ :

R_1=0,0012Ом; R_2=0,0014Ом; X_1=0,0099Ом; X_2=0,014Ом; $X\mu = 10,2$Ом.

Наведені на рис.2.14 та рис.2.15 змінні розраховуються виходячи з параметрів двигуна.

Кутова частота мережі живлення:

$$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \, c^{-1}. \quad (2.74)$$

Кутова максимальна швидкість двигуна:

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_o}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \, c^{-1}. \quad (2.75)$$

Кількість пар полюсів електродвигуна:

$$p_п = 5.$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\delta} = \frac{x_1}{\omega_o} = \frac{0,0099}{314} = 0,000032 \text{ Гн}. \quad (2.76)$$

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{2\delta} = \frac{x_2}{\omega_o} = \frac{0,014}{314} = 0,000045 \text{ Гн}. \quad (2.77)$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора та ротора:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_o} = \frac{46,7}{314} = 0,15 \text{ Гн.} \quad (2.78)$$

Загальна індуктивність обмотки статору:

$$L_1 = L_{1\delta} + L_m = 0,000032 + 0,15 = 0,150032 \text{ Гн.} \quad (2.79)$$

Загальна індуктивність обмотки ротору:

$$L_2 = L_{2\delta} + L_m = 0,000045 + 0,15 = 0,150045 \text{ Гн.} \quad (2.80)$$

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротору:

$$k_2 = \frac{L_m}{L_2} = \frac{0,15}{0,150045} = 0,99. \quad (2.81)$$

Еквівалентна індуктивність розсіювання двигуна:

$$L`_1 = L_{1\delta} + k_2 \cdot L_{2\delta} = 0,000032 + 0,99 \cdot 0,000045 = 0,000077 \text{ Гн.} \quad (2.82)$$

Еквівалентний активний опір двигуна:

$$R`_1 = r_1 + k_2 \cdot r_2 = 0,0012 + 0,99 \cdot 0,0014 = 0,0026 \text{ Ом.} \quad (2.83)$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки статора:

$$T`_1 = \frac{L`_1}{R`_1} = \frac{0,000077}{0,0026} = 0,029 \text{ с.} \quad (2.84)$$

Еквівалентна електромагнітна стала часу обмотки ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2} = \frac{0{,}150045}{0{,}0014} = 107{,}2 \text{ с.} \quad (2.85)$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\psi = \frac{\text{Ілн}}{1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{Інф} \cdot p_{\text{п}} \cdot k_2} = \frac{498{,}2}{1{,}5 \cdot 1{,}41 \cdot 498{,}2 \cdot 4 \cdot 0{,}99} = 0{,}12 \text{ Вб.} \quad (2.86)$$

Максимальна напруга у системі керування: Ucmax=10В.

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$\text{kc} = \frac{\text{Uc max}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot I_{\text{нф}}} = \frac{10}{1{,}41 \cdot 2 \cdot 498{,}2} = 0{,}0071. \quad (2.87)$$

Коефіцієнт передачі датчика швидкості:

$$\text{kш} = \frac{\text{Uc max}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{10}{78{,}5} = 0{,}13. \quad (2.88)$$

Коефіцієнт передачі силового перетворювача:

$$\text{kп} = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{Uф}}{\text{Uc max}} = \frac{1{,}41 \cdot 6000 / 1{,}73}{10} = 495{,}9. \quad (2.89)$$

Коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення:

$$\text{k}\psi = \frac{\text{Uc max}}{\psi} = \frac{10}{0{,}12} = 83{,}3. \quad (2.90)$$

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

Розрахуємо передатні функції, що наведені на рисунках 2.14-2.15.

Перетворювач частоти:

$$\frac{\text{кп}}{\text{Т}\mu\text{р}+1}=\frac{495,9}{0,0005\text{р}+1}. \tag{2.91}$$

Ланка зв'язку W1:

$$\frac{\text{k}_2\cdot\text{p}_\text{п}}{\text{кп}\cdot\text{кш}\cdot\text{k}\psi}=\frac{0,99\cdot 4}{495,9\cdot 0,13\cdot 83,3}=0,00074. \tag{2.92}$$

Ланка зв'язку W2:

$$\frac{\text{k}_2}{\text{кп}\cdot\text{T}_2\cdot\text{k}\psi}=\frac{0,99}{495,9\cdot 107,2\cdot 83,3}=0,00000022. \tag{2.93}$$

Ланка зв'язку W3:

$$\frac{\text{L`}_1\cdot\text{p}_\text{п}}{\text{кп}\cdot\text{кс}\cdot\text{кш}}=\frac{0,000077\cdot 4}{495,9\cdot 0,0071\cdot 0,13}=0,00067. \tag{2.94}$$

Ланка зв'язку W4:

$$\frac{\text{L`}_1\cdot\text{p}_\text{п}}{\text{кп}\cdot\text{кс}\cdot\text{кш}}=\frac{0,000077\cdot 4}{495,9\cdot 0,0071\cdot 0,13}=0,00067. \tag{2.95}$$

Ланка Рψ:

$$\frac{\text{кс}\cdot(\text{T}_2\cdot\text{р}+1)}{4\cdot\text{Т}\mu\cdot\text{k}\psi\cdot\text{L}_\text{т}\cdot\text{р}}=\frac{0,0071\cdot(107,2\cdot\text{р}+1)}{4\cdot 0,0005\cdot 83,3\cdot 0,15\cdot\text{р}}=0,28\cdot\frac{107,2\cdot\text{р}+1}{\text{р}}. \tag{2.96}$$

Ланка $РТ_u$:

$$\frac{R`_1\cdot(T`_1 p+1)}{2\cdot T\mu\cdot k\pi\cdot kc\cdot p}=\frac{0,0026\cdot(0,029p+1)}{2\cdot 0,0005\cdot 495,9\cdot 0,0071\cdot p}=0,74\cdot\frac{0,029p+1}{p}. \qquad (2.97)$$

Ланка Ф:

$$\frac{1}{8\cdot T\mu\cdot p+1}=\frac{1}{8\cdot 0,0005p+1}=\frac{1}{0,004p+1}. \qquad (2.98)$$

Ланка $\frac{k_2}{T_2}$:

$$\frac{k_2}{T_2}=\frac{0,99}{107,2}=0,0092. \qquad (2.99)$$

Ланка РШ:

$$\frac{J\cdot kc\cdot k\psi\cdot(8\cdot T\mu\cdot p+1)}{48\cdot T\mu^2\cdot k\text{ш}\cdot k_2\cdot p_\text{п}\cdot p}=\frac{55000\cdot 0,0071\cdot 83,3\cdot(8\cdot 0,0005p+1)}{48\cdot 0,0005^2\cdot 0,13\cdot 0,99\cdot 4\cdot p}=$$
$$=5265580484\cdot\frac{0,004p+1}{p}. \qquad (2.100)$$

Ланка $k_2\cdot r_2$:

$$k_2\cdot r_2=0,99\cdot 0,0014=0,0014. \qquad (2.101)$$

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

$$\frac{3}{2}\cdot p_{п}\cdot k_2=\frac{3}{2}\cdot 4\cdot 0,99=5,94. \quad (2.102)$$

Ланка $\frac{1}{J\cdot p}$:

$$\frac{1}{J\cdot p}=\frac{1}{55000\cdot p}=0,000018\cdot\frac{1}{p}. \quad (2.103)$$

Ланка $\frac{1}{1+T_2\cdot p}$:

$$\frac{1}{1+T_2\cdot p}=\frac{1}{1+107,2\cdot p}. \quad (2.104)$$

Ланка $\frac{1/R`_1}{1+T`_1 p}$:

$$\frac{1/R`_1}{1+T`_1 p}=\frac{1/0,0026}{1+0,029p}=\frac{384,62}{0,029p+1}. \quad (2.105)$$

2.6 Моделювання електропривода виконаного за системою ПЧ-АД з векторним керуванням

Структурна схема моделі асинхронного двигуна засобами Simulink наведена на рисунку 2.16, яка зібрана згідно з розрахованою структурною схемою асинхронного двигуна (рисунок 2.14).

