МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації процесу регулювання намотування сталевих листів. Система автоматичного регулювання натягу сталевих листів

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1743-з-с2
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Удовиця І.Ю.

Керівник доцент, к. т. н. Дьяченко В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (бакалаврський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Удовиця Іван Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації процесу регулювання намотування сталевих листів. Система автоматичного регулювання натягу сталевих листів
керівник роботи Дьяченко В.В., доцент, к. т. н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання натягу сталевих листів; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доцент, Дьяченко В.В.		
2	доцент, Дьяченко В.В.		
3	доцент, Дьяченко В.В.		
4	доцент, Дьяченко В.В.		
5	доцент, Дьяченко В.В.		
6	доцент, Дьяченко В.В.		
7	доцент, Дьяченко В.В.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	21.04-27.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	28.04-04.05.26	
3	Розробка технічного завдання	05.05-07.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	08.05-10.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури	08.05-14.05.26	
6	Розробка технічної документації	15.05-18.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	19.05-21.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	22.05-23.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	24.05-25.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	26.05 – 16.06.26	

Студент _____ Іван УДОВИЦЯ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Вера ДЬЯЧЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Удовиця І. Ю. Проект автоматизації процесу регулювання намотування сталевих листів. Система автоматичного регулювання натягу сталевих листів.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник В.В. Дьяченко, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є проєктування двозонної системи автоматичного регулювання натягу сталевої смуги на ділянці моталки прокатного стану для підвищення якості змотування та зменшення браку продукції.

У ході виконання роботи було проведено аналіз технологічного процесу намотування металопрокату та існуючих систем його автоматизації; розроблено математичну модель електромеханічної системи «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» з урахуванням безперервної зміни радіуса рулону; синтезовано контури підпорядкованого регулювання струму якоря та магнітного потоку збудження двигуна; розроблено алгоритм адаптивної компенсації динамічних моментів інерції; обґрунтовано вибір сучасного мікропроцесорного контролера та апаратури HMI; виконано розрахунки техніко-економічної ефективності та інвестиційної доцільності впровадження проєкту, а також розроблено заходи з охорони праці та промислової безпеки.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, сіми розділів, висновків, переліку джерел посилання з 48 найменувань, викладена на 94 сторінках машинописного тексту, включаючи 37 рисунків, 3 таблиці та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: автоматизація, система автоматичного регулювання (САР), натяг сталевого листа, двозонне регулювання швидкості, моталка, тиристорний перетворювач, програмований логічний контролер (ПЛК), математичне моделювання, радіус рулону, техніко-економічне обґрунтування.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 9
1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації 9
1.2 Технологічний процес 11
2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 21
2.1 Технологічні вимоги до регулювання параметрів 21
2.2 Технічні вимоги до апаратного забезпечення 22
2.3 Вимоги до програмно-алгоритмічного забезпечення 23
2.4 Вимоги до надійності, безпеки та захисних блокувань 24
2.5 Вимоги до ергономіки та інтерфейсу користувача (HMI) 26
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ 28
3.1 Розробка математичної моделі об'єкта управління 28
3.2 Принципи регулювання нагяту 35
3.3 Вибір режиму регулювання натягу 38
3.4 Існуюча система регулювання натягу 41
3.5 Розробка двохзонної системи регулювання натягу 44
3.6 Визначення структури регуляторів та розрахунок їх параметрів 47
4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ 50
4.1 Схема інформаційних і матеріальних потоків 50
4.2 Структурна схема розробленої САР 52
4.3 Функціональна схема системи частотного керування АД 55
4.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ 56
4.5 Схема електрична принципова 62
4.6 Схема електричних з’єднань 64
5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА І ДОСЛІДЖЕННЯ САР 66
6. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 72
6.1. Загальні заходи з охорони праці сталепрокатного цеху 72
6.2 Організація пожежної безпеки 75

6.3 Охорона праці оператора АСУ ТП 76
6.4 Вимоги до персоналу АСУ ТП 80
7. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 82
ВИСНОВКИ 87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 89

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної промисловості вимагає безперервного підвищення продуктивності агрегатів, зниження собівартості продукції та жорсткого контролю її якості. Одним із ключових етапів виробництва листового прокату є процес змотування сталевих листів у рулони. Якість намотування безпосередньо впливає на товарний вигляд продукції, геометрію листа, відсутність внутрішніх дефектів (таких як телескопічність, змини або міжвиткове тертя) та безпеку подальшого транспортування.

Головним чинником, що забезпечує високу якість формування рулону, є підтримання оптимального натягу смуги на заданому рівні впродовж усього циклу намотування. Оскільки в процесі роботи радіус рулону безперервно змінюється, динамічні навантаження та швидкісні режими електропривода постійно трансформуються. Традиційні або застарілі системи керування часто не встигають компенсувати ці збурення, що призводить до браку. Саме тому розробка та впровадження високоефективної системи автоматичного регулювання (САР) натягу сталевих листів на базі сучасних засобів автоматизації є надзвичайно актуальною науково-практичною задачею.

Мета дослідження – підвищення якості змотування сталевих листів та стабілізації технологічних параметрів шляхом проектування та дослідження ефективної системи автоматичного регулювання натягу з використанням сучасних мікропроцесорних засобів і алгоритмів керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати технологічний процес намотування сталевих листів як об'єкт автоматизації та виявити основні фактори, що впливають на точність регулювання натягу.

2. Розробити математичну модель системи «взаємопов'язаний електропривод – сталева смуга» з урахуванням зміни радіуса рулону та динамічних характеристик.

3. Обґрунтувати вибір структури САР натягу та вибрати закон регулювання.

4. Провести комп'ютерне моделювання розробленої системи в середовищі (MATLAB/Simulink) для оцінки показників якості регулювання та стійкості системи в динамічних режимах.

5. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації САР.

6. Виконати технічне забезпечення проекту: підібрати сучасні контролери, датчики натягу, перетворювачі частоти та виконавчі механізми.

7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації САР.

Об’єкт дослідження – процес автоматичного регулювання натягу сталевої смуги під час її намотування на моталку.

Предмет дослідження – структури, алгоритми, математичні моделі та технічні засоби автоматичного керування взаємопов’язаними електроприводами для стабілізації натягу прокату.

Для розв'язання поставлених завдань використано методи теорії автоматичного керування, математичного та комп’ютерного моделювання динамічних систем, теорії електропривода, а також методи програмування промислових контролерів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні алгоритмів компенсації динамічних моментів при зміні радіуса намотування, що дозволило зменшити похибку регулювання натягу в перехідних режимах.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений проект САР натягу може бути використаний при модернізації діючих прокатних станів або агрегатів поздовжнього різання сталевих листів, що дозволить знизити рівень браку та підвищити надійність роботи обладнання.

1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації

Прокатний стан – це складний комплекс машин та обладнання, який використовується для прокатки металу, його подальшої обробки та транспортування. (рис.1.1).

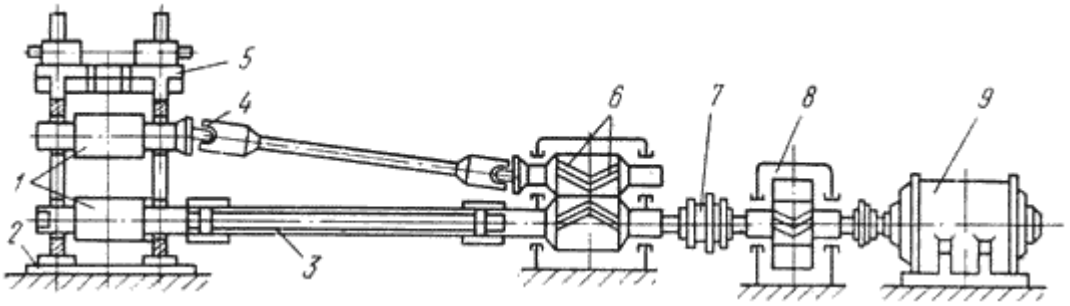


Рисунок 1.1 – Схема прокатного стану:
1 – прокатні валки; 2 – плита; 3 – трефовий шпиндель; 4 – універсальний шпиндель; 5 – робоча кліть; 6 – шестернева кліть; 7 – муфта; 8 – редуктор; 9 – двигун [30]

Його можна розділити на основне обладнання, яке знаходиться в робочій лінії, та допоміжне, яке використовується для транспортування та обробки прокату. Робоча лінія складається з робочих клітей та приводу, кожна з яких може мати свою лінію приводу. Кількість клітей у прокатному стані залежить від його призначення, і в деяких випадках їх може бути декілька десятків.

На рисунку 1.2 наведедені прокатні кліті.

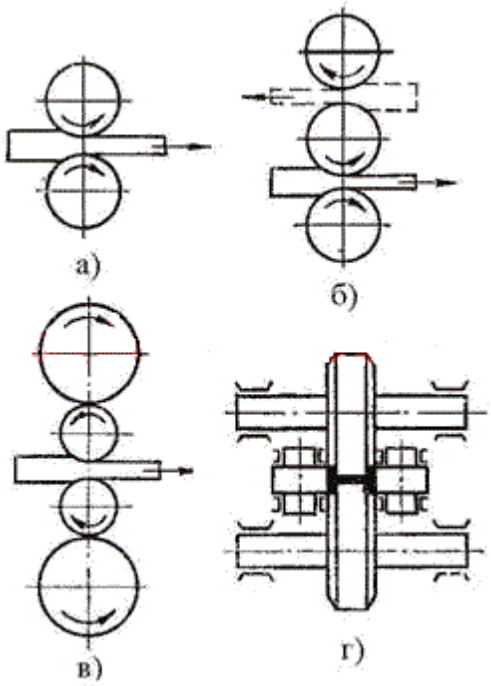


Рисунок 1.2 – Прокатні кліті [30]

У двовалкової клітях (рисунок 1.2, позиція а) здійснюється тільки по одному пропуску металу в одному напрямку.

Метал в тривалкових клітях (рисунок 1.2, позиція б) рухається в одну сторону між нижнім і верхнім, а у зворотний – між середнім і верхнім валками.

У четирехвалкових клітях (рисунок 1.2, позиція в) встановлюються опорні валки, які дозволяють застосовувати робочі валки малого діаметра, завдяки чому збільшується витяжка і знижуються деформують зусилля.

Універсальні кліті (рисунок 1.2, позиція г) мають неприводні вертикальні валки, які знаходяться між опорами підшипників горизонтальних валків і в одній площині з ними.

Шестернева кліть 6 призначена для розподілу крутного моменту двигуна між валками. Це одноступінчатий редуктор, передаточне ставлення якого дорівнює одиниці, а роль шестерень виконують шестеренні валки.

У сучасних прокатних цехах технологічні операції здійснюються по потоковому і безперервному принципах, технології нескінченної прокатки.

Переваги технології нескінченної прокатки наступні:

1. Підвищення продуктивності стану завдяки відсутності простою між

проходами рулонів.

2. Мінімізація відходів металу завдяки відсутності необхідності у відрізанні головної і хвостової частин рулону.

3. Постійно високі швидкості прокатки завдяки безперервності процесу, що забезпечує стабільну роботу обладнання та зменшує поломки.

4. Забезпечення стабільних технологічних умов, що підвищує якість виробленої продукції.

5. Збільшення терміну служби прокатного устаткування.

6. Зменшення потреби у технічному обслуговуванні, запасних частинах та витратних матеріалах.

7. Можливість намотування рулонів більшої ваги або згідно з конкретними замовленнями.

8. Можливість виробництва рулонів більшого розміру без необхідності дорогих модифікацій іншого обладнання.

1.2 Технологічний процес

Моталки – це частина технологічного обладнання, яка використовується для намотування тонких аркушів сталі у великі рулони або бунти. Головне призначення моталок – контроль натягу смуги під час намотування та розмотування рулону під час роботи пристрою. Вони використовуються як на гарячому, так і на холодному прокаті, а також для дрібносортних профілів і дроту.

Намотувальні машини (моталки) застосовують в лінії прокатного стану для змотування прокатного металу в рулони (смуга, стрічка, штрипс) і бунти (катанка, дрібносортні профілі). Моталки призначені для змотування гарячої смуги, холодної смуги, а також дрібносортних профілів та дроту.

Схеми намотування смуги показані на рисунках 1.3 та 1.4.

На реверсивних одноклітинних станах холодної прокатки моталки

встановлюються по обидва боки робочої кліті.

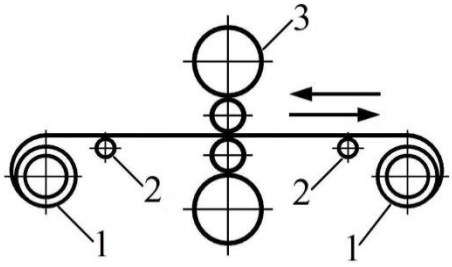


Рисунок 1.3 – Схема намотування смуги: 1 – моталки; 2 – напрямні холости ролики; 3 – робоча кліть табору [32]

На безперервних станах холодної прокатки встановлюється лише одна моталка з боку виходу металу.

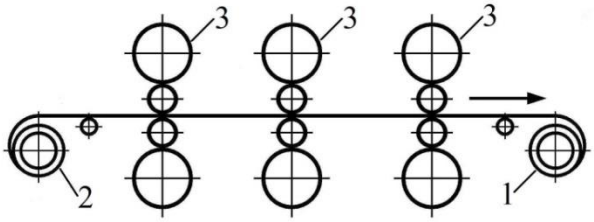


Рисунок 1.4 – Схема намотування смуги на безперервних станах холодної прокатки: 1 – моталка; 2 – розмотувач; 3 – робочі кліті стану [32]

Сучасні гарячі прокатні стани використовують моталки для намотування штаб у великі рулони. Останнім часом найпопулярнішими стали ролико-барабанні моталки, оскільки вони мають численні переваги порівняно з іншими типами моталок.

До конструкцій ролико-барабанних моталок (РБМ) висуваються такі вимоги:

– щільна, без телескопічності намотування витків, для чого змотування необхідно вести з натягом. При нещільному намотуванні відбувається окислення поверхні внутрішніх витків та утворення окалини. Крім того, через нерівномірність охолодження витків погіршується структура металу. Телескопічність призводить до пошкодження країв смуги під час

транспортування;

– при захопленні смуги моталкою та її змотуванні на відводить рольгангу стану не повинні утворюватися петлі або складки на смузі;

– жорсткість та зносостійкість конструкції, здатної тривалий час безперервно працювати при температурах 500÷7000С, за наявності окалини, пари та динамічних навантажень;

– ремонтопридатність (можливість здійснення ремонтів за мінімальний час);

– приймальні пристрої РБМ не повинні пошкоджувати рулони.

Схеми РБМ моталок наведені на рисунку 1.5.

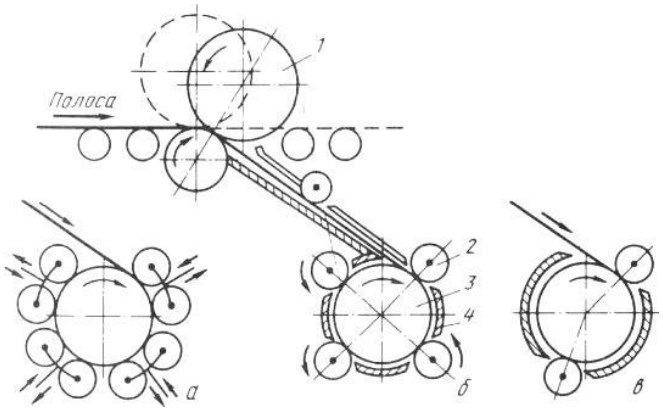


Рисунок 1.5 – Схеми барабанних моталок для змотування гарячої смуги – а – восьми роликової, б – четирихроликової, в – двороликової: 1 – рамки, що подають; 2 – рамки, що формують; 3 – барабан; 4 – проводки [34]

Під час намотування вузької смуги (2 мм), після утворення перших двох-трьох витків, формуючі ролики відводяться від рулону. Подальше змотування здійснюється з використанням натягу смуги барабаном моталки. Верхні тягаючі ролики працюють у режимі генератору або мають зазор між собою. Для цього достатньо лише двох-трьох формуючих роликів з провідками між ними.

Для змотування товших смуг (5-16 мм) можна використовувати перший спосіб, але це потребує великої потужності електродвигуна приводу барабана моталки. У більшості випадків використовується інший метод, де в моталці

встановлюють 2-3 пари жорстких притискних роликів. Після захоплення переднього кінця смуги барабаном моталки, притискні ролики залишаються притиснутими до смуги, а змотування з натягом відбувається як за допомогою притискних роликів, так і барабана моталки. Верхні ролики в цьому випадку працюють як тягуть смугу на рольгангу та подають її для направлення у моталку.

Для уникнення захльостування заднього кінця під час завершення намотування, швидкість розмотування смуги підбирається близькою до швидкості барабана моталки. При перехідному напрямку смуги для наступної моталки верхній ролик попередньої моталки піднімається, а провідники опускаються. Особливістю такої моталки є трипозиційний барабан, який може працювати у трьох режимах. Після намотування деякої кількості витків барабан розтягується, а його сегменти тісно прилягають до смуги, щоб уникнути її прослизання. Іноді виникають проблеми з захопленням смуги моталкою, і це може призводити до того, що смуга випинається вже після одного обороту. Цей процес потребує уважності та точного налаштування обладнання для забезпечення ефективної роботи.

Для досягнення ефективної роботи необхідно точно налаштувати різницю у відстані між барабаном моталки та формуючими роликами, а також вибрати оптимальний момент для розширення барабана до максимального діаметра. Під час цих налаштувань швидкість захоплення переднього кінця смуги потрібно збільшити на 1-3 м/с і налаштувати на рівень 12-14 м/с для тонких смуг.

Під час намотування смуги на барабан моталки створюється значний натяг, що знижує тиск металу на валки прокатного стану, покращує рівномірність смуги і сприяє правильному намотуванню металу на барабан моталки.

Швидкість прокатки і намотування смуги на сучасних станах досягає дуже великих значень, до 15 м/с для триклітьових станів та до 45 м/с для п'ятиклітьових.

Діаметр рулону D в основному визначається товщиною h смуги, що прокочується:

$D = (150 \div 200)\ h$ – для сталевих смуг та стрічок;

D = (120 ÷ 170) h – для смуг та стрічок із кольорових металів.

Режим роботи моталки:

– розгін барабана до заправної швидкості;

– заправляє смуги в моталку;

– розгін моталки зі смугою до максимальної швидкості. Натяг смуги під час розгону повинен залишатися незмінним;

– намотування рулону, у міру зростання діаметра рулону кутова швидкість двигуна повинна зменшуватись таким чином, щоб лінійна швидкість смуги залишалася постійною;

– гальмування двигуна до заправної швидкості, на цьому закінчується намотування рулону;

– гальмування моталки до нуля, знімання рулону.

Зразковий вид тахограми моталки показано на рисунку 1.6.

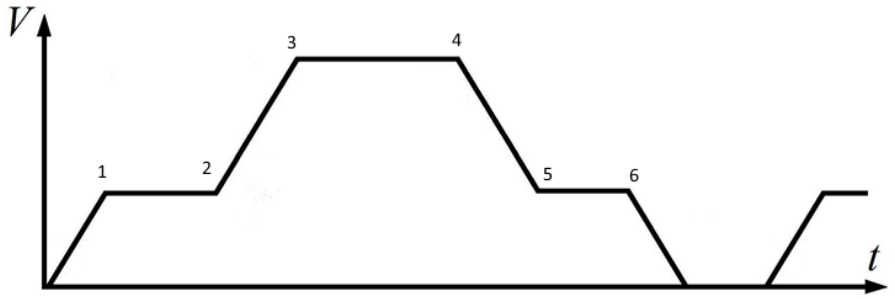


Рисунок 1.6 – Зразковий вид тахограми моталки [34]

Основна вимога до моталок полягає в забезпеченні створення щільного рулону без телескопічності. Важливо також, щоб натяг смуги був стійким під час процесу прокатки. Навіть невеликі коливання натягу можуть призводити до нерівності товщини смуги і утворення урвищ. У більшості випадків точність підтримки натягу або регулювання його впливає на якість виготовленої продукції. Головна вимога до електроприводу моталок - це забезпечення стійкого натягу смуги як під час роботи моталки, так і під час прискорення та уповільнення.

Для виконання цих вимог необхідні:

– досить великий діапазон регулювання швидкості;

– висока швидкодія приводу;

– можливість регулювання швидкості функції натягу металу.

Для приводу моталок застосовуються, як правило, двигуни постійного струму незалежного збудження, регулювання яких здійснюється за рахунок зміни магнітного потоку, так і напруги двигуна.

Високі вимоги до обробки металу привели до створення систем управління, в яких регулювання натягу є пріоритетним завданням. Дотепер моталки є вузьким місцем у технологічному устаткуванні безперервних станів, що перешкоджають подальшому підвищенню продуктивності. На ряді заводів спостерігаються часті поломки моталок, вони нерідко є також причиною браку прокату.

У результаті аналізу процесу змотування сортового прокату в рулони в умовах цеху холодної прокатки встановлено:

– керування столом моталки без врахування взаємодії з прокатом не забезпечує якісне змотування сортового прокату;

– під час змотування сортового прокату в режимі стабілізації струму стола моталки спостерігаються ривки натягу, що негативно впливає на якість змотування;

– існуючий гідропривод укладальника не забезпечує плавне регулювання швидкості його руху в широких межах;

– механізм моталки працює в умовах постійної вібрації, і регулювання швидкості намотування датчиками негативно впливає на точність вимірювання та швидкість обробки інформації;

– потрібна оптимізація процесу рівномірного намотування листа в рулони моталками та модернізація існуючої автоматизованої системи управління та технологічного процесу.

1.4 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

В наш час виробництво сортового прокату у вигляді мотків постійно зростає, навіть у періоди кризи в металургійній промисловості. Це зростання вимагає підвищення якості змотування сортового прокату для того, щоб продукція була конкурентоспроможною на світовому ринку. Однак вкладення значних коштів у реконструкцію ділянки змотування і заміну моталок може бути неефективним. Тому підвищення якості змотування моталками шляхом вдосконалення взаємозалежного керування механізмами є актуальною задачею для металургійного комплексу України.

Необхідні заходи для оптимізації процесу рівномірного намотування листа в рулони включають такі аспекти:

1. Регулювання натягу змотування шляхом керування взаємозалежними механізмами ділянки змотування сортового прокату.

2. Точне регулювання швидкості руху укладальника в залежності від поточного змотуваного шару і швидкості обертання стола моталки.

3. Дослідження можливості зменшення ризику зриву витків за рахунок керування швидкістю руху укладальника і натягом прокату під час переходу до змотування нового шару.

4. Впровадження бездатчикової системи управління для електропривода моталки, яка використовує спостереження швидкості і отримує необхідні дані від частотного перетворювача.

5. Створення комплексу технічних засобів для керування системою ділянок моталки.

Система керування механізмами ділянки змотування сортового прокату повинна бути централізованою, що означає, що вона керується одним центральним пунктом. Ця система формує настройки і відправляє команди для керування окремими механізмами на місцевому рівні, які відповідають за різні етапи процесу змотування сортового прокату.

На основі поставлених задач, функціонал системи автоматичного регулювання (САР) ділянки змотування сортового прокату повинен ділитися на три основні категорії:

– керуючі (регулюючі) функції,

– інформаційні (контрольно-діагностичні) функції

– функції захисту та блокування.

1. Керуючі та регулюючі функції (Основний контур)

Це базові функції системи, що забезпечують безпосереднє керування технологічним процесом у динамічних та усталених режимах:

– автоматичне бездатчикове регулювання натягу прокату: підтримання заданого технологічного натягу смуги/дроту в процесі намотування без використання механічних датчиків зусилля (тензометрів), шляхом математичного розрахунку та регулювання моменту й швидкості двигуна моталки через частотний перетворювач;

– синхронізація та взаємопов'язане керування механізмами: узгодження швидкості обертання стола моталки із лінійною швидкістю прокатки (швидкістю чистової групи клітей стана) для виключення петлеутворення або надмірного натягу на початковому етапі змотування;

– керування кроком та швидкістю укладальника: точне регулювання швидкості та реверсу механізму укладальника залежно від поточного шару намотування, діаметра прокату та кутової швидкості моталки для забезпечення щільного, виток до витка, формування мотка.

– динамічна компенсація похибок при зміні шару: автоматична корекція швидкості укладальника та натягу прокату в момент переходу на новий шар намотування для запобігання зриву витків, защемлення або деформації металу.

– компенсація моменту інерції (динамічного моменту): розрахунок та автоматична зміна крутного моменту двигуна при розгоні та гальмуванні моталки з урахуванням безперервного збільшення маси та радіуса мотка.

2. Інформаційні та обчислювальні функції.

Ці функції відповідають за збір даних, обчислення внутрішніх параметрів системи та зв'язок між рівнями керування:

– бездатчикове спостереження (ідентифікація) швидкості: обчислення поточної кутової швидкості та положення ротора двигуна моталки за допомогою математичних моделей (спостерігачів стану), інтегрованих у програмне забезпечення частотного перетворювача;

– розрахунок поточного радіуса мотка: безперервне обчислення радіуса (або товщини) шару намотування в реальному часі на основі співвідношення лінійної швидкості прокату та кутової швидкості стола моталки.

– діагностика стану обладнання: контроль температури обмоток двигунів, струмів навантаження, напруги в ланці постійного струму частотних перетворювачів та тиску в гідро/пневмосистемах (якщо вони є);

– централізований обмін даними: передача параметрів роботи місцевих механізмів (частотних перетворювачів, локальних контролерів) на верхній централізований рівень керування та приймання звідти технологічних уставок (заданого натягу, марки сталі, діаметра прокату).

3. Функції захисту, безпеки та блокування

Забезпечують безаварійну роботу обладнання та захист персоналу в разі виникнення позаштатних ситуацій:

– захист від обриву (зриву) або заклинювання прокату: негайне реагування системи (зупинка привода або перехід в безпечний режим) у разі різкого падіння струму (натягу) або критичного перевантаження двигуна;

– обмеження динамічних параметрів: програмне обмеження максимальної швидкості обертання, максимального крутного моменту та темпу розгону/гальмування електроприводів для запобігання механічним поломкам редукторів та валів;

– аварійна зупинка (динамічне гальмування): забезпечення максимально швидкої безпечної зупинки моталки та укладальника при натисканні кнопки

«Stop» або при спрацьовуванні критичних технологічних захистів;

– логічні блокування: заборона запуску моталки у разі неготовності суміжних механізмів, відсутності живлення, відкритих захисних огороджень або за наявності невиправлених помилок у системі частотного регулювання.

Висновки. Навіть при зниженні загального обсягу виробництва сортового металопрокату спостерігається зростання попиту на прокат, який поставляється у формі рулонів. Вимоги до цього типу прокату стосуються не лише точності його геометричних параметрів, але й особливостей рулону для забезпечення зручного транспортування та подальшої обробки. Хоча сучасні лінії змотування пропонують високу якість рулонів, їх вартість є дуже великою, що робить реконструкцію таких ліній економічно необґрунтованою. Для збільшення виробництва прокату у формі рулонів і підвищення експортних можливостей металургійного виробництва необхідно покращити якість самоподібних мотків на існуючих лініях змотування прокату.

Використання технологій нескінченної прокатки дозволяє впроваджувати широкий спектр механізації та автоматизації виробництва. Тому вдосконалення процесу однорідного намотування листа в рулони за допомогою високошвидкісних моталок та модернізація існуючих систем автоматизації управління процесом намотування є важливою та перспективною задачею.

Реалізація цієї задачі шляхом розробки взаємопов’язаної бездатчикової системи керування дозволить оптимізувати роботу наявного обладнання без значних капіталовкладень. Це забезпечить стабільність натягу прокату в динамічних режимах та підвищить щільність і рівномірність намотування кожного шару мотка. Тому вдосконалення процесу однорідного намотування листа в рулони за допомогою високошвидкісних моталок та модернізація існуючих систем автоматизації управління процесом намотування є важливою та перспективною задачею. У межах цієї дипломної роботи буде спроектовано дворівневу взаємопов'язану САР натягу сортового прокату.

2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розробка ефективної системи автоматичного регулювання (САР) процесу змотування сортового прокату в мотки, а саме регулювання натягу сталевих листів, вимагає чіткого формування комплексу вимог до системи. Оскільки об'єкт автоматизації характеризується високою динамічністю, безперервною зміною параметрів (маси та радіуса намотування) та взаємозв'язком механізмів, вимоги до САР поділяються на технологічні, технічні, надійнісні, а також вимоги до програмно-алгоритмічного забезпечення та інтерфейсу оператора.

2.1 Технологічні вимоги до регулювання параметрів

Головною метою автоматизації є забезпечення високої якості формування мотка сортового прокату, що досягається шляхом точного відпрацювання технологічних параметрів. До них висуваються такі вимоги:

1. Точність стабілізації натягу прокату: САР повинна підтримувати заданий технологічний натягу смуги/дроту з похибкою, що не перевищує ±3-5% від номінального значення в усталених режимах. У перехідних режимах (розгін, гальмування, скидання навантаження) динамічне відхилення натягу не повинно перевищувати 10% із часом регулювання не більше ніж $t_{рег}$ = 0,5 с.

2. Синхронізація швидкостей механізмів: система має забезпечувати жорстку координацію лінійної швидкості обертання стола моталки із кутовою швидкістю валків чистової групи клітей прокатного стана. САР повинна унеможливлювати утворення петлі металу (занижений натяг) або його порив/деформацію (надмірний натяг).

3. Закон керування механізмом укладальника: швидкість руху укладальника повинна динамічно змінюватися пропорційно до поточної швидкості обертання моталки та номера шару, що намотується. Крок укладання має точно відповідати фактичному діаметру сортового прокату з допуском не

більше ±0,2 мм для забезпечення щільного прилягання витків «виток до витка» без проміжків та нахлестів.

4. Керування в зоні переходу між шарами: Для виключення ризику зриву або заклинювання витків, при переході намотування на новий шар система повинна короткочасно (на час формування першого витка нового шару) знижувати швидкість укладальника на 5-7% із одночасною форсованою стабілізацією моменту привода моталки.

2.2 Технічні вимоги до апаратного забезпечення

Технічні засоби автоматизації повинні витримувати важкі умови металургійного виробництва (висока температура, пил, вібрація) та мати високу швидкодію.

1. Вимоги до мікропроцесорного контролера (ПЛК)

– час циклу виконання основної програми керування контурами натягу та швидкості повинен становити не більше 1-2 мс;

– модульна архітектура із промисловим захистом не нижче IP20 (для встановлення в шафу керування). Робочий діапазон температур – від 0 до +60 °C;

– підтримка високошвидкісних промислових мереж (Profinet, EtherCAT або Modbus TCP) для зв'язку із частотними перетворювачами зі швидкістю передачі даних не менше 100 Мбіт/с.

2. Вимоги до електропривода та частотних перетворювачів

– частотно-регульований електропривод (ЧРП) на базі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором або синхронних двигунів. Перетворювач частоти повинен підтримувати режим векторного керування у замкненому чи розімкненому контурі (FOC);

– інвертор моталки повинен витримувати перевантаження за струмом до 150% від номінального протягом 60 секунд для компенсації динамічних

моментів інерції під час пуску та гальмування;

– перетворювач частоти повинен мати вбудований математичний спостерігач стану (чисельну модель двигуна) для точного розрахунку швидкості обертання та моменту на валу без використання фізичного енкодера (похибка визначення швидкості не більше ±0,5%).

3. Вимоги до первинних датчиків та виконавчих механізмів.

– усі датчики (положення укладальника, температури двигуна, тиску в гідросистемі підйому стола) повинні мати клас захисту не нижче IP65/IP67;

– сигнали від датчиків повинні бути уніфікованими: аналогові (4-20 мА, 0-10 В) або цифрові (дискретні 24 В постійного струму).

2.3 Вимоги до програмно-алгоритмічного забезпечення

Програмне забезпечення (ПЗ) нижнього та верхнього рівнів має проектуватися за модульним принципом:

– алгоритм адаптивного розрахунку радіуса рулону: ПЗ має містити математичний блок, який у реальному часі за формулою інтегрування швидкості або через співвідношення лінійної та кутової швидкостей обчислює поточний радіус намотування R(t);

– компенсація динамічного моменту: алгоритм формування завдання на момент двигуна моталки д повинен враховувати динамічну складову:

$$\Delta M = J(t) \cdot \frac{d\omega}{dt}, \qquad (2.1)$$

де J(t) – змінний момент інерції мотка, що безперервно зростає,

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення. САР повинна автоматично додавати або віднімати цей момент під час перехідних процесів.

– дикористання стандартних мов програмування ПЛК згідно з IEC 61131-3 (переважно структурований текст ST для складних математичних розрахунків та блокові діаграми FBD/LAD для логіки блокувань).

2.4 Вимоги до надійності, безпеки та захисних блокувань

Вимоги до безпеки обчислювальної техніки/

Пристрої повинні бути сконструйовані і виготовлені таким чином, щоб при несправності, що виникають в процесі експлуатації, не створювалася небезпека для обслуговуючого (сервісного) і експлуатуючого персоналу (оператора) і навколишнього середовища.

Обчислювальна техніка передбачає наявність заземлення, техніку необхідно встановлювати вдалині від впливу високих температур, великої кількості пилу.

Вимоги до безпеки до електротехнічних виробів.

Відповідно до ССБТ «Справжній стандарт поширюється на електротехнічні вироби і встановлює загальні вимоги безпеки до їх конструкцій. Стандарт встановлює вимоги безпеки, що запобігають або зменшують до допустимого рівня вплив на людину: електричного струму; електричної іскри і дуги; рухомих частин виробів; частин виробів, що нагріваються до високих температур; небезпечних і шкідливих матеріалів, використовуваних в конструкції виробів, а також небезпечних і шкідливих речовин, що виділяються при його експлуатації: шуму й ультразвуку; вібрації; електромагнітних полів, теплового, оптичного і рентгенівського випромінювання». 38

Допустимий рівень шумів на робочих місцях.

Для зменшення шуму, що виникає внаслідок вібрацій корпусів і деталей агрегатів, необхідно:

– зниження інтенсивності вібрацій випромінюючих шум, деталей агрегатів за допомогою облицювання їх поверхонь вібропоглинаючими матеріалами;

– зменшення зазорів в з'єднаннях деталей і усунення неправильного їх зчленування (перекосів і т.п.);

– акустична обробка приміщень - розміщення на внутрішніх поверхнях приміщення звукопоглинальних облицювань;

– зменшення шуму на шляху його поширення шляхом установки звукоізолюючої огорожі (перешкоди).

Вимоги до безпеки від вібрації на робочих місцях.

Ослаблення вібрації досягають конструктивними і технологічними заходами:

– усуненням дефектів окремих частин системи;

– віброізоляція за допомогою пристроїв амортизаторів, тобто введення в коливальну систему додаткового пружного зв'язку;

– активний віброзахист - введення додаткового джерела енергії, що здійснює зворотний зв'язок від об'єкта, що ізолюється, до системи віброізоляції.

Вимоги щодо захисного заземлення та занулення.

Відповідно до ССБТ «Справжній стандарт поширюється на захисне заземлення та занулення електроустановок постійного і змінного струму частотою до 400 Гц і встановлює вимоги щодо забезпечення електробезпеки за допомогою захисного заземлення, занулення. Стандарт не поширюється на захисне заземлення, занулення електроустановок, що застосовуються у вибухонебезпечних зонах, електрифікованому транспорті, суднах, в металевих резервуарах, під водою, під землею і для медичної техніки».

Вимоги до вибухобезпеки.

Відповідно до ССБТ, виробничі процеси повинні розроблятися так, щоб ймовірність виникнення вибуху на будь-якій вибухонебезпечній ділянці протягом року не перевищувала 10.

Вибухобезпека виробничих процесів повинна бути забезпечена організаційно-технічними заходами. Для забезпечення вибухобезпечного ведення виробничого процесу нормативно-технічною документацією на нього повинні бути встановлені коефіцієнти безпеки.

САР ділянки змотування належить до систем підвищеної небезпеки, тому до неї висуваються жорсткі вимоги щодо безаварійності:

– у випадку обриву сортового прокату (діагностується за різким падінням струму моталки при високій швидкості) система повинна за час менше 0,1 с перевести привод у режим безпечного гальмування для запобігання травмуванню персоналу «хлистом» металу.

– система повинна апаратно та програмно забороняти запуск привода моталки у випадках: відсутності зв'язку між ПЛК та частотним перетворювачем; перегріву обмоток двигуна (>140 ΔС); аварії або неготовності суміжних вузлів лінії прокатки; відчинених захисних дверей зони змотування;

– частотні перетворювачі повинні мати сертифіковану функцію Safe Torque Off для гарантованого зняття напруги з двигуна при натисканні кнопок аварійної зупинки (E-Stop).