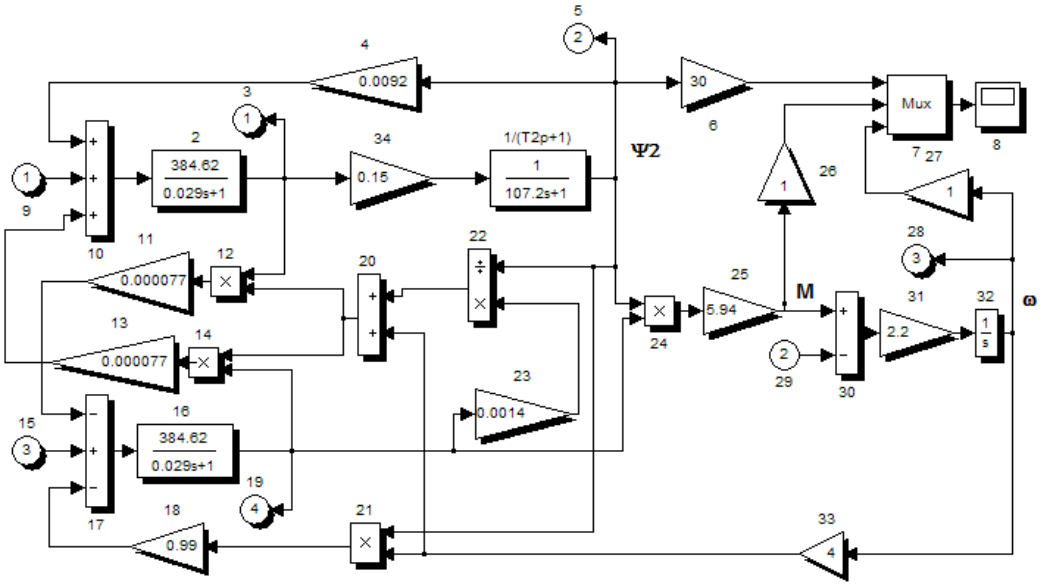


Рисунок 2.16 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна

На рисунок 2.16 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 (рис.2.14); 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 $L_1^{`} = 0{,}150032\ \text{Гн}$; 34 - блок завдання максимальної взаємної індуктивності між статором і ротором $L_m = 0{,}15\ \text{Гн}$; 18 - блок завдання коефіцієнту електромагнітного зв'язку ротору $k_2 = 0{,}99$; 2, 16 – передатна функція ланки $(1/R_1^{`})/(1+T_1^{`}p) = 384{,}62/(0{,}029p+1)$; 23 – передатна функція ланки $k_2 \cdot r_2 = 0{,}0014$; 25 – передатна функція ланки $(3/2)\cdot p_п \cdot k_2 = 5{,}94$; 31, 32 – передатна функція ланки $1/(Jp)$; 4 – передатна функція ланки k_2/T_2; 33 – блок завдання кількості пар полюсів асинхронного двигуна $p_п = 5$; 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 рис.2.14, а структурна схема моделі асинхронного двигуна відповідно на рис.2.13. На рис.2.14 модель асинхронного двигуна об’єднана у окрему підсистему (блок 11).

Структурна схема моделі системи векторного керування асинхронним двигуном наведена на рисунку 2.17.

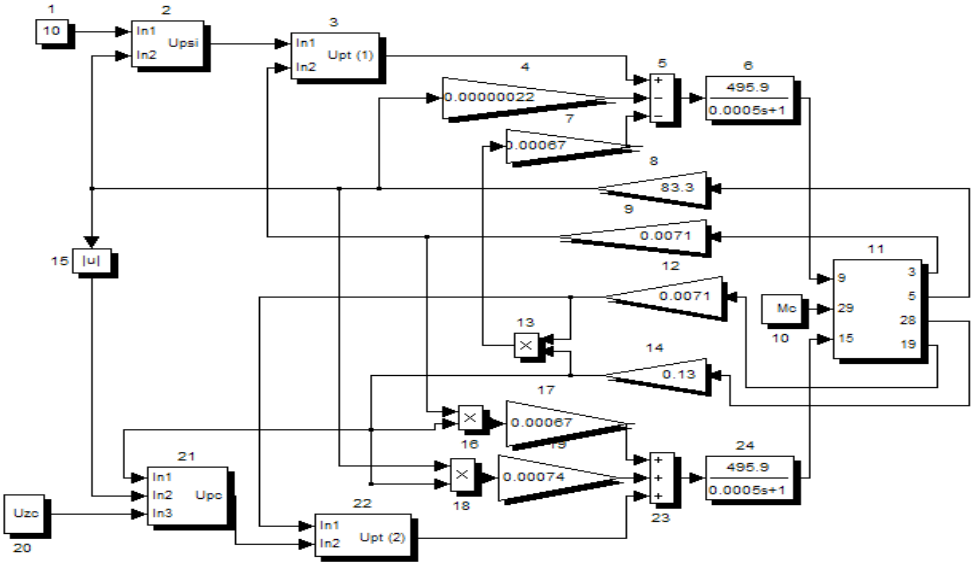


Рисунок 2.17 – Структурна схема моделі системи векторного керування асинхронним двигуном

На структурній схемі (рисунок 2.17) 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; 4 , 7, 17, 19 - блоки передатних функцій ланок W1-W4; 11 - блок підсистеми моделі асинхронного двигуна, модель якого зображена на рис.2.11. 9,15 - вхідні сигнали напруг u_{1u}, u_{1v}, 29 - вхідне значення моменту опору, 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 $k_c = 0{,}0071$; 14 − коефіцієнт підсилення регулятора швидкості $k_ø = 0{,}13$; 21 − підсистема регулятору швидкості.

Об'єкт керування характеризується наявністю нелінійних перехресних зв'язків між каналами керування. Для їх компенсації у систему автоматичного регулювання введені нелінійні зв'язки, що відтворюють функціональні залежності, зворотні залежностям об'єкта керування. Цим забезпечено задані динамічні характеристики системи автоматичного регулювання, а в деяких випадках і її стійкість.

Перетворювач частоти представлений двома безперервними аперіодичними ланками у системі відліку, що пов'язана з вектором потокозчеплення ротора. Тому у електроприводі немає необхідності здійснювати пряме та зворотне перетворення координат, яке присутнє у реальному електроприводі.

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600 кВт (6кВ) електропривода кліті № 6 прокатного стану 550 з струмом 400А наведені на рис.2.18.

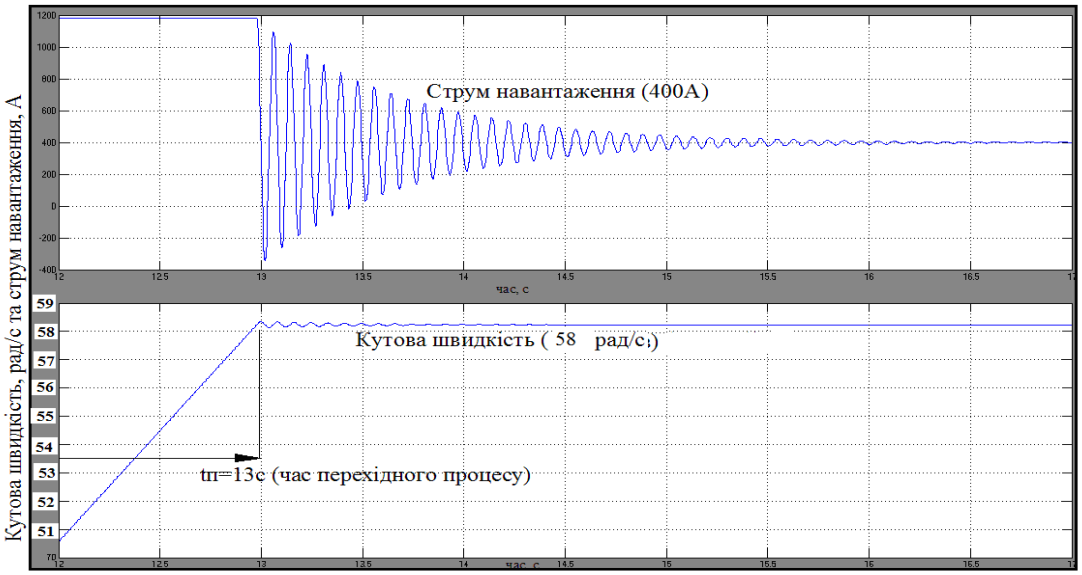


Рисунок 2.18а – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті № 6 прокатного стану 550

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600 кВт (6кВ) електропривода кліті 6 прокатного стану 550 зі струмом 370 А наведені на рис.2.18б.