2.5 Вимоги до ергономіки та інтерфейсу користувача (HMI)

До складу математичного забезпечення, входять методи й алгоритми обробки інформації, контролю та управління об'єктами, що використовуються для розробки програмного забезпечення та функціонування СУ.

Для типових завдань і алгоритмів розроблено альбом стандартних алгоритмів контролю і управління.

Методи та алгоритми представлені у формі, що допускає їх реалізацію в програмному забезпеченні.

Для забезпечення роботи системи необхідні різноманітні технічні засоби,

від первинних перетворювачів до ЕОМ. У даній системі використовуються різні первинні перетворювачі для вимірювання товщини, тиску, швидкості, витрати та ін. з уніфікованим вихідним сигналом по току 4-20 мА. Всі технічні засоби працюють з уніфікованими сигналами по току та дискретними сигналами.

Верхній рівень системи (панель оператора або АРМ) повинен забезпечувати зручний моніторинг та керування процесом:

– відображення на мнемосхемі поточного стану моталки, швидкості прокатки, поточного натягу, розрахованого радіуса рулону та кількості укладених шарів;

– можливість вибору та завантаження з бази даних технологічних уставок під конкретний тип продукції (марка сталі, товщина/діаметр сортового прокату, профіль);

– протоколювання всіх подій, попереджувальних та аварійних сигналів із міткою часу (точність до 1 мс). Графічне відображення трендів швидкості та натягу для подальшого аналізу якості продукції.

Висновки. Сформульований комплекс технологічних, апаратних та алгоритмічних вимог визначає жорсткі рамки для створення прецизійної САР натягу сталевих листів і координації високошвидкісного укладальника в динамічних режимах намотування. Обґрунтована потреба в бездатчиковому векторному керуванні та мікропроцесорній техніці з високою швидкодією поєднується з детально опрацьованими критеріями промислової безпеки, електробезпеки, захисту від шуму, вібрації та вибухонебезпеки на робочих місцях. Врахування жорстких умов металургійного виробництва та вимог до ергономіки сучасного інтерфейсу оператора закладає надійний фундамент для подальшого проектування. Таким чином, аналіз усіх експлуатаційних та технічних аспектів виступає повноцінним технічним завданням для математичного моделювання та апаратного синтезу системи в наступних розділах дипломного проекту.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка математичної моделі об'єкта управління

Під час намотування (або розмотування) рулону його діаметр постійно змінюється. Ця зміна діаметру при не змінній кутовій швидкості намотувальних пристроїв призводить до відповідних змін у зусіль натягу смуги.

Наприклад, при намотуванні смуги на барабан моталки діаметр рулону D_p збільшується. При незмінній кутовій швидкості барабану його лінійна швидкість ϑ прагне до збільшення по відношенню до лінійної швидкості прокатки $\vartheta_{пр}$ у валках останньої кліті. Виникає різниця швидкостей, яка викликає збільшення натягу. Якщо у цьому випадку швидкість обертання двигуна моталки залишити незмінною, то збільшення лінійної швидкості рулону швидко призведе до критичного зростання зусиль натягу та обриву смуги.

Схема намотування смуги на барабан моталки наведена на рис. 3.1.

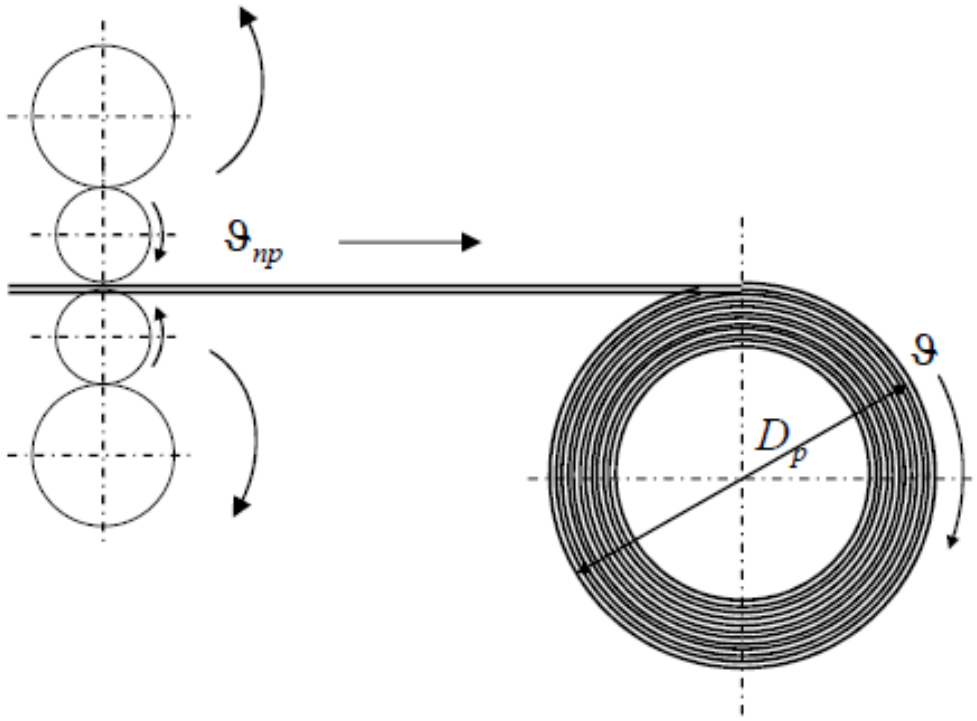


Рисунок 3.1 – Схема намотування смуги на барабан моталки [30]

На рисунку 3.2 наведена структурна схема розтягування смугової сталі при намотуванні її на моталку.

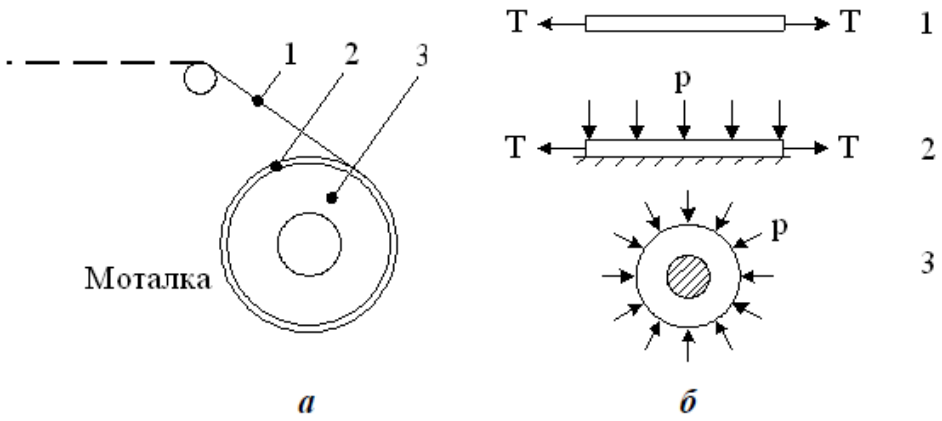


Рисунок 3.2 – Структурна схема напружених станів смуги при намотуванні в рулон: 1 – сталева полоса, 2 – рулон, 3 – моталка [31]

На рисунку 3.2 наведено три ділянки, де смуга піддається різним типам навантажень, схеми яких наведено на рис. 3.2, б. На ділянці між натяжною станцією і моталкою смуга схильна до одновісного растяжіння по осі смуги силою Т (схема навантаження 1). На верхньому витку рулона смуга схильна спільно з одновісним розтягуванням по осі полоси стиску під дією рівномірно прикладеного тиску *p*, при обгинанні смуги кола рулону (2 – схема навантаження).

Цей тиск виражається у наступній формулі:

$$\mathrm{p} = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{B} \cdot R}, \tag{3.1}$$

де Т – натягування полоси;

В – ширина полоси;

R – поточний радіус рулона.

На смугу, змотану в рулон, діє зовнішній тиск від наступного шару (схема навантаження 3). Напруги та деформації в цьому випадку розглядаються як для

циліндра, що знаходиться під дією рівномірно розподіленого по всій ширині смуги зовнішнього тиску (задача Ламі).

Смуга при навантаженні за схемою 1 (рис. 2.2) підпорядковується закону Гука:

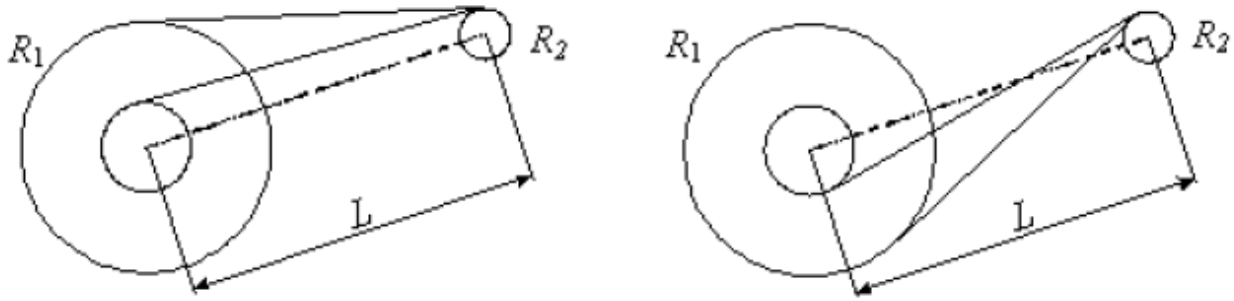
$$T = c \cdot \Delta L, \qquad (3.2)$$

де T – діюча сила;

c – жорсткість смуги при розтягуванні або стисненні;

ΔL – абсолютне подовження смуги.

При намотуванні або розмотуванні рулону на моталку зі зміною радіусу змінюється положення смуги, при цьому ділянка навантаження за схемою 1 змінє довжину. На рис. 3.3 представлено положення смуги для двох способів намотування матеріалу.



а б

Рисунок 3.3 – Структурні схеми способів намотування рулону:
а – прямий; б – зворотний [31]

Для структурних схем наведених на рис. 3.3, отримана залежність, що характеризує довжину смуги $L_п$:

$$L_n = \sqrt{L^2 - (R_1 \mp R_2)^2} \mp R_2 \cdot \cdot \left(arcsin\left(\frac{R_1 \mp R_2}{L}\right) - arcsin\left(\frac{R_0 \mp R_2}{L}\right)\right) \quad (3.3)$$

де L – довжина між осями барабана моталки та відгинального ролика;

R_1 – радіус рулону;

R_2 – радіус відгинального ролика;

$R_б$ – радіус барабана моталки.

Зміна довжини $L_п$ пов'язана із змінами положення смуги та кутом охоплення відгинального ролика. Знак «-» у формулі (3.1) відповідає прямому способу намотування (рис.3.3, а). Знак «+» у формулі (3.3) відповідає зворотний спосіб намотування (рис. 3.3, б).

Значення жорсткості c_1 для ділянки розтягування за схемою навантаження 1 (рис.3.3, б) визначається за формулою:

$$c_1 = \frac{E \cdot B \cdot h}{L_п}, \quad (3.4)$$

де E – модуль пружності першого роду;

B – ширина смуги;

h – товщина смуги;

$L_п$ – довжина лінії, розрахована з урахуванням формули (3.3).

При навантаженні за схемою 2 (рис.3.3 б) смуга знаходиться в плоскому напруженому стані та підпорядковується узагальненому закону Гука.

Так як по довжині смуга відчуває зусилля, що розтягує T, а по товщині піддається стиску, то формула відносного подовження ε набуде вигляду:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_1 + \mu \cdot \sigma_2), \quad (3.5)$$

де E – модуль пружності першого роду;

μ – коефіцієнт Пуассона (сталь вуглецева μ ≈ 0,27);

σ_1 – напруга, що виникає у смузі вздовж довжини;

σ_2 – напруга, що у смузі вздовж товщини.

Значення еквівалентної жорсткості $c_{екв2}$ для ділянки розтягування по схемою навантаження 2 (рис.3.3 б) визначається за формулою:

$$c_{екв2} = \frac{E \cdot B \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (R + \mu \cdot h)}, \quad (3.6)$$

де B – ширина смуги;

h – товщина смуги;

R – радіус рулону.

При навантаженні за схемою 3 (рис. 3.3 б) рулон представляється анізотропним циліндром, що навантажений зовнішнім тиском. Радіальне переміщення у циліндрі u визначається залежністю:

$$u_{r=R} = \frac{p \cdot R \left((k - \mu) \cdot R^{2 \cdot k} + (k + \mu) \cdot {R_б}^{2 \cdot k} \right)}{E_1 \cdot \left(R^{2 \cdot k} - {R_б}^{2 \cdot k} \right)}, \quad (3.7)$$

де p – зовнішній тиск;

R – радіус рулону;

E_1 – модуль пружності барабана моталки;

$R_б$ – радіус барабана моталки;

μ – коефіцієнт Пуассона для матеріалу смуги;

$$k = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}, \tag{3.8}$$

де E2 – модуль пружності рулону в радіальному напрямку.

Знак «-» у формулі (3.7) перед дробом характеризує зменшення радіуса рулону під впливом зовнішнього тиску. При зміні радіуса рулону під дією зовнішнього тиску з'являється абсолютне подовження лінійної смуги ΔL:

$$\Delta L = 2 \cdot \pi \cdot u, \tag{3.9}$$

де u – радіальне переміщення в рулоні.

Значення еквівалентної жорсткості $c_{екв3}$ для ділянки розтягування по схемою навантаження 3 (рис.3.3 б) визначається за формулою:

$$c_{екв3} = \frac{E_1 \cdot B \cdot \left(R^{2 \cdot k} - {R_б}^{2 \cdot k}\right)}{2 \cdot \pi \cdot (k - \mu) \cdot R^{2 \cdot k} + (k + \mu) \cdot {R_б}^{2 \cdot k}}, \tag{3.10}$$

де B – ширина рулону;

R – радіус рулону;

E_1 – модуль пружності барабана моталки;

$R_б$ – радіус барабана моталки;

μ – коефіцієнт Пуассона для матеріалу смуги.

Подання рулону в якості товстостінного циліндра і викокористування формули (3.9) для розрахунку жорсткості можливе при виконі умови:

$$R \geq 1{,}105 \cdot R_б, \tag{3.11}$$

При намотуванні тонкої сталевої смуги (0,4...0,25 мм) на барабан моталки з радіусом $R_б$ = 0,25 м умова (3.11) виконується після 65 – 105 вітків, при цьому значення модуля пружності рулону E_2 перестає змінюватися, і коефіцієнт k, що характеризує нелінійні властивості рулону, згідно довідкової літератури можна прийняти k = 0,5, тоді формула (3.9) матиме вигляд:

$$c_{екв3} = \frac{E \cdot B \cdot (R - R_б)}{2 \cdot \pi \cdot (0{,}5 - \mu) \cdot R + (0{,}5 + \mu) \cdot R_б}, \qquad (3.12)$$

Формула для розрахунку сукупної жорсткості смуги та рулону (рис.3.3) набуде вигляду:

$$c_п = \frac{c_1 \cdot c_{екв2} \cdot c_{екв3}}{c_1 \cdot c_{екв2} + c_{екв2} \cdot c_{екв3} + c_1 \cdot c_{екв3}}, \qquad (3.13)$$

Підставивши формулу (3.13) вирази для c_1 – формулу (3.4), для $c_{екв2}$ – формулу (3.6), для $c_{екв3}$ – формулу (3.12), отримаємо математичну залежність сукупної жорсткості при зміні радіуса рулону:

$$c_п = \frac{E \cdot B \cdot h}{L_п + 2 \cdot \pi \left(R + (h - 1) \cdot \mu + \frac{R - R_б}{2 \cdot (R - R_б)} \right)}, \qquad (3.14)$$

де $L_п$ – довжина смуги, що розраховується за формулою (3.9).

Отримані залежності (3.13), (3.14) характеризують зміну сукупної жорсткості смуги і рулону при зміні радіуса і можуть бути основою для побудови спостерігачів автоматичних систем управління, що регулюють натяг смуги.

Врахування зміни жорсткості смуги та рулону дозволить автоматично налаштовувати регулятори системи управління. Це забезпечить стабільність

характеристик холоднокатаної сталі після прокатки незалежно від того, як змінюється діаметр рулону.

3.2 Принципи регулювання нагяту

Регулювання натягу необхідно для забезпечення необхідної якості і товщини матеріалу, якості змотування рулону, зниження числа обриву смуги.

Схема регулювання натягу наведена на рис. 3.4.

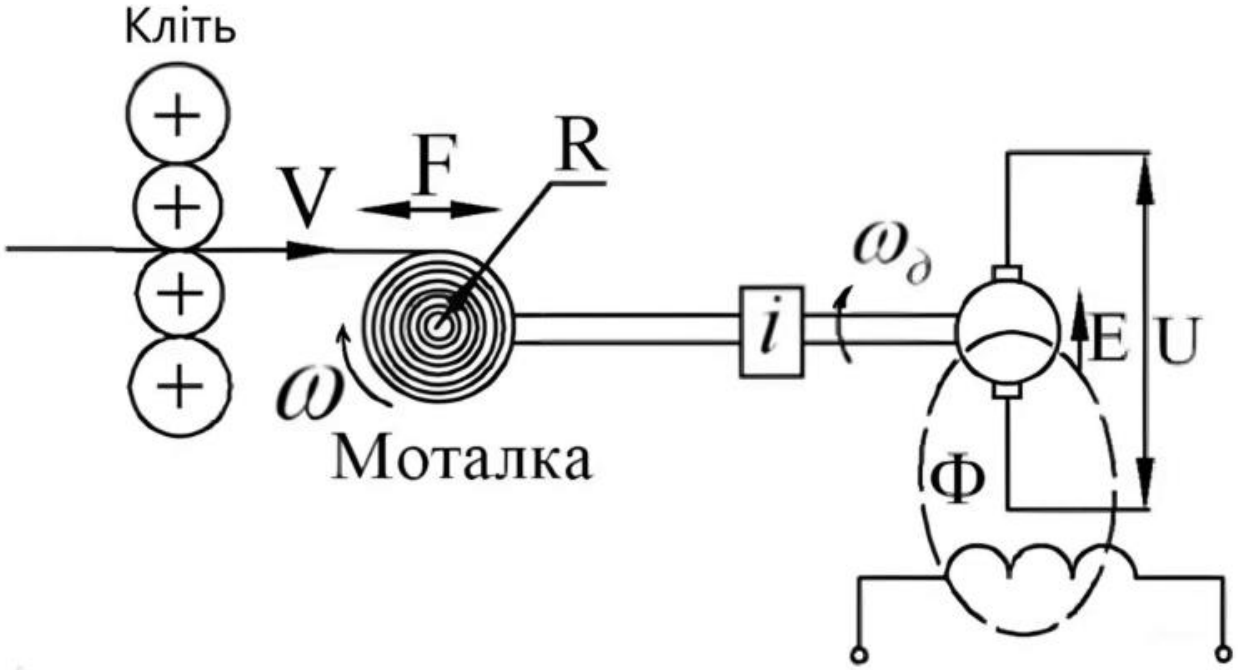


Рисунок 3.4 – Схема регулювання натягу

Системи керування електроприводів механізмів, для яких вимагається регулювання натягу, зазвичай мають два режими роботи:

– режим регулювання швидкості двигуна для заправлення смуги, транспортування її без натягу (допоміжний режим);

– режим регулювання натягу, який повинний забезпечити точну підтримку натягу 3 – 10 % (у деяких випадках – до 1 %), при діапазоні

регулювання натягу 1:10 і більше (основний режим роботи).

Принципово системи регулювання натягу можуть виконуватися як з безпосереднім виміром натягу, так і з виміром і регулюванням непрямих параметрів.

Система регулювання натягу з безпосереднім виміром натягу не одержали широкого поширення через труднощі створення надійних і точних датчиків натягу. Тому в більшості випадків використовується непрямі параметри, а сигнал вимірника натягу, якщо такий є, використовується для корекції системи. В якості електропривода згаданих механізмів використовується, зазвичай, електропривод постійного струму. Рівняння якірного кола двигуна постійного струму у сталому режимі (електромагнітні перехідні процеси закінчились) виглядає так:

$$U_a = E_{\text{дв}} + I_a R_a, \tag{3.14}$$

З (3.14) випливає рівняння для електромагнітної потужності:

$$U_{\text{а}} I_a = E_{\text{дв}} I_a + I_a^2 R_{\text{а}}, \tag{3.15}$$

Тут $U_a I_a$ – потужність, що отримується двигуном з мережі, $P_{\text{е м}} = E_{\text{д в}} I_a$ – електромагнітна потужність, $\Delta P_a = I_a^2 R_a$ – втрати потужності в обмотках якоря двигуна, $E_{\text{д в}} = C_e \Phi \omega_{\text{д в}}$ – ЕРС двигуна.

Електромагнітна потужність витрачається на валу двигуна та на втрати у сталі, механічні та додаткові втрати. Потужність на валу двигуна визначається через параметри лінійного руху барабана намотувально-розмотувального механізму:

$$P_{\text{в}} = \frac{P_{\text{вм}}}{\eta} = T \cdot \vartheta_n, \tag{3.16}$$

де T – лінійне зусилля на барабані;

ϑ_n – лінійна швидкість прокатки;

η – ККД двигуна.

Умовою якісної прокатки є сталість натягу у між клітьовому проміжку і на кінцях матеріалу, що прокатується. Для того, щоб лінійне зусилля натягу Т дорівнювало заданому, повинна виконуватися умова рівності лінійних швидкостей прокатки $\vartheta_п$ і рулону $\vartheta_р$. Кутова швидкість двигуна при цьому дорівнюватиме:

$$\omega_{дв} = \frac{\vartheta_р \cdot i_p}{R_p}, \qquad (3.17)$$

де i_p – передаточне число редуктора,

R_p – радіус рулону.

З формули (3.17) видно, що при заданому значенні ϑ_p діапазон регулювання швидкості двигуна дорівнює діапазону зміни радіусу рулону.

З урахуванням формул (3.14) – (3.17) і нехтуючи постійними втратами у двигуні можна отримати:

$$Т = \frac{С_е \cdot Ф \cdot I_a \cdot i_p}{R_p} \qquad (3.18)$$

З умови Т = const і формул (3.16) та (3.18) випливають наступні закони непрямого керування електроприводом намотувально-розмотувальних та натяжних механізмів:

- натяжні механізми ($R_р$ = const) – Ф = const , $I_а$ = const;
- моталки ($R_р$ = var) $P_в$ = const;
- моталки ($R_р$ = var) Ф = const, $I_а$ /$R_а$ = const;
- моталки ($R_р$ = var) $I_а$ = const, Ф/$R_р$ = const.

Системи регулювання натягу за законом Ф = const, I_a = const при $R_р$ = const називаються системами регулювання натягу і швидкості.

Регулювання натягу при $R_р$ = var забезпечуються системами регулю-вання потужності. Для регулювання натягу у таких системах згідно з фо-рмулою (3.15) необхідний датчик потужності на валу двигуна. Але, як видно з формули (3.14), прямим чином можна виділити тільки електромагнітну потужність шляхом заміру напруги та струму якоря двигуна. При цьому ККД із зміною струму якоря теж змінюється. Таким чином, для точного підтримування натягу слід вимірювати потужність на валу двигуна $Р_в$, що є достатньо складним процесом. Тому спосіб прямого вимірювання потужності тепер не використовується.

Системи з регулювання за законом Ф = const , I_a /R_a = const, або I_a = const, Ф/$R_р$ = const називаються системами однозонного регулювання натягу.

Якщо зміна кутової швидкості двигуна намотувально-розмотувального механізму від максимальної до номінальної виконується за законом I_a = const, Ф/$R_р$ = const, а нижче номінальної за законом Ф = const , I_a /R_a = const, то системи регулювання натягу, які забезпечують вказані закони, називаються системами двозонного регулювання натягу, або комбінованими.

3.3 Вибір режиму регулювання натягу

Транспортування смугового матеріалу забезпечується за допомогою натяжних барабанів (роликів), які мають постійний радіус натягування $R_р$ = const. Законом керування електроприводом натяжних механізмів є стабілізація потоку та струму якоря двигуна: Ф = const, I_a = const.

При цьому система керування електроприводом натяжних механізмів повинна працювати у двох режимах:

- режим регулювання швидкості;
- режим регулювання натягу.

У режимі регулювання швидкості, система керування електроприводом натяжних механізмів працює подібно до двоконтурної схеми з підпорядкованим налаштуванням параметрів. У режимі регулювання натягу, важливо розрізняти режими стабілізації натягу в двигуні та режими гальмування. Для забезпечення сталого потоку, потрібна відповідна система стабілізації струму збудження двигуна. Основним завданням є регулювання положення якоря у перехідних і сталих режимах.

При цьому повним сигналом завдання на струм повинний бути сигнал $I_{\Sigma 3}$, який враховує усі складові струму, що є функцією кутової швидкості двигуна, лінійної швидкості смуги, сумарного моменту системи електропривода і т. і. (у відповідності із складовими моменту на валу двигуна).

Для забезпечення стабілізації струму якоря у режимі двигуна необхідно, щоб контур швидкості був розімкнений. Тому завдання $I_{\Sigma 3}$, у режимі двигуна є рівнем натягу в електроприводі натяжних механізмів є стабілізація струму обмеження регулятора швидкості (рис. 3.5). В режимі двигуна завдання на швидкість на вході регулятора швидкості визначається сумою сигналів завдання, $U_{ωз}$ та $U_{об}$. Складова завдання на швидкість $U_{ωз}$ формується із декілька складових, які враховують деякі параметри швидкісного режиму прокатки (швидкість прокатки, необхідну силу натягу, розмір петлі та ін.).

Складова завдання $U_{об}$ називається завданням на швидкість обгону.

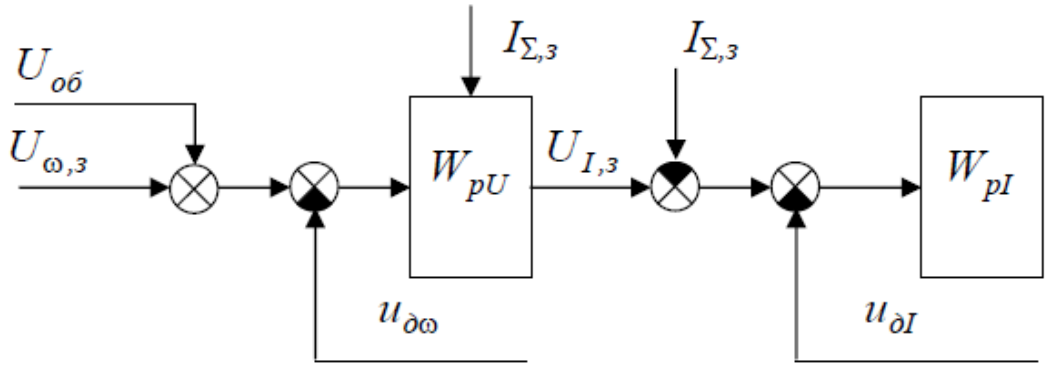


Рисунок 3.5 – Фрагмент системи регулювання швидкості і натягу натяжних механізмів

Вона уводить регулятор швидкості у режим насичення (рис. 3.6). Ця складова необхідна для обмеження швидкості смуги в умовах її обриву.

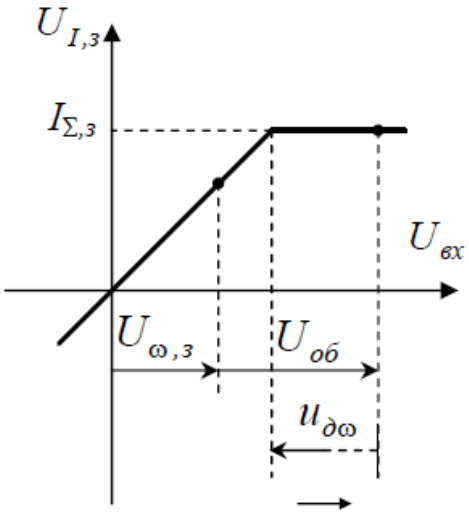


Рисунок 3.6 – Регульоване обмеження вихідного сигналу регулятора швидкості

Якщо в одному з режимів (двигуна або гальмування) виникне обрив смуги, то двигун, не маючи опору, почне розганятися. При цьому сигнал зворотного зв'язку із швидкості збільшується і виводить регулятор швидкості $U_{\delta\omega}$ з насичення (рис. 3.5). Перевищення швидкості обмежується величиною $\vartheta_{об}$.

У сигналах системи керування це обмеження має вигляд:

$$\left|U_{\omega,з} - u_{\delta\omega}\right| = U_{об} \qquad (3.19)$$

Якщо прийняти, що завданням на швидкість буде швидкість прокатки $\vartheta_{п}$, а сигналу зворотного зв'язку по швидкості відповідатиме лінійна швидкість двигуна $(R_p\omega_{дв})/i_p$, то матимемо лінійну швидкість обгону:

$$\left|\vartheta_{п} - \frac{R_p\omega_{дв}}{i_p}\right| = \vartheta_{об}. \qquad (3.20)$$

Величина швидкості обгону $\vartheta_{об}$ може бути постійною, або бути у залежності від швидкості прокатки, наприклад, $\vartheta_{об} = \alpha + \beta|\vartheta_n|$.

У режимі гальмування сигнал сумарного статичного струму подається безпосередньо на регулятор струму, забезпечуючи обмеження регулятора швидкості на рівні нуля. У цьому режимі натяжний механізм гальмує смугу, забезпечуючи необхідний натяг.

3.4 Існуюча система регулювання натягу

В прокатних цехах використовується однозонна система регулювання натягу при змінному потоку для намотувально-розмотувальних механізмів із змінним радіусом рулону ($R_р$ = var). Законом керування для такої системи електропривода є стабілізація струму якоря ($I_а$ = const) і співвідношення струму якоря до радіусу рулону $Ф/R_р$ = const.

Для забезпечення цих умов в системі регулювання елеприводом повинно бути два контури.

При збільшенні радіусу рулону збільшується момент опору двигуна і, тому, зменшується його кутова швидкість. Це призводить до відповідного зменшення сигналу зворотного зв'язку з ЕРС двигуна на регуляторах $W_{рe,1}$ і $W_{рe,2}$. У цей час регулятор $W_{рe,1}$ заведений у насичення сигналом швидкості обгону $\vartheta_{об}$. Тому контур регулювання ЕРС у якірному колі двигуна розімкнений.

На регуляторі $W_{рe,2}$ виконується порівняння сигналу завдання на лі-нійну швидкість прокатки $\vartheta_п$ й поточного сигналу зворотного зв'язку з ЕРС двигуна. Вихідний сигнал регулятора $W_{рe,2}$ є вхідним для контуру регулювання потоку. Контур реагує на збільшення сигналу розузгодження на вході регулятора $W_{рe,2}$ зміною потоку збудження двигуна у бік його підвищення. Таким чином, зниження кутової швидкості двигуна компенсується підвищенням його потоку

збудження й ЕРС стабілізується. Один контур забезпечує стабілізацію струму якоря, а інший – співвідношення між потоком і радіусом рулону (рис. 3.7). Умова Ф/ $R_р$ = const виконується шляхом стабілізації ЕРС двигуна.

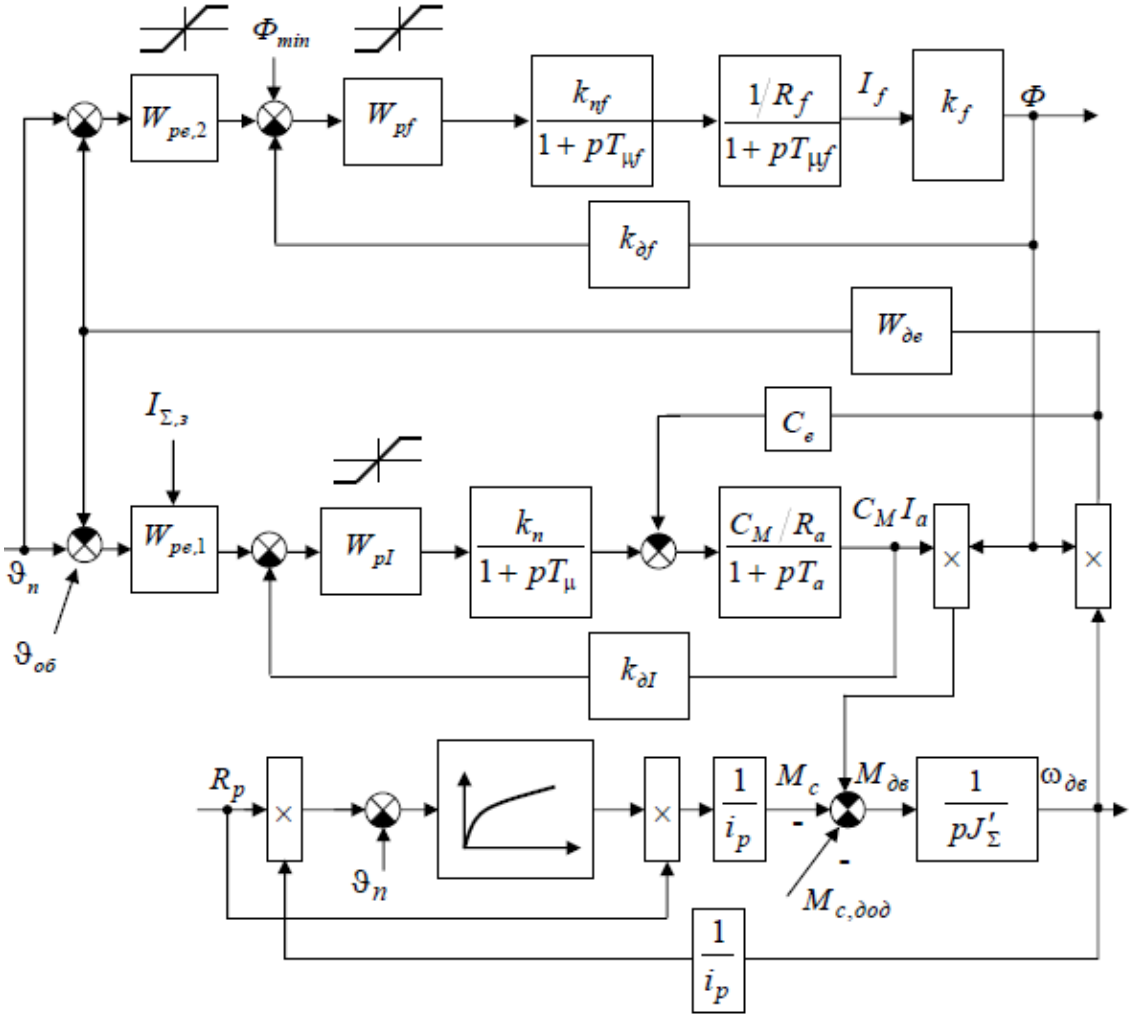


Рисунок 3.7 – Однозонна система регулювання натягу при $I_а$ = const, Ф/ $R_р$ = const

На рисунку 3.8 наведено діаграми регулювання потоку збудження і ЕРС двигуна у залежності від радіуса рулону.

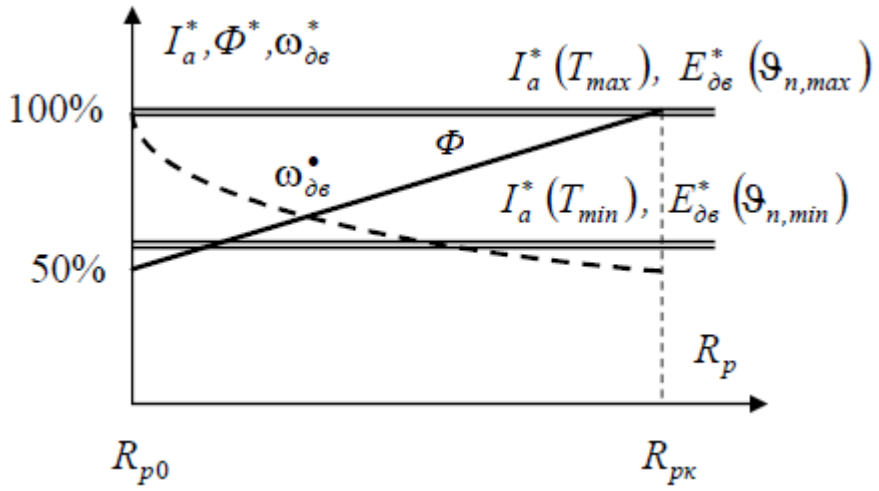


Рисунок 3.8 – Діаграми регулювання потоку збудження і ЕРС двигуна у залежності від радіуса рулону

У разі розриву смуги навантаження електропривода намотувально-розмотувального механізму миттєво впаде до навантаження неробочого ходу. Одночасно, за рахунок цього зростають кутова швидкість і ЕРС двигуна. Вони будуть зростати до рівня, визначеного сигналом швидкості обгону $\vartheta_{об}$. Після цього регулятор $W_{ре,1}$ вийде з насичення, контур регулювання ЕРС в якірному колі замикається й знижує струм якоря до струму неробочого режиму. Подальше зростання кутової швидкості (ЕРС) вище заданої закінчується, й починається її зменшення до заданого рівня швидкості прокатки. При цьому виникає короткочасний нестійкий режим, коли одночасно замкнуті обидва контури регулювання ЕРС. САР натягу повинна працювати у всіх режимах – розгону, гальмування та сталому, тому при обмеженні виходу регулятора $W_{ре,1}$ слід враховувати усі складові струму двигуна у вигляді сигналу обмеження $I_{\Sigma,З}$. Крім того, необхідно пам’ятати, що сигнал ЕРС формується за допомогою сигналів струму й напруги якоря.