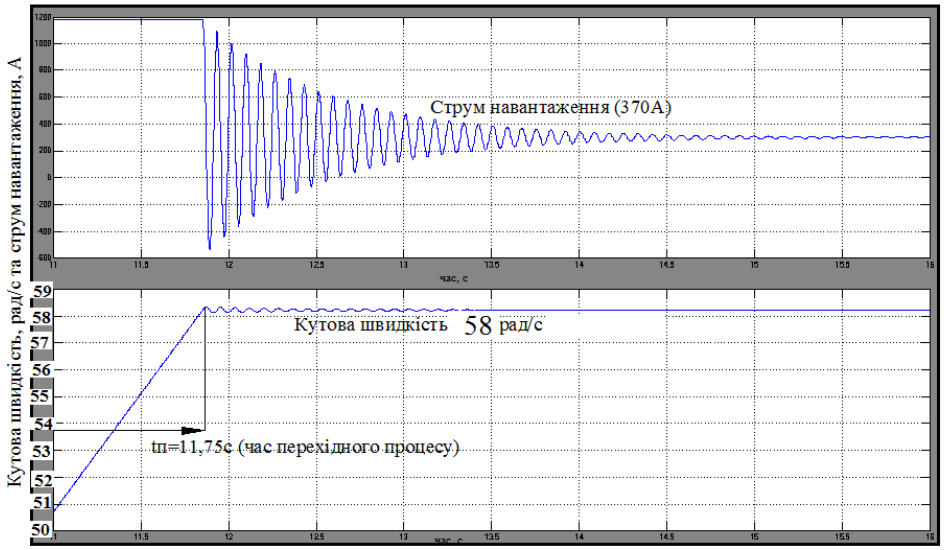


Рис.2.18б – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті 6 прокатного стану 550 при струмі 370А

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті прокатного стану при струмы 200 А рис.2.19а.

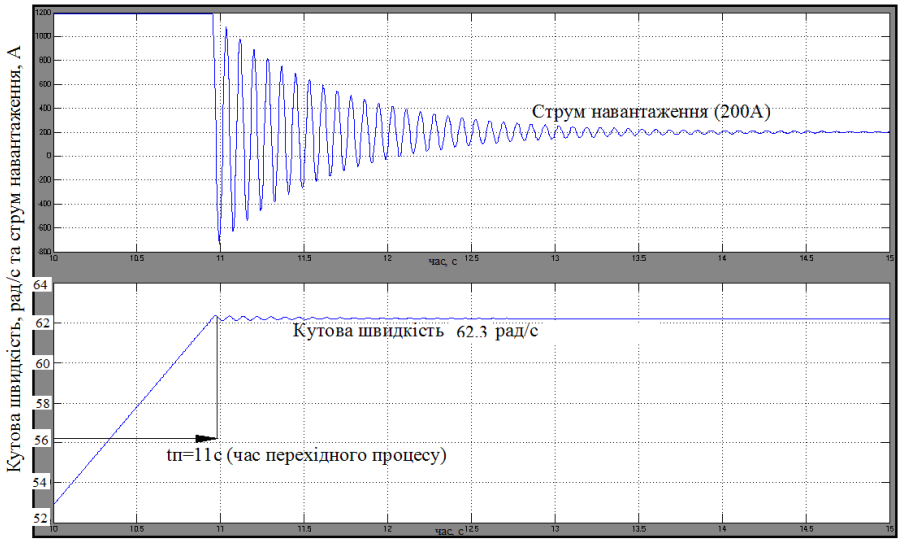


Рис.2.19а – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті прокатного стану при струмі 200 А

Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті прокатного стану пр. струмі 100 А наведені на рис.2.19б.

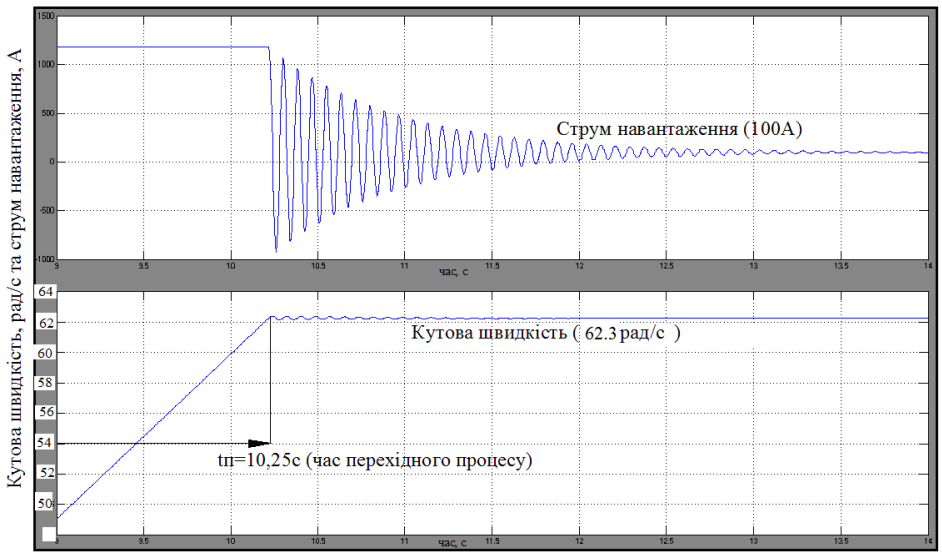


Рис.2.19б – Графіки перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна 3600кВт (6кВ) електропривода кліті прокатного стану при струмі 100 А

Швидкодія спроектованого електроприводу визначається тривалістю перехідного процесу – від 10,25с. до 13с. (рис.2.18а-2.19б), в залежності від навантаження на вал двигуна). Статична помилка за швидкістю при пуску та накиді навантаження відсутня. Статична помилка за струмом складає не більше 3%. Все це свідчить про придатність даної системи керування електроприводом кліті № 6 до роботи на прокатному стані 550.

2.7 Енергозбереження

Електроприводи клітей прокатних станів є найбільш енергоємними споживачами електричної енергії металургійних підприємств. Досить зазначити, що встановлена потужність електрообладнання підприємства ПрАТ «ДМЗ» тільки першого прокатного цеху становить 362 МВА. Річне споживання електроенергії прокатний цехом № 1, перевищує 390 млн. кВт-

год. Встановлена потужність електроприводів (ЕП) клітей становить 139 МВт, в тому числі понад 96 МВт (26,6%) припадає на частку головних ЕП чистової групи.

Одинична потужність електроприводів клітей досягає 16 МВт, а їх енергетичні показники далекі від оптимальних. За оцінками фахівців перевищення втрат над мінімально можливими становить 200-250%. Звідси випливає, що використання резервів економії електричної енергії в таких потужних споживачів є актуальним і гостро затребуваним завданням.

Велика частина втрат електричної енергії пов'язана зі споживанням реактивної потужності, викликаним фазовим регулюванням напруги. Електроприводи клітей, як правило, виконуються з двозонним регулюванням швидкості (ДЗРШ). До них висуваються жорсткі вимоги щодо швидкодії і надійності при відпрацюванні ударного прикладання навантаження, що виникає при захваті металу валками, а також в режимі розгону під навантаженням при прокатці з прискоренням. Дані вимоги виконуються, якщо динамічний запас системи регулювання, і в першу чергу запас випрямленої ЕРС тиристорного перетворювача (ТП), будуть забезпечені в названих динамічних режимах. Додаткове збільшення запасу забезпечує підвищення надійності ЕП, проте призводить до погіршення енергетичних показників за рахунок збільшення споживання реактивної потужності, що залежить від ступеня регулювання випрямленою ЕРС.

Придбання та установка дорогих регульованих пристроїв, що компенсують в умовах ПрАТ «ДМЗ» і інших металургійних підприємств є практично нерозв'язним завданням. Такі пристрої вітчизняною промисловістю в даний час не випускаються. У зв'язку з цим поставлено завдання домогтися зниження енергоспоживання за рахунок вдосконалення алгоритмів і схемотехнічних рішень в системах управління діючих електроприводів без придбання додаткового обладнання.

При розробці нових алгоритмів і систем управління, поряд зі зниженням енергоспоживання, на перше місце ставляться питання збереження високих динамічних характеристик і показників надійності електроприводу.

Будь-яка зупинка безперервної технологічної лінії, викликана недостатнім запасом тиристорного перетворювача по напрузі, призводить до невиправданих втрат, що становить мільйони гривень. У зв'язку з цим питання зниження енергоспоживання, збереження високих динамічних характеристик і показників надійності повинні вирішуватися в комплексі.