Недоліком САР натягу при зміні потоку є те, що двигун увесь час працює із зниженим потоком і тому не використовується повністю за перевантажувальною здатністю (двигун повинен бути більшої потужності для забезпечення необхідного струму при зниженому потоці збудження).

3.5 Розробка двохзонної системи регулювання натягу

Щоб виправити недолік існуючої системи регулювання натягу, де весь діапазон швидкості електропривода контролюється шляхом зниження потоку, двозонна система регулювання дозволяє регулювати швидкість як за рахунок зміни потоку, так і за рахунок регулювання струму якоря двигуна.

Перша зона регулювання дає діапазон зміни кутової швидкості двигуна від максимальної до номінальної:

$$D_1 = \omega_{max}/\omega_н \tag{3.21}$$

Друга зона зміни кутової швидкості двигуна від номінальної до кінцевої (рулон з максимальним радіусом R_{pk}):

$$D_2 = \omega_н/\omega_к \tag{3.22}$$

У першій зоні забезпечується закон регулювання натягу I_a = const, $Ф/R_p$ = = const. При цьому потік регулюється в інтервалі $(0{,}45 – 1)Ф_н$. Кутова швидкість змінюється у гіперболічній залежності від радіусу рулону, а ЕРС двигуна є незмінною.

У другому діапазоні регулювання швидкості виконується закон регулювання натягу Ф = const , I_a /R_p = const. Потік у цій зоні не змінюється, зростає лінійно струм якоря, а ЕРС і кутова швидкість двигуна зменшуються гіперболічно при збільшенні радіусу рулону.

Двохзонна система регулювання натягу наведена на рисунку 3.9.

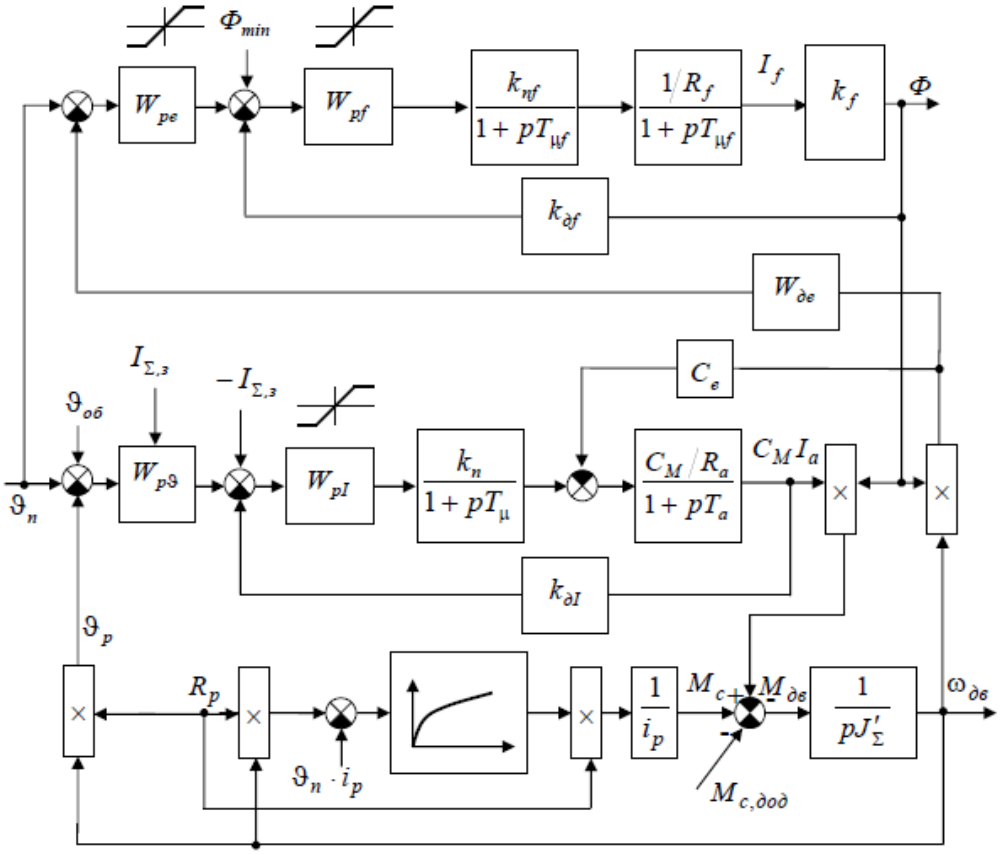


Рисунок 3.9 – Двохзонної системи регулювання натягу

Діаграми регулювання натягу у двохзонній системі показана на рис. 3.10.

Відміною рисою двохзонної системи регулювання натягу від однозонної за законом регулювання I_a = const, $Ф/R_р$ = const є те, що замість зовнішнього контуру регулювання ЕРС двигуна у двохзонній САР використовується контур регулювання лінійної швидкості рулону $ϑ_р$. Це пов’язане з тим, що у другій зоні двохзонної САР натягу ЕРС змінюється, а лінійна швидкість рулону підтримується в обох зонах на заданому рівні.

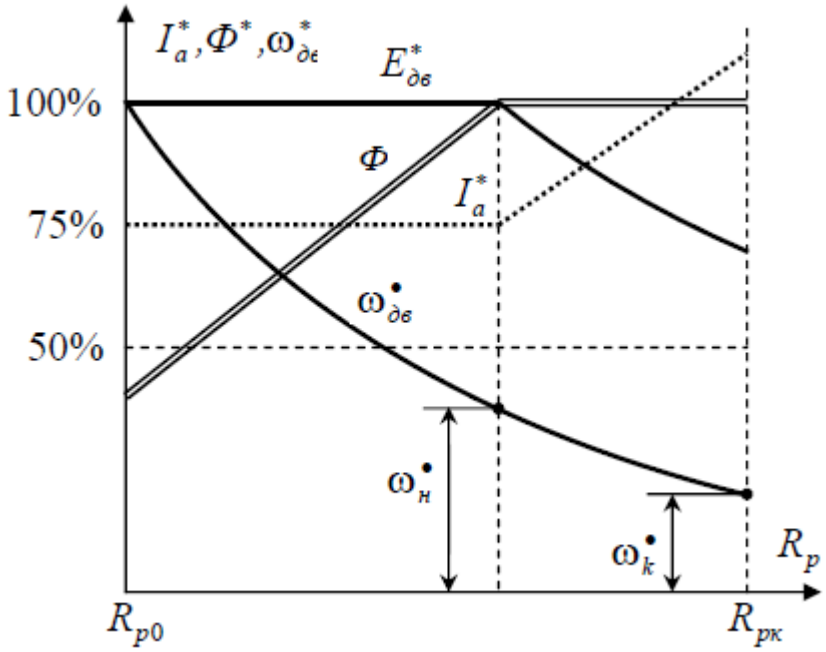


Рисунок 3.10 – Діаграми регулювання натягу у двохзонній САР

Умовою переходу з першої зони в другу є досягнення кутової швидкості двигуна номінального значення $\omega_н$.

У першій зоні регулятор лінійної швидкості рулону $W_{р\vartheta}$ знаходиться у насиченні за рахунок сигналу обгону $\vartheta_{об}$. Верхня границя насичення визначається величиною сигналу сумарного струму $I_{\Sigma,З}$. Регулятор вийде з насичення при обриві смуги, коли лінійна швидкість рулону перевищить швидкість прокатки на задану $\vartheta_{об}$ величину.

При подальшому зменшенні кутової швидкості двигуна, коли вона стає менше номінальної, САР переходить у другу зону регулювання. При цьому потік досягає свого номінального значення і більше не змінюється.

Далі, із зростанням радіусу рулону, збільшення моменту опору смуги призводить до зменшення ЕРС двигуна і, відповідно, до збільшення струму якоря.

3.6 Визначення структури регуляторів та розрахунок їх параметрів

На регулятор заводиться сигнал, пропорційний поточному значенню струму якоря. Зворотний зв’язок за струмом якоря призначений для збільшення швидкодії контуру струму шляхом компенсації відповідної електромагнітної сталої часу.

Налагодження регулятора струму виконується за формулою (3.23) на частоту зрізу:

$$\omega_{cI} = \frac{k_n(k_{\delta I} + k_{\delta e}\Phi_{\text{н}}{}^{\upsilon_n}/_{R_{po}})C_{\text{М}}}{\text{T}_l R_a}, \tag{3.23}$$

Сигнал ЕРС формується за допомогою сигналів струму й напруги якоря. Тому передавальна функція регулятора натягу буде:

$$W_{\delta\text{e}}(\text{p}) = \frac{k_{\delta\text{e}}}{1 + \text{pT}_\text{a}} \tag{3.24}$$

Стала часу T_a приводиться до некомпенсованої сталої контуру струму T_μ.

У двоконтурній системі регулювання потоку використовується пропорційно-інтегральна структура регулятора потоку:

$$W_{\text{p}f}(\text{p}) = \frac{1 + \text{pT}_2}{\text{pT}_1} \tag{3.25}$$

Передаточна функція розімкненого контуру потоку приймає вигляд:

$$W_f(p) = \frac{(1 + \text{pT}_2)}{\text{pT}_1} \cdot \frac{k_n k_f k_{\delta f}/R_{f\Sigma}}{(1 + pT_\mu)(1 + pT_{f\Sigma})} \tag{3.26}$$

Частота зрізу контуру в цьому випадку:

$$\omega_{cf} = A \cdot \frac{T_2}{T_1} \tag{3.27}$$

Якщо прийняти $T_2 = T_{f\Sigma}$ для компенсації великої сталої часу у контурі, то інший невідомий параметр регулятора визначиться як:

$$\mathrm{T}_1 = \frac{\mathrm{A} \cdot \mathrm{T}_{f\Sigma}}{\omega_{cf}} \tag{3.28}$$

Через суттєву нелінійність, якою є крива намагнічування двигуна, коефіцієнт k_f залежить від значення потоку Ф двигуна. Тому настроювання регулятора слід виконувати при мінімальному значенні потоку, тому що при цьому значенні потоку коефіцієнт k_f і частота зрізу є максимальними (початкова ланка кривої намагнічування). Збільшення потоку призводить до паралельного зміщення ЛАЧХ контуру вліво по вісі абсцис і збільшенні запасу за амплітудою при відповідному зменшенні швидкодії контуру.

У режимі регулювання натягу необхідно забезпечити:

– синхронізація по швидкості привода намотувально-розмотувальних механізмів й привода валків кліті стана;

– діапазон регулювання швидкості у режимі підтримання натягу не більше 1:50 (визначається добутком кратності швидкості прокатки 10 – 20 на кратність зміни діаметру рулону 1,5 – 4,0);

– діапазон регулювання натягу для різних станів 1:5 – 1:20, у деяких

– випадках 1:50;

– точність підтримання незмінності натягу у сталому режимі 3 – 12%;

– точність підтримання незмінності натягу у динамічному режимі 3 – 8%;

– час відпрацювання східчастого завдання натягу не більше 0,2 с з перерегулюванням не більше 10%;

– регульоване перевищення лінійної швидкості барабана над швидкістю смуги при заправці у межах 0 – 30%;

– обмеження перевищення швидкості барабану при обриві смуги на

– максимальній швидкості 5%, на заправній швидкості –15%, з подальшою зупинкою привода;

– точність підтримання натягу 3 – 5%;

– час відпрацювання поштовху завдання струму не більше 10 – 25 мс.

Висновки. В даному розділі розроблена математична модель об'єкта управління рівномірним намотуванням листа в рулони моталкою прокатного стану. Була обрана двохзонна система регулювання натягу.

4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1 Схема інформаційних і матеріальних потоків

Визначивши всі вхідні і вихідні сигнали мікропроцесорної системи управління, виконано проектне компонування контролера для розподіленої СУ , на основі розглянутих алгоритмів автоматичного регулювання товщини прокату на безперервному стані складено схему інформаційних потоків (рис. 3.1).

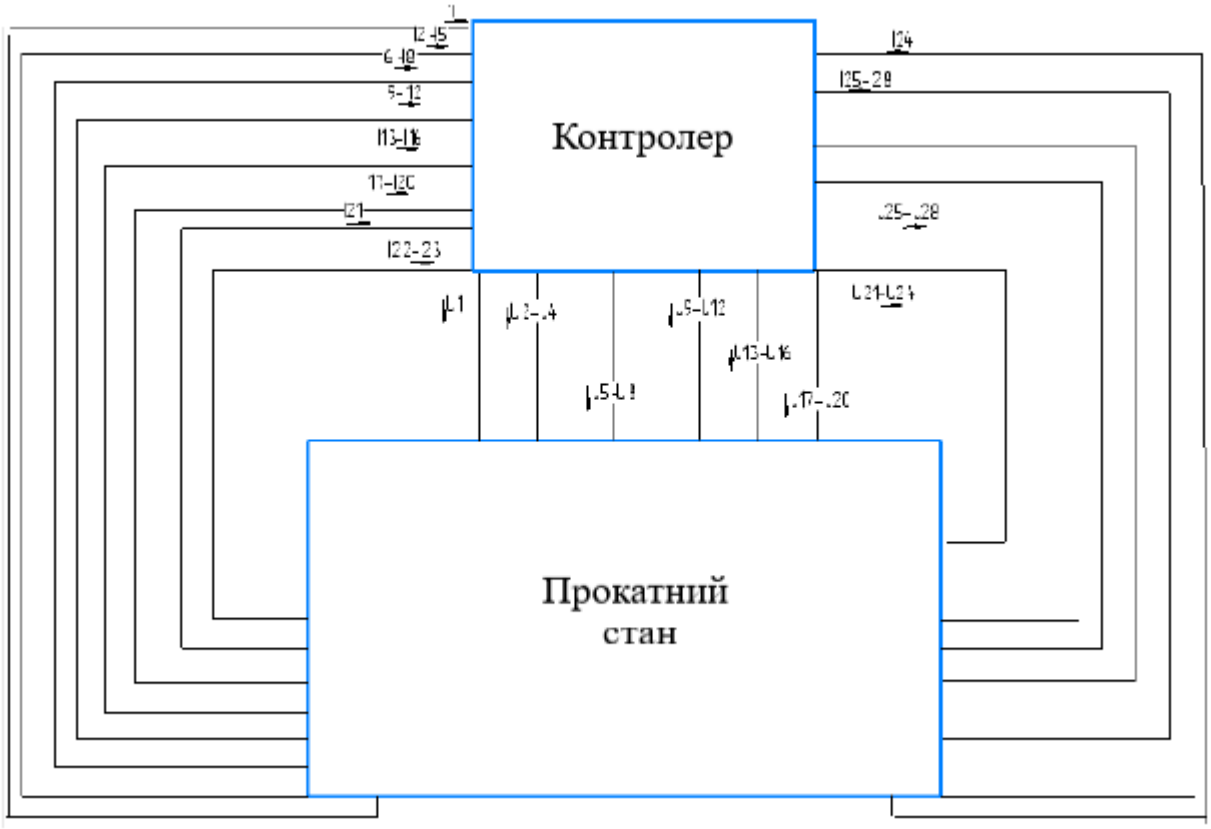


Рисунок 4.1 – Схема інформаційних і матеріальних потоків

Потоки інформаційних сигналів:

I1 – товщина підкату;

I2 – товщина прокату за 1 кліттю;

I3 – товщина прокату за 2 кліттю;

I4 – товщина прокату за 3 кліттю;

I5 – товщина прокату за 4 кліттю;

I6 – натягнення смуги між 1 і 2 клітями;

I7 – натягнення смуги між 2 і 3 клітями;

I8 – натягнення смуги між 3 і 4 клітями;

I9 – швидкість прокату 1 кліті;

I10 - швидкість прокату 2 кліті;

I11 - швидкість прокату 3 кліті;

I12 - швидкість прокату 4 кліті;

I13 – швидкість роботи валків 1 кліті;

I14 – швидкість роботи валків 2 кліті;

I15 – швидкість роботи валків 3 кліті;

I16 – швидкість роботи валків 4 кліті;

I17 – розмір зазору між натискними гвинтами (НГ) 1 кліті;

I18 – розмір зазору між натискними гвинтами 2 кліті;

I19 – розмір зазору між натискними гвинтами 3 кліті;

I20 – розмір зазору між натискними гвинтами 4 кліті;

I21 – тиск масла гідравлічної системи врівноваження валків;

I22 – I23 – витрата емульсії E1, E2;

I24 – сигнал про наявність зварного шва;

I25 – I28 – швидкість роботи натискних механізмів (НМ) 1, 2, 3, 4 клітей.

Потоки керувальних сигналів:

U1 – керування налаштуванням стану на потрібну товщину прокату;

U2 - U4 – регулювання сили натягу смуги між клітями 1 – 2, 2 – 3, 3-4;

U5 - U8 – регулювання швидкості НМ 1 - 4 клітей;

U9 - U12 – регулювання швидкості валків 1 – 4 клітей;

U13 – U16 - керуючий вплив на регулювання швидкості прокату 1 - 4 клітей;

U17 – 20 – регулювання зазору між НГ 1 - 4 клітей;

U21 – U 24 – регулювання тиску масла для врівноваження валків 1 - 4 клітей;

U 25 - U 28 – керуючий вплив на НМ (1 – 4 клітей) для пропуску зварного шва, або окалини.

Також за допомогою засобів ручного керування подаються наступні керуючі сигнали:

- регулювання витрати емульсії Е1;
- регулювання витрати емульсії Е2.

4.2 Структурна схема розробленої САР

Електропривод моталки повинен забезпечувати намотування смуги з постійним заданим натягом і при постійній швидкості смуги є електроприводом постійної потужності. Система мікропроцесорного управління реалізована на електроприводах розмотувача та моталки агрегату поздовжнього різання АПрР 1…6×1500.

Розроблена система автоматичного регулювання (САР) електроприводом моталки являє собою САР натягу смуги непрямої дії з використанням обчислення поточного значення радіуса рулону. У цій системі намотування смуги зі швидкістю електродвигуна нижче номінальної відбувається при постійному потоці збудження шляхом зміни напруги на якорі, а при швидкості електродвигуна вище номінальної – шляхом ослаблення потоку збудження при постійній напрузі на якорі. Таким чином, в процесі намотування відбувається двозонне регулювання швидкості електродвигуна із залежним управлінням потоком збудження.

Розроблена САР електроприводу моталки побудована на базі програмованої мікропроцесорної системи управління тиристорного перетворювача постійного струму (ТП) з використанням програмованого контролера загальної системи управління агрегату (ПК) серії.

Структурна схема САР електроприводу моталки наведено на рис. 4.2.

У режимі підтримки натягу (основний робочий режим намотки) система управління ТП являє собою одноконтурну САР якірного струму електродвигуна,

яка відпрацьовує завдання моменту, що надходить із ПК. ПК формує завдання повного моменту електродвигуна: статичну складову, як завдання натягу, помножене на поточне значення радіусу рулону плюс момент вигину смуги, і динамічну складову, що виникає при розгоні та гальмуванні агрегату.

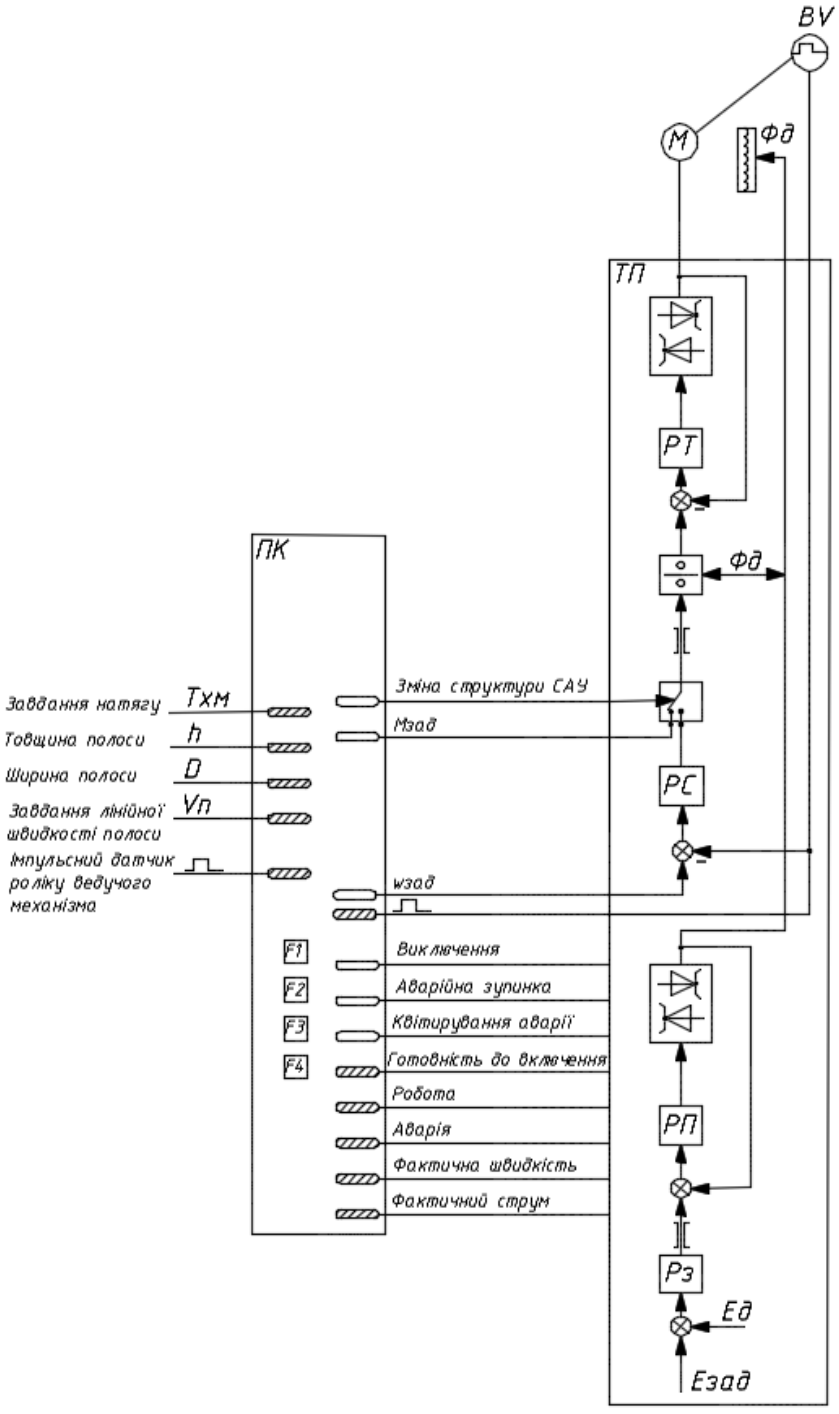


Рисунок 4.2 – Функції: F1 – обчислення статистичної складової моменту; F2 – обчислення динамічної складової моменту; F3 – обчислення радіусу рулону; F4 – контроль обриву полоси

У режимі поштовхів або при обриві смуги система управління ТП перетворюється на двоконтурну САР швидкості електродвигуна. Зі зворотним зв'язком від імпульсного датчика швидкості. В обох режимах комп'ютер формує завдання швидкості з урахуванням поточного значення радіуса рулону. Перетворення структури САР електроприводу моталки відбувається за командою ПК.

У ПК визначається момент виходу полоси з провідного механізму агрегату або обрив смуги перед моталкою шляхом порівняння заданої швидкості смуги та лінійної швидкості моталки.

Обчислення поточного значення радіусу рулону на моталці виробляється в ПК періодично по співвідношенню зростання кута повороту ролика провідного механізму ВР і кута повороту барабана з рулоном за час, протягом якого кут повороту барабана з рулоном збільшується на вибрану постійну величину.

Кути повороту вимірюються за допомогою імпульсних датчиків, встановлених на валах електродвигунів, та лічильників імпульсів у ПК.

Лічильник імпульсів, що вимірює кут повороту барабана з рулоном, працює в режимі періодичного рахунки. Щоразу, коли барабан з рулоном повертається на обрану постійну величину, лічильник після відліку відповідного цього кута повороту числа імпульсів Z_0 обнулюється, щоб почати рахунок спочатку.

Лічильник імпульсів, який вимірює кут повороту ролика провідного механізму, працює в режимі безперервного рахунку.

Щоразу, коли лічильник кута повороту барабана з рулоном обнулюється, показання цього лічильника запам'ятовується і обчислюється різниця між цим значенням – Zi та показанням лічильника в момент попереднього обнулення лічильника, пов'язаного з поворотом барабана з рулоном, Z_{i-1}.

Радіус рулону на моталці обчислюється як:

$$R_{\text{М}} = K \cdot \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_0}, \qquad (4.1)$$

де К – константа залежить від числа імпульсів на оборот імпульсних датчиків, передавальних чисел редукторів.

Обмін сигналами керування між програмованим контролером ПК та системою управління ТП здійснюється через мережу PROIBUS DP. Система керування електроприводу моталки є САР зі змінної структурою.

4.3 Функціональна схема системи частотного керування АД

Повноцінне частотне керування швидкістю АД виконується шляхом зміни частоти та амплітуди напруги статора. При частотному керуванні у бік зменшення від номінальної швидкості також необхідно зменшувати й модуль напруги за лінійним або за квадратичним законом (зазвичай для турбомеханізмів). Для частотного керування використовується перетворювач частоти (ПЧ). Найпоширенішими є ПЧ із ланкою постійного струму, в яких змінна напруга мережі за допомогою випрямляча перетворюється в пульсуючу, далі в ланці постійного струму за допомогою конденсаторного фільтра відбувається випрямлення пульсацій напруги, потім інвертор на шести силових ключах формує необхідну частоту і амплітуду середньої напруги з використанням широтноімпульсної модуляції. Таким чином в ПЧ із ланкою постійного струму відбувається подвійне перетворення енергії через що, такі пристрої керування мають нижчий ККД, меншу надійність та більшу вартість у порівнянні із ППП. Загальний вигляд функціональної схеми системи частотного керування АД показано на рис. 4.3.

Частотне керування забезпечує найкращі динамічні показники у порівнянні з іншими системами керування ЕП. Лінійний закон частотного керування забезпечує майже незмінний критичний момент двигуна. Квадратичний закон частотного керування є енергоефективним для вентеляторного навантаження. До недоліків такої системи можна віднести

високу вартість, так як середня ціна ПЧ у 1,5-2 рази перевищує ціну ППП та меншу надійність через наявність в пристрої керування великої кількості елементів, зокрема, в силовій частині.

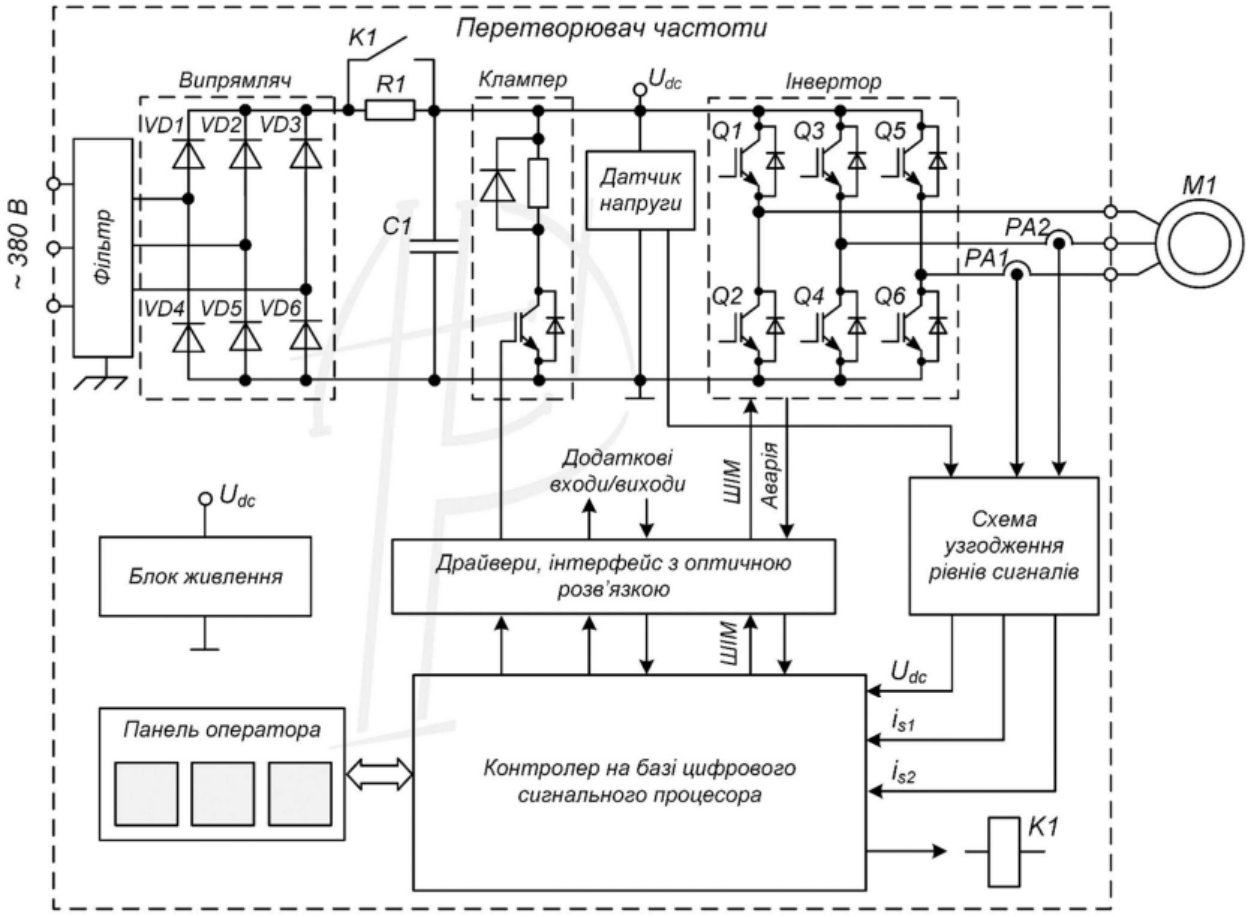


Рисунок 4.3 – Функціональна схема системи частотного керування АД

4.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ

Для реалізації спроєктованої двозонної системи автоматичного регулювання (САР) натягу сталевих листів необхідний сучасний комплекс програмно-технічних засобів.

Оскільки металургійне виробництво характеризується важкими умовами експлуатації (високі температури, пил, вібрація) та вимагає прецизійної швидкодії обробки даних (цикл програми в межах 1-2 мс) , вибір обладнання

здійснюється за критеріями промислової надійності, високої перевантажувальної здатності та підтримки сучасних протоколів зв’язку.

Комплекс технічних засобів САУ розподіляється на три ієрархічні рівні:

Нижній (виконавчий) рівень: частотно-регульовані електроприводи, тиристорні перетворювачі, первинні датчики технологічних параметрів та органи ручного керування.

Середній (контролерний) рівень: програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує основні математичні та алгоритмічні розрахунки.

Верхній (інформаційний) рівень: панель оператора (HMI) для візуалізації, діагностики та введення технологічних уставок.

1. Програмований логічний контролер (ПЛК) та модулі

Модель: Siemens Simatic S7-1500 (ЦП 1513-1 PN).

Технічні характеристики:

Робоча пам'ять: 300 КБ для програм, 1.5 МБ для даних.

Час виконання бітової операції: 40 нс.

Вбудований інтерфейс: PROFINET IRT (2-портовий комутатор) для забезпечення високошвидкісного обміну даними (цикл < 2 мс).

Підтримка обчислень із плаваючою комою (32 та 64 біт) для розрахунку жорсткості та радіуса рулону.

Модулі розширення (встановлюються на DIN-рейку разом із ЦП):

Модуль дискретних входів: DI 16x24VDC HF (для кнопок керування, кінцевих вимикачів).

Модуль дискретних виходів: DQ 16x24VDC/0.5A ST (для сигнальних ламп, реле).

Модуль аналогових входів: AI 8xU/I HS (високошвидкісний, 16 біт, для датчиків натягу).

Модуль аналогових виходів: AQ 4xU/I ST (16 біт, для завдання сигналів ТП).



Рисунок 4.4 – Промисловий контролер Siemens Simatic S7-1500.

2. Силові перетворювачі та приводи

2.1. Тиристорний перетворювач якірного кола двигуна моталки.

Модель: Siemens SINAMICS DCM (6RA8025-4DS22-0AA0) (або аналогічний під потужність вашого двигуна).



Рисунок 4.5 – Тиристорний перетворювач якірного кола двигуна моталки Siemens SINAMICS DCM

Технічні характеристики:

Номінальний вхідний струм: трифазний ~400 В.

Номінальний вихідний струм якоря: 60 А постійного струму.

Інтегрований 4-квадрантний режим (забезпечує реверс моменту і режим динамічного/рекуперативного гальмування при обриві смуги).

Вбудований мікропроцесорний блок САР струму та швидкості із завадостійким інтерфейсом PROFINET/PROFIBUS.

2.2. Перетворювач частоти допоміжних приводів (рольганг, тягальні ролики)

Модель: Schneider Electric Altivar Process ATV630 (ATV630D30N4).



Рисунок 4.6 – Перетворювач частоти допоміжних приводів Schneider Electric Altivar Process ATV630

Технічні характеристики:

Номінальна потужність: 30 кВт.

Напруга живлення: 380...480 В, 3 фази.

Режим керування: Векторне керування без датчика (FOC) з точністю підтримки швидкості до $\pm0,5\%$.

Вбудована функція безпечного зняття моменту STO (Safe Torque Off), SIL3.

Ступінь захисту: IP21/IP55.

3. Рівень людино-машинного інтерфейсу (HMI)

Модель: Siemens SIMATIC HMI TP900 Comfort (6AV2124-0JC01-0AX0).



Рисунок 4.7 – HMI Siemens SIMATIC HMI TP900 Comfort

Технічні характеристики:

Дисплей: 9-дюймовий широкоекранний TFT-екран, 16 млн кольорів.

Роздільна здатність: 800 x 480 пікселів.

Ступінь захисту передньої панелі: IP65 (повний захист від дрібнодисперсного металургійного пилу та бризок води).

Інтерфейси: Протокол PROFINET, архівація аварійних трендів на SD-карту, підтримка скриптів для розрахунку параметрів марок сталі.

4. Первинні датчики.

4.1. Імпульсний датчик кутового положення та швидкості (Енкодер)

Модель: Sick DRS61 (DRS61-A1R08192).

Технічні характеристики:

Тип: Інкрементальний оптичний енкодер.

Роздільна здатність: 8192 імпульсів на оберт (висока точність для інтеграційного розрахунку радіуса рулону за формулою 4.1).



Рисунок 4.8 – Інкрементальний оптичний енкодер Sick DRS61

Інтерфейс: TTL / RS-422.

Корпус: Масивний металевий, клас захисту IP67, висока вібростійкість (робота в умовах металургійних цехів).

5. Комутаційна та захисна апаратура (Шафа САУ)

5.1. Трьохполюсний автоматичний вимикач силового кола

Модель: Schneider Electric Compact NSX100F (LV429630).



Рисунок 4.9 – Трьохполюсний автоматичний вимикач силового кола Schneider Electric Compact NSX100F

Технічні характеристики: Номінальний струм 100 А, вимикальна здатність 36 кА при 380 В. Електронний розчеплювач Micrologic для захисту від КЗ і перевантажень.

5.2. Двополюсні вимикачі кола керування (24 В)

Модель: Schneider Electric Acti9 iC60N (A9F74206).

Технічні характеристики: Струм 6 А, характеристика відключення С (швидкодіючий захист ПЛК та внутрішніх реле).