З метою поліпшення енергетичних показників розроблена концепція систем двозонного регулювання, в основу якої покладено принцип перерозподілу запасу випрямленою ЕРС тиристорного перетворювача в сталому і динамічних режимах, викликаних зміною навантаження ЕП. Це дозволяє зменшити величину запасу за рахунок більш раціонального його використання.

В рамках названої загальної концепції запропоновані спосіб і система залежного управління потоком збудження у функції випрямленою ЕРС ТП. Суть методу полягає в тому, що задаючий вплив на регулятор зовнішнього контуру в колі збудження формується пропорційним номінальної випрямленої ЕРС. Реалізація способу дозволяє зменшити запас випрямленої ЕРС при відносно плавній зміні навантаження (для тиристорних ЕП прокатних станів - в режимі розгону під навантаженням). Застосування розробленої системи рекомендується в ЕП безперервних і реверсивних станів холодної прокатки, що працюють в широкому діапазоні зміни навантаження.

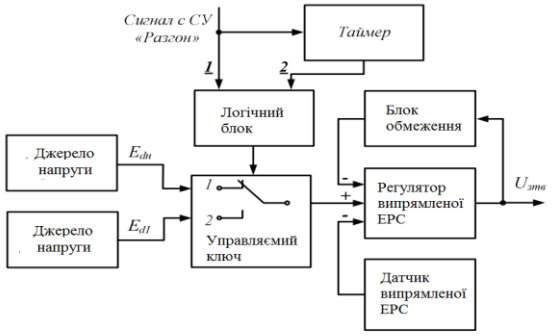
Для обмеження запасу випрямленої ЕРС ТП при відпрацюванні ударного прикладання навантаження розроблені спосіб і система залежного управління потоком збудження з автоматичною зміною уставки випрямленої ЕРС, а також системи двозонного регулювання з перемиканням координати, регульованою по колу збудження.

З метою зменшення запасу випрямленої ЕРС за рахунок виключення її перерегулювання в режимі розгону ЕП під навантаженням запропонований спосіб управління потоком збудження двигуна, згідно з яким при появі сигналу на прискорення електроприводу під навантаженням здійснюється автоматичне зниження заданого значення випрямленою ЕРС до рівня, що забезпечує відпрацювання динамічного режиму розгону без перевищення випрямленої ЕРС номінального значення. Після закінчення перехідного

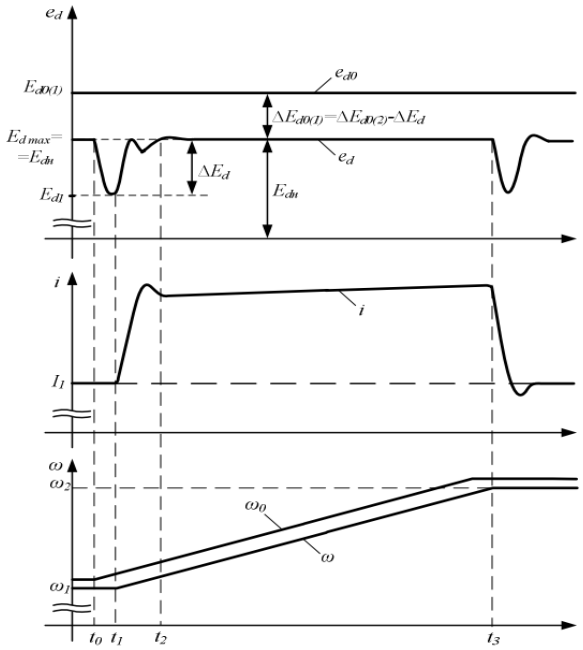
процесу струму двигуна задане значення випрямленої ЕРС автоматично підвищується до номінального рівня.

Принцип дії системи ДЗРШ при підключенні додаткових блоків на вхід регулятора ЕРС (рис. 2.20, а) пояснюється за допомогою тимчасових діаграм (рис. 2.20, б).

У сталому режимі роботи під навантаженням зі сталим струмом I_1 (до моменту t_0 подачі сигналу на прискорення ЕП під навантаженням) сигнал «Розгін» на вході 1 логічного блоку відсутній. За рахунок цього забезпечується автоматична підтримка випрямленою ЕРС ТП на номінальному рівні E_{dH}.



а



б

Рисунок 2.20 - Функціональна схема підключення додаткових блоків на вхід регулятора ЕРС (а) і діаграми зміни координат електроприводу (б)

При появі сигналу на вході 1 контакт керованого ключа перемикається в друге положення, відповідно на вхід регулятора випрямленою ЕРС з виходу джерела задаючої напруги подається сигнал на зниження випрямленою ЕРС ТП на величину динамічного перерегулювання при розгоні. В результаті в проміжку часу t_0-t_x випрямлена ЕРС знижується до рівня E_{d1}. Одночасно в момент часу t_0 подається сигнал на включення таймера, який після закінчення заданого часу відліку подає сигнал на відключення логічного блоку. В результаті контакт керованого ключа перемикається в початкове положення і на вхід регулятора випрямленою ЕРС подається сигнал E_{dH}, відповідну номінальній випрямленої ЕРС тиристорного перетворювача. В результаті забезпечується перехідний процес випрямленої ЕРС e_d ТП без перевищення номінального значення.

Це дозволяє зменшити випрямлену ЕРС E_{d0} при нульовому куті управління на величину перерегулювання в початковий момент прискорення під навантаженням, що становить 15-18% від номінальної випрямленою ЕРС ТП. Запас випрямленою ЕРС $\Delta E_{d0(1)}$ знижується до мінімально можливого значення, яке визначається складовими на відхилення напруги мережі (до 10%) і безпечне інвертування реверсивного ТП (до 25% номінальної випрямленою ЕРС). Це забезпечує більш високий коефіцієнт потужності в сталому режимі роботи під навантаженням і відповідно зниження втрат електричної енергії, пов'язаних зі споживанням реактивної потужності.

Розроблена система двозонного регулювання зі структурою, що перемикається, та автоматичною зміною завдання випрямленою ЕРС впроваджена в промислову експлуатацію на стані 550 ПрАТ «ДМЗ».

На рис. 2.21 представлені осцилограми координат ЕП кліті № 6, отримані за цикл прокатки при роботі цієї системи. Відпрацювання ударного прикладання навантаження і розгон під навантаженням відбуваються без перевищення випрямленою ЕРС E_d сталого значення, рівного 900 В. Перехідні процеси швидкості, струму і потоку збудження ідентичні процесам в діючій системі двозонного регулювання.