Рисунок 4.10 – Двополюсні вимикачі кола керування
Schneider Electric Acti9 iC60N

4.5 Схема електрична принципова

На основі вибраних елементів силової частини та вимог до електропривода конвеєра, ми формуємо принципову електричну схему. Розроблена схема електрична принципова показана на рис. 4.11.

Принципова електрична схема включає наступні елементи. Трьохполюсний автоматичний вимикач QF1 використовується для захисту від коротких замикань (КЗ) та як тепловий захист в колі живлення ПЧ AA1 та ПЛК. Однополюсний автоматичний вимикач SF1 використовується в колі з постійною напругою 24 В. Цей вимикач призначений для захисту релейного виходу перетворювача напруги та елементів, підключених до цього виходу. Кнопки SB1

та SB2 – це кнопки з фіксацією, які використовуються для активації ППП в режимі розгону або гальмування.

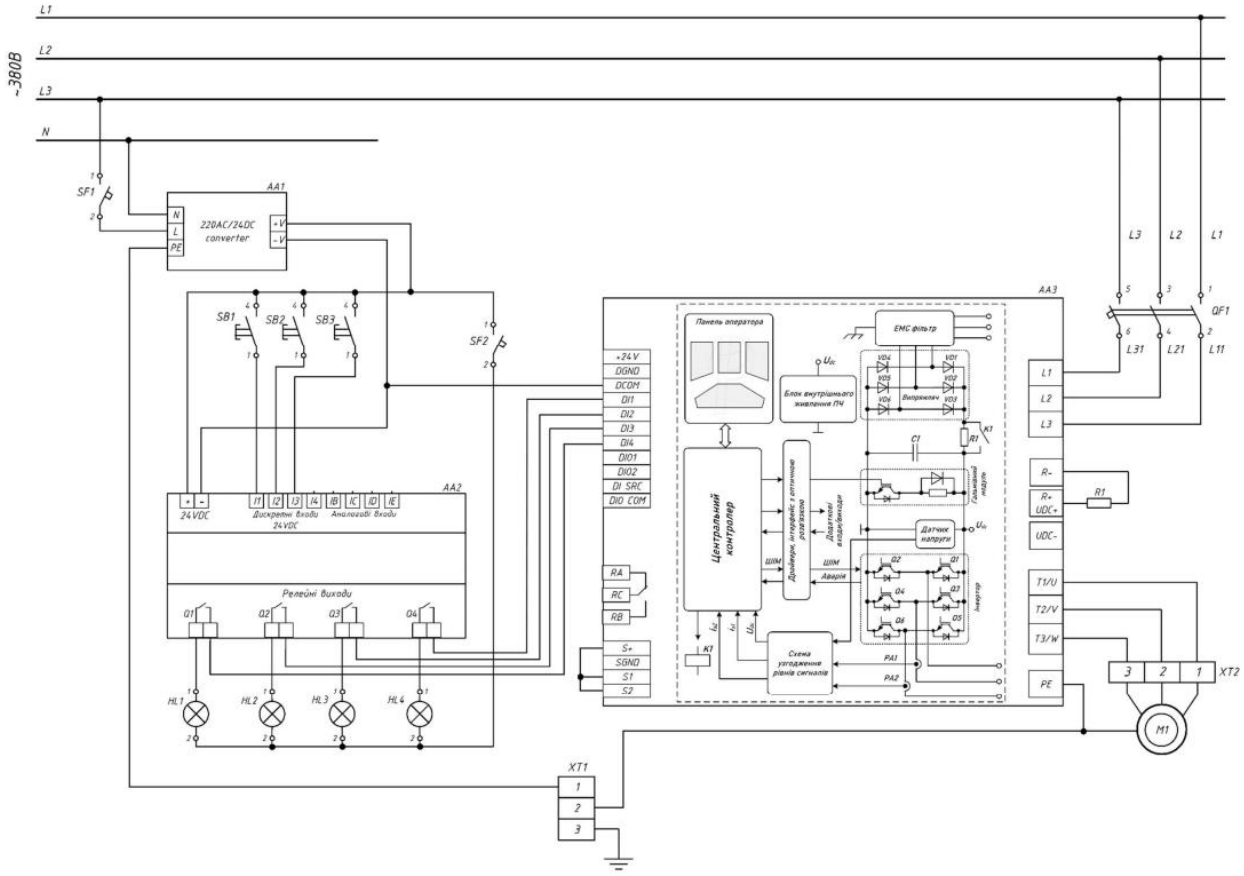


Рисунок 4.11 – Схема електрична принципова

Величину прискорення та сповільнення регулюється в ПЧ CHINT NVF2G-30/PS4 через інтерфейс користувача. Стан роботи сигналізують лампочки HL1, HL2, HL3, HL4. Кнопки SB1, SB2, SB3 використовуються для подачі сигналів керування на вхід програмованого логічного реле.

Для реалізації завдання керування ПЧ як програмованого логічного реле (ПЛР) ми вибрали програмоване логічне реле фірми Schneider Electric серії Zelio Logic SR2B121BD [19]. Обране логічне реле має 4 дискретних входи (I1, I2, I3, I4) та 4 релейні виходи, максимальний споживаний струм 100 мА та живиться постійною напругою 24 В. Напруга дискретних входів становить 24 В зі струмом 4 мА. Напруга дискретних входів, що відповідає логічній одиниці – 15 В,

напруга, що відповідає логічному нулю - 5 В. Максимальна напруга для релейних виходів складає для змінної 24-250 В, а для постійної – 5-30 В. Максимальний струм релейних виходів 8 А. Крім того, цей контролер має 4 аналогових входи (IB, IC, ID, IE) на 8 біт та має вбудований годинник.

Частота обчислення для дискретних 54 входів складає 1 кГц. Для програмування доступно 240 рядків програми на мові LD по 5 контактів в кожному рядку.

4.6 Схема електричних з’єднань

Таблицю з’єднань приведено в табл. 4.1.

Розроблена схема з’єднань представлена на рис. 4.12.

Таблиця 4.1 – Таблиця з’єднань

Познач. провід.	*Звідки йде*	*Куди приходить*	*Дані провідника*	*Примітка*
Кабель 1				
1	*=РЩ1-ХТ1:1*	*=А1-ХТ1:1*	*ВВГ 5х6*	
2	*=РЩ1-ХТ1:2*	*=А1-ХТ1:2*		
3	*=РЩ1-ХТ1:3*	*=А1-ХТ1:3*		
4	*=РЩ1-ХТ1:4*	*=А1-ХТ1:4*		
5	*=РЩ1-ХТ1:5*	*=А1-ХТ1:5*		
Кабель 2				
1	*=А1-ХТ4:1*	*=А4-ХТ1:1*	*ВВГ 3х2,5*	
2	*=А1-ХТ4:2*	*=А4-ХТ1:2*		
3	*=А1-ХТ4:3*	*=А4-ХТ1:3*		
Джгут 1				
1	*=А1-ХТ2:1*	*=А2-ХТ1:1*	*ПВ 5х0,5*	
2	*=А1-ХТ2:2*	*=А2-ХТ1:2*		
3	*=А1-ХТ2:3*	*=А2-ХТ1:3*		
4	*=А1-ХТ2:4*	*=А2-ХТ1:4*		
5	*=А1-ХТ2:5*	*=А2-ХТ1:5*		
Джгут 2				
1	*=А1-ХТ3:4*	*=А3-ХТ1:1*	*ПВ 2х0,5*	
2	*=А1-ХТ3:5*	*=А3-ХТ1:2*		

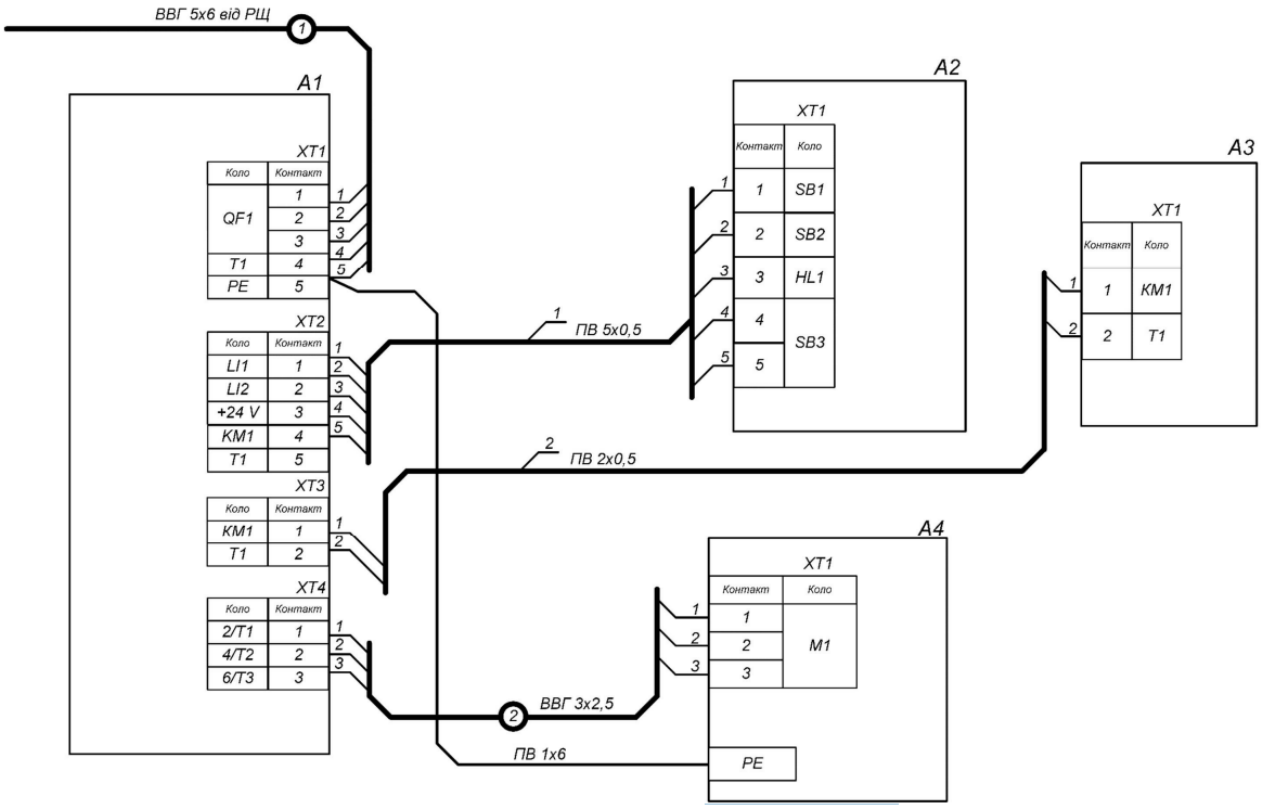


Рисунок 4.12 – Схема електричних з’єднань

5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА І ДОСЛІДЖЕННЯ САР

Вихідні дані обмотки збудження двигуна:

– сумарний активний опір обмотки збудження $R_{f\Sigma}$ =3,72 Ом;

– стала часу збудження обмотки двигуна T_f = 1,87 с;

– номінальний струм збудження $I_{fн}$ = 40 А;

– номінальний потік $Ф_н$ =0,142 Вб.

Вентильний перетворювач обмотки збудження: E_{d0} = 500 В.

Коефіцієнт передачі датчика потока $k_{дf}$ = 66,7 В/Вб.

Коефіцієнт пропорційності між струмом збудження і потоком на лінійному відрізку кривої намагнічування k_f =1,33.

Параметри ПІ-регулятора потоку при настроюванні контуру потоку на заданий оптимум.

Визначаємо сумарну сталу часу обмотки збудження двигуна, приймаючи $T_f = 0{,}1T_f$.

$$T_{f\Sigma} = T_f + T_{ff} = 1{,}87 + 0{,}1 \cdot 1{,}87 = 2{,}057 \text{ с.} \quad (5.1)$$

Отримуємо коефіцієнт підсилювання збуджувача:

$$k_n = \frac{E_{d0}}{10} = \frac{500}{10} = 50. \quad (5.2)$$

Вважаємо, що потік регулюється вниз до $0{,}5\,Ф_н$. Тому

$$k_f' = 0{,}5k_f = 0{,}5 \cdot 1{,}33 = 0{,}65. \quad (5.3)$$

Знаходимо

$$\mathrm{A} = \frac{k_n k'_f k_{\delta f}}{R_{f\Sigma} T_{f\Sigma}} = \frac{50 \cdot 0{,}65 \cdot 66{,}7}{3{,}72 \cdot 2{,}057} = 289{,}83. \qquad (5.4)$$

Задаємось

$$\omega_{cf} = \frac{1}{4T_\mu} = \frac{1}{4 \cdot 0{,}004} = 62{,}5\ \text{с}^{-1}. \qquad (5.5)$$

Знаходимо сумарну сталу часу обмотки збудження двигуна:

$$\mathrm{T}_1 = \frac{\mathrm{A} \cdot \mathrm{T}_{f\Sigma}}{\omega_{cf}} = \frac{289{,}83 \cdot 2{,}057}{62{,}5} = 2{,}25\ \text{с}. \qquad (5.6)$$

На рисунку 5.1 представлені механічні характеристики синхроного двигуна двохзонного регулювання швидкості обертання.

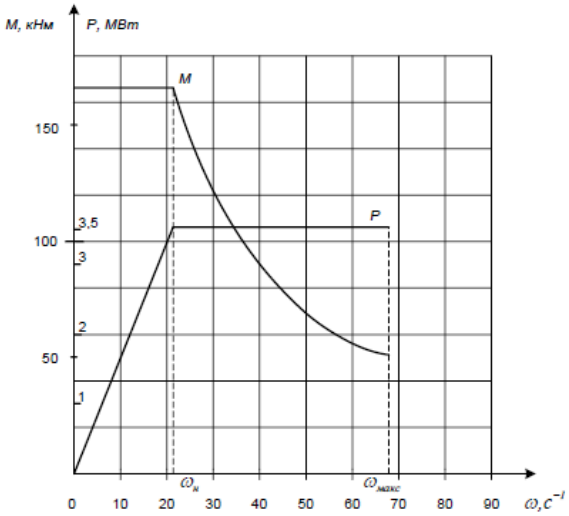


Рисунок 5.1 – Механічні характеристики синхроного двигуна двохзонного регулювання швидкості обертання

Перша зона регулювання кутової швидкості забезпечується шляхом стабілізації потоку на рівні номінального. При цьому регулятор ЕРС знаходиться у насичені, а контур ЕРС розімкнутий. Тому ЕРС двигуна зростає лінійно в залежності від швидкості.

У другій зоні регулятор ЕРС виходить із насичення, і контур ЕРС замикається. Потік двигуна починає змінюватися в залежності від вихідного сигналу регулятора ЕРС. Як видно з (рис. 5.2), контур ЕРС має не лінійність у вигляді блока множення на кутову швидкість двигуна. Тому для стабілізації динамічних характеристик у другій зоні регулювання вихід регулятора ЕРС необхідно ділити на сигнал, пропорційний кутовій швидкості двигуна, або множити на сигнал, пропорційний потоку. У цьому разі коефіцієнт підсилення контуру ЕРС буде стабілізований.

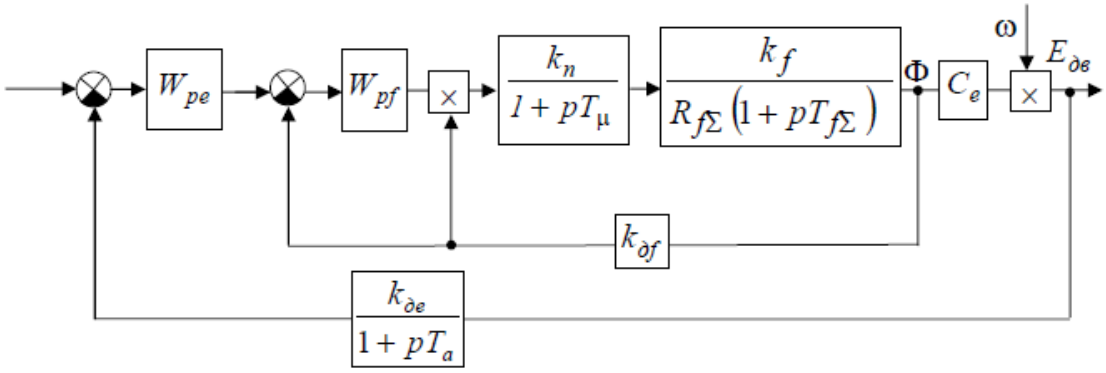


Рисунок 5.2 – Двоконтурна система регулювання потоку із корекцією сигналу регулятора ЕРС

Проаналізуємо скориговану систему за допомогою пакета MATLAB. Для цього зберемо скориговану систему в пакеті Simulink без негативного зворотного зв'язку.

Проведемо симуляцію та знімаємо частотні характеристики. Для реалізації в коді в MATLAB записуємо параметри системи у формі t_f:

$Y_1=t_f([160 \cdot 2,7 \cdot 1],[0,0041])$

$Y_2 = t_f([3,4 \cdot 11],[0,000484 ; 0,111])$

$K_{os}=t_f([0,0280],[0,161])$

$Y_k = feedback(Y_2,K_{os})$

$Y_3=t_f([0,01],[10])$

$Y_s = Y_1 \cdot Y_k \cdot Y_3$

figure; margin(Y_s)

Коригована система для частотних характеристик наведена на рисунку 5.3.

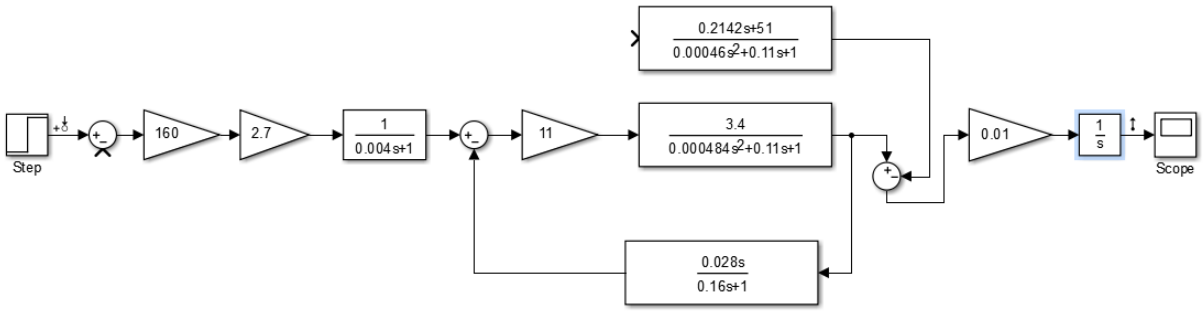


Рисунок 5.3 – Коригована система для частотних характеристик

Знаходимо частотні характеристики системи, що наведено рисунку 5.4.