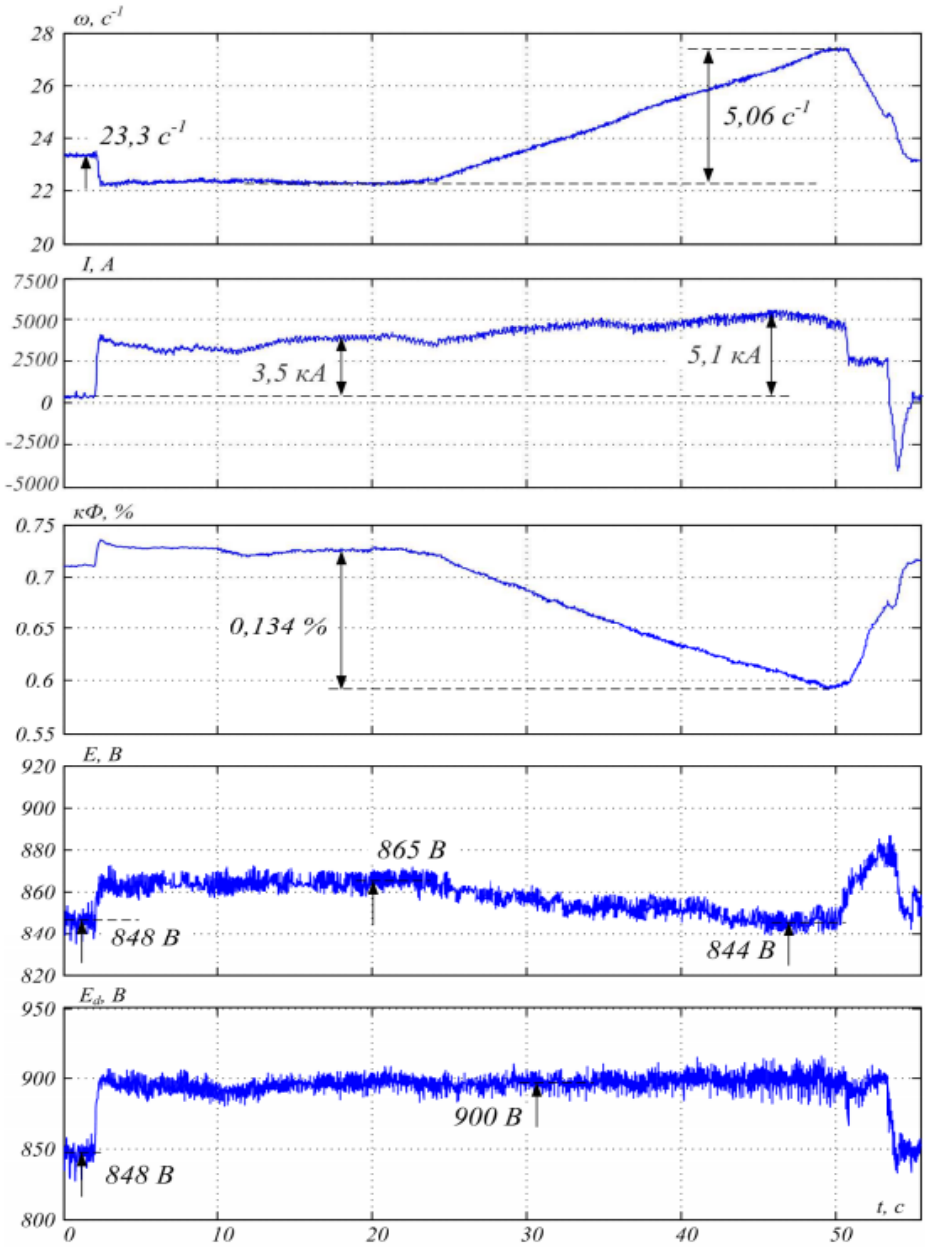


Рисунок 2.21 - Перехідні процеси координат ЕП за цикл прокатки в розробленій системі ДЗРШ з автоматичною зміною завдання ЕРС

Проведені теоретичні дослідження запропонованих систем ДЗРШ продемонстрували можливість зниження запасу випрямленою ЕРС ТП практично без погіршення динамічних показників і надійності роботи електроприводу. Зниження втрат електричної енергії дозволить знизити споживання реактивної потужності на 15-35% без застосування компенсуючих пристроїв і за рахунок цього домогтися зниження втрат електричної енергії на 12-20%.

Для знов проектованих ЕП поліпшення енергетичних показників при застосуванні розглянутих систем ДЗРШ забезпечується за рахунок раціонального вибору вторинної напруги перетворювального трансформатора. У порівнянні з напругою, що приймається в відомих електроприводах, її рекомендується знизити на 10-12%. Це дозволяє зменшити споживання реактивної потужності на 7-12%, тобто практично без капітальних витрат. Для головних ЕП експлуатованих станів прокатки аналогічний же ефект може бути забезпечений за рахунок переключення (або установки додаткових) отпаєк вторинних обмоток трансформаторів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Даний дипломний проект передбачає модернізацію та дослідження динамічних властивостей електропривода кліті № 6 прокатного стана 550 за матеріалами цеху № 2 ПрАТ «Дніпровський металургійний завод».

У даному розділі розглядаються питання підвищення безпеки праці, створення безпечних гігієнічних умов на робочих місцях, зменшення дій небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які на сьогоднішній день є одним з першочергових завдань у сфері виробництва, а також узагальнені питання техніки безпеки, пожежної профілактики та захисту навколишнього середовища.

3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки

ПрАТ «ДМЗ» згідно з норм ДСП 173-96 [24] відноситься до підприємств І класу небезпеки виробництва тому розмір санітарно-захисної зони повинен бути не менш 1000 метрів.

Прокатний цех № 2 – це середньосортний стан 550, введений в експлуатацію в 1987 році. Стан складається з 8 клітей дуо, розташованих послідовно в двох паралельних лініях. Проектна потужність стану 550 становить 250 тис. тонн прокату в рік. На стані виробляють унікальну, яка не має аналогів продукцію: автовісі і автоободи майже для всіх автомобілів, що випускаються в СНД; профілі для вугільної промисловості і сільськогосподарського машинобудування; профілі для вагонобудування і ін. Також на стані 550 виробляється продукція загального призначення (швелери

з паралельними полками №№ 8П-16П, 20П, 22П, в тому числі і полегшені; рівнополочні куточки №№ 70-100). У 2010 році в прокатному цеху № 2 освоїли виробництво швелерів UPE 100, 120 і 140 за євростандартами. Для подальшого поліпшення якості прокату і зниження його металоємності ведеться робота з удосконалення калибровок, режимів обтиснень і зміни металоємності фасонних профілів при збереженні рівня механічних властивостей.

Небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при прокатці металів, у першу чергу обумовлені її видом, устаткуванням і робочими засобами.

Виробничий процес по характеру роботи, що виконується згідно ГОСТ 12.1.005-88 [25] та ДСН 3.3.6.042-99 [26] відноситься до категорії середньої тяжкості IIа, при яких витрата енергії дорівнює 176-232 Вт (151-200 ккал/год.).

Технологічні операції виконуються в несприятливих кліматичних умовах (високі температури робочої зони, теплові випромінювання, загазованість, запиленість і тому подібне).

Допустимі і фактичних величини метеоумов в робочій зоні відповідно до [25] і [26] приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Метеорологічні умови в робочій зоні (факт/доп)

Професія	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %,		Швидкість руху, м/с, не більше	
		Холодний період	Теплий період	Холодний період	Теплий період	Холодний період	Теплий період
Наладчик стану 550 (механік)	IIа	18-19/ 17-23	22/ 18-27	40-60/ 75	40-60/ 65 при 26 °С	0,2/ <0,3	0,25/ 0,2-0,4

Відповідно ДСН 3.3.6.042-99 [26] нормативна інтенсивність теплового опромінювання в приміщенні складає 35,0 Вт/м ^{2} - при опроміненні 50% та

більше поверхні тіла, 70 Вт/м ^{2} - при величині опромінюваної поверхні від 25 до 50%, та 100 Вт/м ^{2} - при опроміненні не більше 25% поверхні тіла працюючого. Фактичні значення інтенсивність теплового опромінювання у цеху знаходяться у цих границях.

Джерела теплових випромінювань в прокатних цехах – оброблюваний метал, нагрівальний пристрій, прокатні стани, допоміжне устаткування, печі для термічної обробки металу, агрегати нанесення покриттів, обробні агрегати. Велика кількість теплоти виділяється при складуванні вихідних матеріалів, напівпродукту, готових виробів, охолоджуванні на холодильниках і так далі, при транспортуванні металу на склади готової продукції.

У прокатних цехах основними небезпечними й шкідливими виробничими чинниками є: пил, пари й гази, надлишкова теплота, підвищений рівень шуму, вібрацій, електромагнітних випромінювань, машини й механізми що рухаються, рухливі частини виробничого устаткування та ін.

У прокатному виробництві проявляють свою токсичну дію багато шкідливих хімічних виробничих чинників. Так, при гарячої прокатки злитків в повітрі прокатного відділення створюється запилене повітря у зв'язку із зломом окалини і її дробленням.

Оцінюючи параметри запиленості цеху, слід звернути увагу, що пил гігієнічно шкідливий з огляду впливу на організм людини. За ГОСТ 12.1.005-88 [25] нормуються гранично допустимі концентрації різного пилу в робочій зоні. ГДК пилу різного походження коливаються від 1 до 10 мг/м^3, фактичне значення – 4,8 мг/м^3, що не перевищує гранично-допустиму норму.

Фактичні і допустимі значення параметрів транспортно-технологічної вібрації згідно ДСН 3.3.6.039-99 [27] наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Фактичні і допустимі значення параметрів вібрації

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

Вібрація, відповідає допустимим параметрам і не перевищує критичних параметрів.

Основним джерелом шуму при роботі стана є працюючий двигун. Згідно ДСН 3.3.6.037-99 [28] допустимий рівень звукового тиску 80 дБ, фактичний рівень шуму – 85 дБ.

Згідно ДБН В.25-28-2006 [29] робота наладчика стану відноситься до V розряду зорової роботи, який характеризується роботою малої точності.

Параметри природного і штучного освітлення приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Параметри природного і штучного освітлення

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

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

Згідно ПУЕ [31] прийнято, що напруга силових електричних кіл в цеху не вище 660 В, у виробничих приміщеннях – не вище 220 В. Електропроводка виконана ізольованими проводами. Кабели й шланги трубопроводу розміщені і укріплені таким чином, щоб при русі візка виключалася можливість їх зачеплення за конструкції, які знаходяться в

прокатному цеху. Для захисту електродвигуна від короткого замикання застосовані автоматичні вимикачі з електромагнітними і тепловими розцепителями. Кола керування, освітлення і сигналізації мають захист від коротких замикань.

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

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

Виробничий процес в прокатному цеху за вибуховою, вибухопожежною і пожежною небезпекою згідно з НАПБ Б.03.002-2007 відноситься до категорії «Г», тому що обробці піддаються негорючі матеріали в розпеченому стані [32].

Будівлю цеху побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій, цегли, залізобетону, скла і ін.) і, згідно ДБН В.1.1-7-2002, вона має II ступінь вогнестійкості [33].

Для забезпечення пожежної безпеки використовуються наступні заходи: вся апаратура управління розміщена в герметизованому контейнері, електродвигуни всіх механізмів мають ступінь захисту від зовнішнього середовища. Електроприводи мають глибоке регулювання швидкостей. У зв’язку з цим навантаження на гальма мінімальне, температура гальмівних колодок в робочому режимі не перевищує допустиму, резистори обрані з стандартних блоків з розрахунком, щоб температура поверхні активних частин не перевищувала 185 °С. З метою забезпечення пожежної безпеки на пульту передбачено вуглекислотний вогнегасник, який використовується з метою гасіння електропроводки та електрообладнання.

Для гасіння пожеж водою використовується пожежний водопровід, об'єднаний з виробничим. На його мережі у приміщенні цеху встановлені пожежні крани з брезентовими рукавами і відводами. Зовні будівлі по її периметру в підземних колодязях розміщені пожежні гідранти. Для доступу на дах будівлі використовуються пожежні сходи, укріплені на стінах. Для гасіння можливих пожеж в цеху (відділі, ділянці, лабораторії) передбачені первинні засоби пожежогасіння, які визначаються на підставі НАПБ А.01.001-2004 та НАПБ Б.03.001-2004 [34].

Пожежною сигналізацією обладнанні всі приміщення цеху.

3.2 Заходи поліпшення умов праці

Оздоровлення повітряного середовища на робочих місцях від пилу, газів, підвищених теплових параметрів досягається вентиляцією. Приточне повітря в цех поступає з віддаленої повітрозаборної станції, розташованій в районі найменшої запиленості. При концентрації пилу в атмосферному повітрі більше ніж на 33% від величини ГДК має застосовуватись очистка вентиляційного повітря на всмоктуючій магістралі. Для потреб цеху використовуються центробіжні вентилятори низького (до 100 кг·с/м^2), середнього (100-300 кг·с/м^2) та високого (300-1200 кг·с/м^2) тиску).

В залежності від призначення вентилятори бувають: а) звичайного виготовлення (для температур не вище 1500С і запиленості повітря не більше 150 мг/м^3); б) антикорозійного виготовлення – для переміщення агресивних середовищ; в) вибухонебезпечного виготовлення – для переміщення вибухоне- безпечних сумішей; г) пилові для переміщення повітря з вмістом пилу більше 150мг/м^3 . Термін служби вентилятора має бути не менше 10 років. Вентиляційні установки застосовують практично на всіх дільницях виробництва і праці.

3.2.1 Розрахунок аерації цеху та освітлення приміщення

Проведемо розрахунок аерації цеху, що є основним засобом зниження температури повітря в робочої зоні цеху зі значним надлишком теплоти.

Дані для розрахунку: будівля об'ємом 452700м^3 при висоті 12м і довжині 503м, ширині 75м тепловиділення складає 200ккал/м^{3}год. Середня температура зовнішнього повітря дорівнює 20°С (γ_1=1,173 кг/м^3), а внутрішнього 26°С (γ_2=1,150 кг/м^3). Різницю температур повітря приймаємо рівною 6°С.

Надмірне тепловиділення в цеху:

$$Q_{надм} = q \cdot V_{ном} \cdot 0,8 = 200 \cdot 452700 \cdot 0,8 = 72,4 \cdot 10^6 \text{ ккал / год.}$$

Кількість повітря, яка повинна пройти через витяжні отвори ліхтаря:

$$V_{пов} = \frac{Q_{надм}}{C \cdot \Delta t} = \frac{72,4 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 6} = 40,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ / год.}$$

Площа витяжних отворів ліхтаря:

$$F = \frac{V_{пов}}{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2} \cdot H \cdot 3600}} = \frac{40,2 \cdot 10^6}{0,65 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \frac{1,173 - 1,150}{1,150} \cdot 12 \cdot 3600}} = 738 \text{ м}^2.$$

Розподіляючи цю площу з обох боків витяжного ліхтаря при довжині цеху в 100м, отримаємо висоту витяжного ліхтаря:

$$h_{от} = \frac{F}{2 \cdot l \cdot n} = \frac{738}{2 \cdot 503 \cdot 1} = 0,74 \text{ м.}$$

Площу отворів приточувань приймаємо із запасом рівним 50%:

$$F_{пр} = 0,74 \cdot F = 542 \text{ м}^2.$$

Проведемо розрахунок освітлення приміщення

1) Вибір джерела світла (лампа), при цьому ураховуємо висоту приміщення. В нашому випадку виберемо ДРЛ.

2) Вибір типу випромінювача. Виберемо випромінювач з косинусною кривою випромінювання СД

3) Висота подвісу випромінювача:

h = hп – hр = 8 – 0,8 = 7,2м.

Віддаленність випромінювачів друг від друга:

$$L = \lambda \cdot h = 1,7 \cdot 7,2 = 11,52 \text{ м.}$$

4) Кількість випромінювачив:

по довжині прольоту $n_1 = A/L = 120/12 = 12$ шт.

по ширині прольоту $n_2 = B/L = 24/12 = 2$ шт.

Таким чином, кількість випромінювачів у прольоті $N = n_1 \cdot n_2 = 24$ шт.

3.3 Захист навколишнього середовища

На металургійному підприємстві ПрАТ «ДМЗ» для оперативного вирішення проблем екологічної безпеки, починаючи з 2011 р, була впроваджена і функціонує відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 14001: 2004 сертифікаційна система менеджменту навколишнього середовища.

В рамках виконання заходів регіональної програми по зниженню забруднення навколишнього середовища на 2007-2015 рр. на ПрАТ «ДМЗ» реалізовано проект установки пилоподавлення бурого диму за допомогою газоподібного азоту і пара на ливарному дворі доменної печі № 3. Проектом передбачена подача азоту через спеціальні сопла, при цьому над поверхнею металу створюється завіса, що оберігає його від окислення. Ці рішення перевірені на практиці і доведена висока експлуатаційна надійність таких пристроїв. Реалізація даного проекту дозволить знизити викид пилу в атмосферу на 482,6 тонни, а також істотно знизити рівень забруднення атмосферного повітря на межі СЗЗ - на 0,16 часткою ГДК, в житловій забудові - на 0,82 часткою ГДК.

У 2005 р на підприємстві також була виконана дослідно-експериментальна робота по придушенню викидів пилу при зливі чавуну в ківш на ливарному дворі ДП-5. При цьому ефективність пилоподавлення склала 80%.

За даними статистичного звіту № 1 «Екологічні витрати» ПрАТ «ДМЗ», в 2014 р на охорону навколишнього природного середовища витрачено 48 878 тис. грн. З них на капітальні інвестиції, капремонти і поточні витрати - 20 806 тис. грн .; екологічні платежі до держбюджету склали 3481 тис; послуги природоохоронного призначення 24534 тис [35].

Таким чином, ПрАТ «ДМЗ» дбає про забезпечення належних умов праці своїх співробітників, поліпшує захист працівників при виконанні

службових обов’язків, контролює дотримання вимог до правил охорони праці під час експлуатації обладнання, пристроїв, машин та перевіряє виконання вимог щодо організації робочого місця на підприємстві, безпеки під час обслуговування і експлуатації устаткування, обладнання та машин.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Характеристика об’єкту дослідження

Проведемо розрахунок техніко-економічного обгрунтування заміни електропривода кліті стану 550 на ПрАТ «ДМЗ».

У І-му (базовому) варіанті застосовано реостатну релейно-контакторну схему регулювання швидкості електропривода.

У ІІ варіанті – установка перетворювача частоти з метою регулювання швидкості.

Пропонована система дозволяє:

1) зменшити витрати на споживання електроенергії за рахунок економічного частотного керування швидкістю приводного АД замість реостатного регулювання з непродуктивними втратами потужності на бодаткових опорах;

2) зменшити витрати на технічне обслуговування системи електропривода зарахунок виключення зі схеми електроприводу силових комутаційних апаратів, секцій пускових та регулювальних опорів;

3) підвищити ресурс роботи електромеханічної системи крану за рахунок здійснення плавних пуско-гальмівних режимів.

4.2 Проектні рішення

Витрати на купівлю 250000гр. (перетворювач) + 90000гр. (двигун) = 340000гр.

Витрати на транспортування слід прийняти у розмірі 10% від вартості для легкого обладнання, тобто 34000гр.

Витрати на монтаж обладнання слід прийняти у розмірі 15%, тобто 51000. Загальні витрати на купівлю обладнання, його транспортування та монтаж становлять 425000гр.

4.3 Розрахунок собівартості продукції

Розрахунок величини витрат по статтях калькуляції виконуємо по формулі:

$$C_{ПР} = \frac{C_Б \cdot a}{K_В} + C_Б \cdot (1 - a), \quad (4.1)$$

де $C_Б$ – витрати по даній статті калькуляції на одиницю продукції по базовому варіанту;

$C_{ПР}$ – витрати по даній статті калькуляції на одиницю продукції по проекту;
а – частка постійних витрат по даній статті калькуляції;

$K_В$ – коефіцієнт зміни обсягу виробництва.

$$K_В = \frac{V_{ПР}}{V_Б}, \quad (4.2)$$

де $V_{ПР}$, $V_Б$ – обсяг виробництва відповідно в проектному і базовому варіантах.

Так як обсяг виробництва в результаті проведених заходів не змінюється і дорівнює В=23800тис.т./рік, то $K_В$=1.

Відповідно витрати по статтях калькуляції в проектному і базовому варіантах, будуть однаковими, крім тих статей за якими очікується зміна витрат, а саме засобів і амортизація основних засобів.

Результати розрахунку зведені в таблицю 4.1 та таблицю 4.2.

Амортизацію основних засобів розрахуємо по формулі:

$$A_{ПР} = \frac{A_{Б}}{B_{ПР}} + \frac{Ф_{ДОП} \cdot H_{А}}{B_{ПР} \cdot 100}, \quad (4.3)$$

де $А_Б$ – абсолютна сума амортизаційних відрахувань;

$Ф_{ДОП}$ – величина капітальних витрат;

$Н_А$ – середня норма амортизації основних фондів, що вводяться в експлуатацію ($Н_А$=0,20);

$В_{ПР}$ – обсяг виробництва по проекту ($В_{ПР}$=10000тис.т./рік).

Таблиця 4.1 – Витрати по переділу у базовому варіанті

Найменування статей затрат	Кількість, (т.)	Ціна, (грн. коп.)	Сума, (грн. коп.)	На одну т., грн./т.
1	2	3	4	5
1. Паливо технологічне (газ 1000м^3)	9422,7	346,90	3268734,63	137,26
2. Електроенергія, кВтч	11559192	0,36	4161309,12	174,75
3. Пар, Гкал	7041	29,11	204963,51	8,61
4. Вода технічна	11973143	0,06	718388,58	30,17
5. Вода свіжа	264580,23	0,12	31749,63	1,33
6. Стиснуте повітря, 1000м^3	8934	19,19	171443,46	7,20
Всього енерговитрат			8556588,93	359,32
7. Допоміжні матеріали			120541,00	4,91
8. Основна зарплата робітників			1367762,00	55,73
9. Додаткова зарплатня робітників			124361,00	5,07
10. Відрахування на соцстрах			592314,00	24,13
11. Знос інструментів			1302846,00	53,08
12.Поточний ремонт і утримання основних коштів			2710800,00	110,45
13. Амортизація основних засобів			2896651,00	119,32
14. Загальновиробничі витрати			8119753,00	330,82
Разом витрат по переділу			17235028,00	702,21
Всього витрат			23133002,77	1061,53

Таблиця 4.2 – Витрати по переділу у проектному варіанті

Найменування статей затрат	Кількість, (т.)	Ціна, (грн.коп.)	Сума, (грн.коп.)	На одну т., грн./т.
1	2	3	4	5
1. Паливо технологічне (газ 1000 м^3)	9422,7	346,90	3268734,63	137,26
2. Електроенергія, кВтч	11559192	0,36	4161309,12	174,75
3. Пар, Гкал	7041	29,11	204963,51	8,61
4. Вода технічна	11973143	0,06	718388,58	30,17
5. Вода свіжа	264580,23	0,12	31749,63	1,33
6. Стиснуте повітря, 1000м^3	8934	19,19	171443,46	7,20
Всього енерговитрат			8556588,93	359,32
7. Допоміжні матеріали			120541,00	4,91
8. Основна зарплата робітників			1367762,00	55,73
9. Додаткова зарплата робітників			124361,00	5,07
10. Відрахування на соцстрах			592314,00	24,13
11. Знос інструментів			1302846,00	53,08
12.Поточний ремонт і утримання основних коштів			2548033,80	107,14
13. Амортизація основних засобів			2798770,60	121,36
14.Загальновиробничі витрати			8119753,00	330,82
Разом витрат по переділу:			17153719,95	701,23
Всього витрат:			23051694,72	1060,55

$$A_Б = A_{ВПР} - A_{ОСН.Ф.ВИС.}, \quad (4.4)$$

де $А_{ВПР}$ – амортизація основних засобів на весь обсяг виробництва ($А_{ВПР}$=2796770,60грн.);

$А_{ОСН.Ф.ВИС.}$ – амортизація виведених з виробництва основних засобів.

$$A_{ОСН.Ф.ВИС.} = C_{ВИС.} \cdot H_A, \quad (4.5)$$

де $С_{ВИС.}$ – вартість виведеного устаткування з урахуванням зносу за даними бухгалтерії $С_{ВИС.}$=35000грн.

$$A_{ОСН.Ф.ВИС.} = 35000 \cdot 0,20 = 7000 \; грн.$$

$$A_Б = 2896670,60 - 7000 = 2889670,6 \; грн.$$

$$A_{ПР} = \frac{2889670,6}{100000} + \frac{425000 \cdot 0,20}{100000 \cdot 100} = 28,89 \; грн./т.$$

Витрати на поточний ремонт та обслуговування:

$$C_{ПР} = C_Б \cdot (1 - 0,03) = 110,45 \cdot (1 - 0,03) = 107,14. \quad (4.6)$$

4.4 Економічна ефективність проектних рішень та розрахунок основних техніко-економічних показників

Річна економія від зниження собівартості в результаті впровадження заходів:

$$E_C = (\Sigma C_Б - \Sigma C_{ПР}) \cdot B_{ПР} = (702,21 - 701,23) \cdot 100000 = 98000 \; грн., \quad (4.7)$$

де $\Sigma C_Б, \Sigma C_{ПР}$ – витрати по переділу відповідно в базовому та проектному варіантах.

При незмінному обсязі виробництва, зниження експлуатаційних витрат пропорційно приросту прибутку.

$$\Delta П_р = \Delta З \cdot (1 - 0{,}18) = 98000 \cdot (1 - 0{,}18) = 80360 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Абсолютна ефективність:

$$E_{абс} = \frac{\Delta П_р}{Ф_{ДОП}} = \frac{80360}{425000} = 0{,}18. \quad (4.9)$$

Строк окупності капітальних вкладень:

$$T = \frac{1}{E_{абс}} = \frac{1}{0{,}18} = 5 \text{ років.} \quad (4.10)$$

Продуктивність праці по цеху:

$$П_{ПР} = \frac{В}{N} = \frac{23800}{425} = 56 \text{ т./ чол.}, \quad (4.11)$$

де N – середньосписочна чисельність працюючих (425 чоловік).

Фондовіддача цеху:

$$f = \frac{В}{Ф} = \frac{23800}{2305169{,}5} = 0{,}01 \text{ т./ грн.} \quad (4.12)$$

Техніко-економічні показники модернізації електрообладнання наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники

№ п/п	Показники	Од. вим.	Варіанти		Відхилення	
			Базовий	Проектний	Абс (±)	%
1	2	3	4	5	6	7
1.	Річний випуск продукції	тис.т.	100000	100000	-	-
2.	Фактичний час роботи	год.	2535	2535	-	-
3.	Продуктивність устаткування	т./год.	10,2	10,2	-	-
4.	Всього працюючих в службі	осіб.	425	425	-	-
5.	Продуктивність праці 1 робітника	т./осіб.	56	56	-	-
6.	Питома витрата енергетичних ресурсів:					
	- затрати на поточний ремонт	грн.	110,45	107,14	-3,31	-0,97
	- природній газ	грн/т.	137,26	137,26	-	-
	- електроенергія	кВтч/т.	174,75	174,75	-	-
	- пар	Гкал/т.	8,61	8,61	-	-
	- стиснуте повітря	$м^3$/т.	7,20	7,20	-	-
	- вода технічна	т/т	30,17	30,17	-	-
	- вода свіжа	т/т	1,33	1,33	-	-
7.	Капітальні вкладення по проекту	грн.		425000	-	-

Продовження таблиці 4.3.

1	2	3	4	5	6	7
8.	Вартість основних фондів	грн.	2305169,50	2410769,50	425000	4,3
9.	Фондовіддача	т./грн.	0,014	0,01	-0,013	-0,71
10.	Абсолютна ефективність	0,18				
11.	Строк окупності капітальних вкладень	років	5			

Аналізуючі отримані результати даного розрахунку можна зробити висновок, що запропонована модернізація є економічно ефективною, так як при зменшенні витрат по статті калькуляції, поточний ремонт та зміст основних засобів на 3%, при незмінному обсязі виробництва, ми отримали річний приріст прибутку $\Delta П = 80360\ грн.$, при абсолютній ефективності 0,18.

За результатами таблиці 4.3 можна констатувати, що запропонована модернізація є економічно доцільною. Термін окупності, який складає 5 років, є задовільним для даної розробки.

ВИСНОВКИ

У випускній роботі на тему: «Аналіз динамічних характеристик електропривода кліті прокатного стана 550 » було виконано два шляхи модернізації:

1) Розроблено та встановлено новий регулятору струму в існуючу систему керування електропривода кліті № 6 прокатного стану 550. При використанні нового типу регулятора струму якоря фірми Westinghouse (адаптивний регулятор струму), і на його основі розроблений поліпшений нелінійний регулятор струму. Проведено моделювання пуску двигуна без навантаження та під навантаженням для існуючої системи ТП-Д та для модернізованої системи. Отримані в результаті графіки перехідних процесів з новим адаптивним регулятором ясно показують, що наявність нового регулятора ніяк не вплинуло на характеристики нової системи.

2) Виконано інший етап модернізації, де виконано заміну існуючої системи тиристорний перетворювач-двигун, на систему перетворювач частоти-асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Було обрано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором H-compact PLUS 1RQ6-716-3JJ потужністю 3600кВт та високовольтний перетворювач частоти типу Perfect Harmony фірми Siemens з такими паспортними даними: номінальний струм – 500 А; номінальна потужність – 5500 кВА; вихідна частота – 0,5-120Гц. Виконана оцінка динаміки роботи асинхронного двигуна від частотного перетворювача за допомогою графіків перехідних процесів. Швидкодія спроектованого електроприводу визначається тривалістю перехідного процесу – від 10,25с. до 13с., в залежності від навантаження на вал

двигуна. Статична помилка за швидкістю при пуску та накиді навантаження відсутня. Статична помилка за струмом складає не більше 3%. Все це свідчить про придатність даної системи керування електроприводом кліті № 6 до роботи на прокатному стані 550.

В розділі «Охорона праці та захист навколишнього середовища» підкреслено, що ПрАТ «ДМЗ» дбає про забезпечення належних умов праці своїх співробітників, поліпшує захист працівників при виконанні службових обов'язків, контролює дотримання вимог до правил охорони праці під час експлуатації обладнання, пристроїв, машин та перевіряє виконання вимог щодо організації робочого місця на підприємстві, безпеки під час обслуговування і експлуатації устаткування, обладнання та машин.

Аналізуючі отримані результати розрахунку в «Економічній частині» роботи можна зробити висновок, що запропонована модернізація є економічно ефективною, так як при зменшенні витрат по статті калькуляції, поточний ремонт та зміст основних засобів зменшиться на 3%, при незмінному обсязі виробництва, ми отримали річний приріст прибутку $\Delta \ddot{I} = 80360\ \tilde{a}\eth\acute{i}.$, при абсолютній ефективності 0,18. Можна констатувати, що запропонована модернізація є економічно доцільною. Термін окупності, який складає 5 років, є задовільним для даної розробки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки» http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/243-2010- %D0%BF

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 05.02.1997 р. № 148 «Про Комплексну державну програму енергозбереження України» http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/148%D0%B0-97-%D0%BF

3. Ніколаєв В.О., Мазур В.Л. Виробництво плоского прокату. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 320 с.

4. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrunova I.A., Traino A.I. Calculation of the Cold-Rolling Power with Allowance for the Variable Work of Friction along a Deformation Zone. Russian Metallurgy. Vol. 2003. No. 4. P. 340-346.

5. Vasilev Y.D., Samokish D.M., Zhuravleva S.V., Projdak Y.S., Zamogilny R.O. State of production of thin flat rolled steel in the world and trends of development of cold rolling mills. Theory and Practice of Metallurgy. 2019. 1, pp. 15–28. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02. (in Ukrainian).

6. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. 2008 American Control Conference. Seattle. Washington. USA. 2008. June 11-13, pp. 2834–2839.

7. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. 17th IFAC Symposium on

Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Aug 2016. Vienna, Austria. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445

8. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164, pp.14004. DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004.

9. Tahir M., Ståhlberg U., Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. Preceedings of Iron and Steel Society/AIME: 44th Mechanical Working and Steel Processing. Orlando. USA. 2002. September 8 – 11. Volume 40, pp. 291-302.

10. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник [для вищ. навч. закл.] / За ред. проф. М.Г. Поповича та О.Ю. Лозинського. -К.: «Либідь», 2015. - 679 с.

11. Kukhar V., Korenko M., Stopin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiazhnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. Modern Electrical and Energy System. Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2019. September 23–25, pp. 46–49. DOI:https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465.

12. Kukhar V. V., Karmazina I. V., Prysyazhnyj A.G. Influence of physical and chemical indices of rolling momentum on energy consumption of continuous cold rolling mill. Problems of tribology. 2018. 4, pp. 92–100. DOI:https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99. (in Ukrainian).

13. Двигуни високовольтні серії H-compact PLUS. Каталог. 2015 р.

14. Високовольтні перетворювачі частоти типу Perfect Harmony фірми Siemens. Каталог. 2015 р.

15. ШарейкоД.Ю. Поліпшення динамічних характеристик комплектних електроприводів [Текст] / Д.Ю.Шарейко, І.О.Шведененко // Перспективна

техніка і технології: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (м. Миколаїв, 22-24 вересня 2014 року) – Миколаїв, 2014. – С.24-32

16. ФоменкоА.М. Комплектні електроприводи [Текст] : у 3ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи : навчальний посібник з грифом МОНУ / ФоменкоА.М., ШарейкоД.Ю. – Миколаїв : НУК, 2010. – 144с.

17. ФоменкоА.М. Комплектні електроприводи [Текст] : у 3ч. Ч.2: Цифрові комплектні електроприводи : навчальний посібник з грифом МОНУ. / ФоменкоА.М., ШарейкоД.Ю. – Миколаїв : НУК, 2014. – 143с.

18. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenchuk. 2020, pp. 510–513. DOI:https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818.

19. ШарейкоД.Ю. Адаптивний регулятор у структурі сучасного комплектного електроприводу [Текст] / Д.Ю.Шарейко, І.О. Шведененко // Вісник аграрної науки Причерномор'я – 2014. – Вип.1(77). – С.191-198.

20. Vasilev Y. D. D., Zamogilny R.O., Samokish D.M. Ingenious method of specifying the antifriction effectiveness of cold rolling resins according to their physical and chemical properties. Theory and practice of metallurgy. 2018. 6, pp. 15–21. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2. (in Ukrainian).

21. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст] / М.Г.Попович, О.Ю.Лозинський, В.Б.Клепіков – К.: Либідь, 2005. – 680с.

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

23. 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.

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

25. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. Metallurgist. 58. 9–10, pp. 788–795.

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

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

28. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – 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.

35. Пелих І. В., Руднєва Л. Д., Петренко В. А., Сулім-Тімовті А. А., Закора С. В. Управління екологічною компонентою програмою розвитку металургійного підприємства // МЕТАЛ І ЛИТТВО УКРАЇНИ №5 (264), 2015 року.