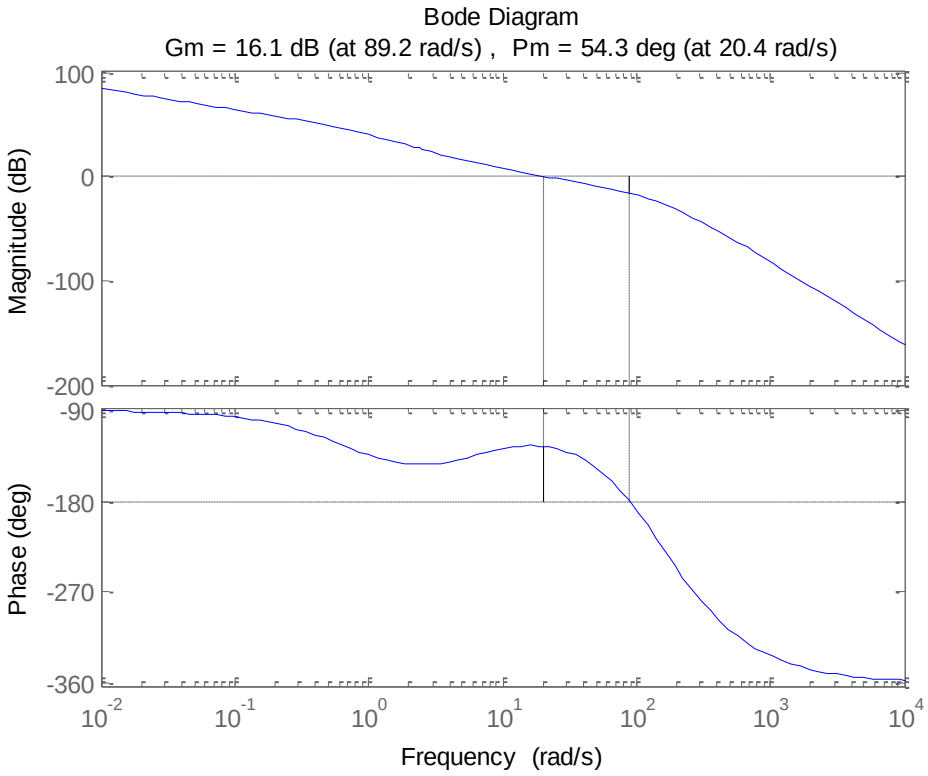


Рисунок 5.4 – Частотні характеристики скоректованої системи

Як видно з малюнка система має достатній запас стійкості по фазі $\Delta\varphi = 54{,}3°$.

Додамо негативний одиничний зворотний зв'язок до системи, що скоригується, і знімемо перехідну характеристику моделі (рис. 5.5).

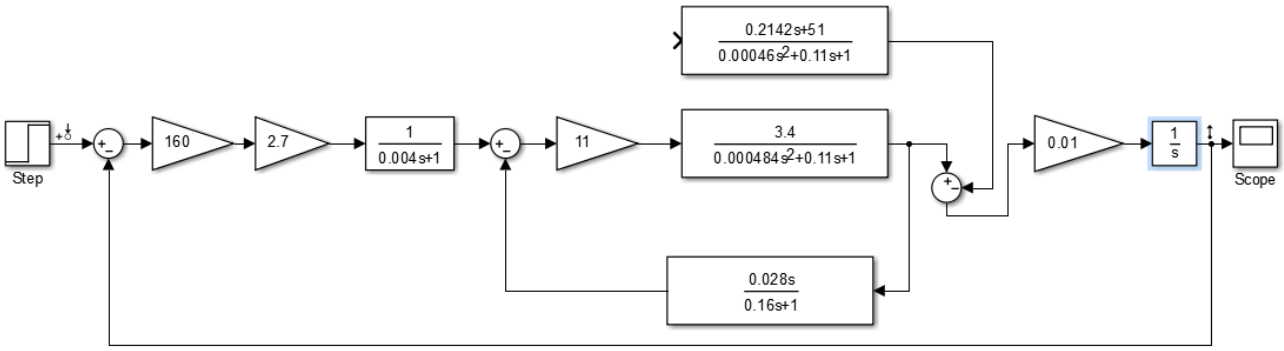


Рисунок 5.5 – Коригована система для перехідних характеристик

Проводимо симуляцію та знімаємо перехідні характеристики. Для реалізації у коді MATLAB у t_f формі додаємо негативний зворотний зв'язок до всієї системи та будуємо характеристику, наведену на малюнку 5.6.

```
Y = feedback (Ys,1)
figure; step (Y)
```

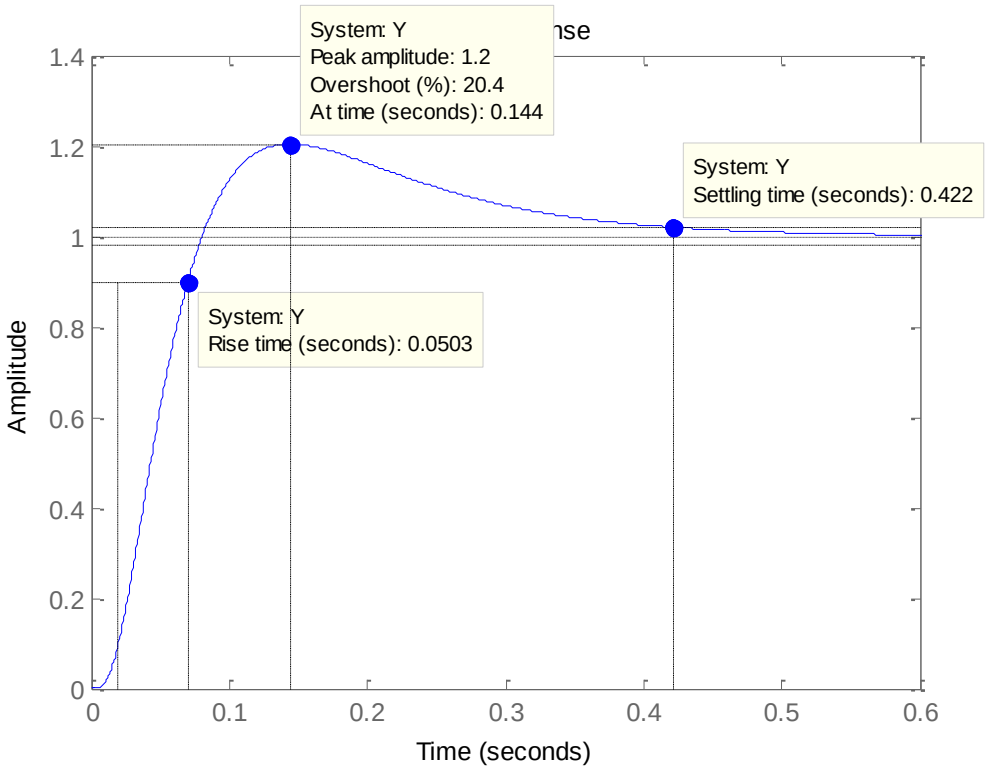


Рисунок 5.6 – Перехідна характеристика скоригованої системи

За даними перехідної характеристики з рисунку, перерегулювання в системі при $T_п$ = 0,144 = 20,4% < 30%, перерегулювання в скоригованій системі менше вихідних даних, яке задовольняє початковому параметру

Час перехідного процесу $T_{пп}$ = 0,422 < 0,5, що задовольняє початкову умову.

Час наростання перехідного процесу $T_н$ = 0,0503 с.

Висновки. З аналізу отриманих параметрів САР робимо висновок у тому, що система повністю задовольняє умовам забезпечення заданих вимог якості.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

6.1. Загальні заходи з охорони праці сталепрокатного цеху

При роботі на прокатному стані необхідно бути уважним до наступних потенційно небезпечних факторів:

– високий рівень шуму на робочому місці;

– вібрація;

– рухливі елементи транспортних засобів та пересування вантажів;

– матеріали, особливо в умовах обмеженого простору, наприклад, в тунелях або галереях;

– обертові частини приводних систем, натяжних установок та іншого обладнання;

– ризик ураження електричним струмом;

– запиленість та наявність шкідливих речовин у повітрі робочої зони та приміщень;

– недостатня освітленість.

Шкідливі фактори суттєво впливають на роботу людину, і можуть стати небезпечними, в залежності від рівня і тривалості впливу. При проектуванні, виготовленні. Монтажі, випробуваннях, експлуатації, ремонту необхідно зробити все, що б уникнути ризиків в слушну експлуатації. Тому приймаються відповідні заходи до безпеки експлуатації прокатного стану.

З небезпечними і шкідливими факторами існують такі способи боротьби:

1. Для захисту від шуму застосовуються такі методи:

– зменшення шуму в джерелі його виникнення;

– раціональні спрямованості з джерела шуму;

– раціональні планування будівлі;

– індивідуальні засоби захисту від шуму: беруші, навушники.

2. Для захисту від вібрації використовуються наступні методи:

– зменшення вібрації у джерела його виникнення;

– застосування динамічних систем погашення вібрації;

– застосовуються спеціальні фундаменти для вібронебезпечного обладнання;

3. Рухомі частини небезпечні травмами робочих пов'язаних з затягуванням спецодягу цими частинами, що рухаються. Тому робочім необхідно забезпечити справним спецодягом, і він повинен відповідати умовам роботи.

Для запобігання травм передбачені наступні заходи:

– для зниження ризику нещасного випадку обмежують доступність працівників до рухомих деталей механізмів, які захищають і закривають захисними кожухами і огорожами.

– огородження слід виготовляти з металевих листів, сітки та інших міцних матеріалів. Захисні огорожі табору повинні бути надійними, міцними, що відкриваються (на петлях, шарнірах) або знімними, виготовленими з окремих секцій. Для зручності обслуговування в огорожах повинні бути передбачені дверцята і кришки.

– у зоні можливого перебування людей повинні бути огороджені або захищені: приводні, натяжні і відхиляють барабани, ремінні та інші передачі, муфти і тому подібні, а також опорні ролики і ролики нижньої гілки стану.

– застосування пристрою для зупинки прокатного стану з будь-якого місця уздовж з боку проходу з використанням сигнального троса, натягнутого уздовж прокатного стану.

4. В якості загальних заходів щодо зниження небезпеки ураження електричним струмом може служити раціональний вибір режиму нейтралі трансформатора, обмеження величини напруги в мережі, застосування індивідуальну засобів захисту. Можливість ураження електричним током небезпечні опіками, судомами і летальним результатом.

5. Для запобігання ураження електричним струмом передбачені наступні заходи безпеки:

– усувають небезпеку дотику до струмоведучих частин шляхом монтажу їх на достатній висоті;

– передбачається блокування електрообладнання, перешкоджає від закривання кришки при наявності напруги на неізольованих деталях, які стають доступні після зняття кришки;

– використовують кабелі замість оголених проводів;

6. Для захисту від небезпеки дотику до струмоведучих частин, які знаходяться під напругою, застосовують такі заходи:

– встановлюють захисне заземлення;

– застосовують захисне відключення;

– забезпечують не струмоведучих частин електрообладнання ізоляційним покриттям;

У пульта управління повинні знаходитися гумові рукавчики.

Стан електроустаткування, ізоляції, заземлюючих пристроїв, захисту від витоку струмів, необхідно регулярно перевіряти.

Забороняється застосовувати мережі з глухо заземленою нейтраллю трансформаторів, за винятком трансформаторів, призначених для питання перетворювальних пристроїв контактних мереж електровозної відкатки.

Підключення інших споживачів і пристроїв до таких трансформаторів та харчування від таких мереж, крім випадків, передбачених правилами, забороняється.

«Вузлові точки» клітей і місця скупчення просипів повинні мати освітленість не менше 20 люкс. Місцеве освітлення повинно бути низьковольтною до 368 В. В необхідності користуватися переносною лампою.

7. Одним з широко поширених несприятливих факторів, що роблять негативний вплив на здоров'я працівників, є виробничій пил. Цілий ряд технологічних процесів супроводжується утворенням дрібно роздробленого частинок твердої речовини (пил), які потрапляють в повітря виробничих приміщень і більш-менш тривалий час знаходяться в ньому в підвішеному стані.

Для захисту працівників від пилу, їм безкоштовно видаються протипожежні-ліві респіратори, захисні окуляри, спеціальна Протипилова одяг. Засоби захисту органів дихання вибирають в залежності від виду шкідливих речовин, їх концентрації. Органи дихання захищають фільтруючими і ізолюючими приладами, наприклад, респіратором типу «Пелюстка».

При контакті з порошкоподібними матеріалами, несприятливо впливають на шкіру, використовують захисні пасти і мазі. Для захисту очей застосовують закриті або відкриті окуляри. Окуляри закритого типу з міцними безосколковим стеками використовують при механічній обробці металів.

У процесах, що супроводжуються утворенням дрібних і твердих часток і пилу, бризок металу, рекомендують окуляри закритого типу з боковинами або маски з екраном.

З спецодягу застосовуються пилозахисні комбінезони (жіночий та чоловічий) з шоломами для виконання робіт, пов'язаних з великим утворенням нетоксичного пилу, костюми (жіночий та чоловічий) з шоломами, а також скафандр автономний для захисту від пилу, газів і низької температури.

Для захисту від пожеж і накопичення зарядів статичної електрики, візки, футеровка барабанів і роликів, елементи очисних пристроїв, борті в навантажувальних і перевантажувальних пунктів і ін. Повинні бути виготовлені з негорючих, важко горючих або негорючих матеріалів з поверхневим електричним опором, не перевищує $8 \cdot 10^3$ Ом.

6.2 Організація пожежної безпеки

На прокатних станах необхідно встановлювати автоматичні системи пожежогасіння з водою для швидкої локалізації та гасіння пожеж. Вони повинні відповідати встановленим стандартам та технічним вимогам виробників. Розташування та кількість протипожежних пристроїв, водойм, засобів пожежогасіння, а також особливості прокладання пожежно-зрошувального

водопроводу визначаються спеціальними інструкціями щодо протипожежного захисту підприємств. Ці вимоги конкретизуються в проекті протипожежного захисту, який погоджується з Державною службою з надзвичайних ситуацій та затверджується у встановленому порядку.

У кожній приводній голівці прокатного стану розміщуються автоматичні установки водяного пожежогасіння, які працюють неперервно. На вентиляційних ділянках, де встановлено гідрофіцировані виїмкові комплекси, використовують переносні пожежогасники. Це забезпечує ефективний протипожежний захист прокатного стану та збільшує безпеку на виробництві.

На кожному прокатному стані також мають бути встановлені інші протипожежні заходи, такі як датчики виявлення пожежі, пожежні тривожні системи, автоматичні вимикачі електроживлення у разі виявлення загрози пожежі, а також вогнегасники для ручного застосування. Важливо також регулярно проводити навчання персоналу з евакуації та дій у випадку виникнення пожежі, а також забезпечити належне технічне обслуговування усіх систем протипожежного захисту. Такий комплексний підхід допоможе мінімізувати ризик виникнення пожеж та забезпечити безпеку праці на виробництві.

6.3 Охорона праці оператора АСУ ТП

На підставі аналізу функціонування поточного обладнання та відповідальностей оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом було розроблено заходи щодо забезпечення безпеки праці. Приміщення, де виконуються ці заходи та проводяться дослідження та розрахунки, є спеціально обладнаним приміщенням, оснащеним персональним комп'ютером з відеодисплейним терміналом.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні

стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, робоче місце оператора АСУТП приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ», обладнання має основну ізоляцію струмовідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки робоче місце оператора АСУТП за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають І групу з електробезпеки.

Можливість отримання травм у результаті механічного впливу може виникнути через неправильне розташування робочих місць, їх переповненість або через неуважність персоналу. Для уникнення таких травм, відповідно до Державних санітарних норм роботи з візуальними дисплейними терміналами, було здійснено оптимізацію розміщення робочих місць. Це включало збільшення відстані між ними, що відповідає встановленим нормам (не менше 6,0 $м^2$ площі на одне робоче місце та об'єм не менше 20,0 $м^3$). Крім того, підлога в приміщенні має бути рівною, неслизькою та обладнана антистатичними властивостями.

У зв’язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м’язових порушень робочі місця користувачів ПК оператора АСУТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для робочого місця оператора, обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислюваль-них машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

Робоче місце оператора АСУТП обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті

відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

– у холодний період року: температура 21 – 23°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

– у теплий період року: температура 22 – 24°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

6.4 Вимоги до персоналу АСУ ТП

Для забезпечення безпеки на промисловому підприємстві, включаючи сталепрокатне, важливо встановити політику та процедури, які гарантують, що користувачі інформаційної системи отримують необхідні навчальні матеріали перед отриманням доступу до системи. Навчання персоналу повинно бути систематичним і документованим. Для системи автоматизації технологічного процесу (АСУ ТП) це означає включення інформаційної безпеки, зокрема вивчення особливостей безпеки самої системи та вимог щодо неї. Також важливо ідентифікувати, документувати та навчати весь персонал, який має ключові ролі та відповідальність у сфері АСУ ТП. Це навчання повинно охоплювати всі аспекти фізичного процесу, який контролюється системою.

Крім вищевказаних заходів, важливо також регулярно переглядати та оновлювати політику та процедури безпеки інформаційної системи з урахуванням змін у загрозах та технологіях. Також рекомендується проводити

аудит безпеки, щоб виявити можливі слабкі місця і вжити відповідних заходів для їх вирішення.

Для забезпечення ефективної безпеки інформаційної системи, важливо також розглядати питання фізичної безпеки, доступу до приміщень з обладнанням, а також застосування методів ідентифікації та аутентифікації користувачів, наприклад, за допомогою карток доступу або біометричних систем.

Поміж іншого, персонал повинен регулярно проходити навчання з питань кібербезпеки та процедур дії в разі виявлення підозрілих або загрозливих ситуацій. Також необхідно мати чітко визначені процедури реагування на інциденти та план відновлення після кібератаки або випадку втрати даних.

Загальна усвідомленість з питань кібербезпеки та відповідальність кожного співробітника за дотримання встановлених процедур є важливими складовими успішної безпекової політики підприємства.

Усвідомлення безпеки є важливою частиною попередження інцидентів в АСУ ТП, особливо коли йдеться про загрози соціальної інженерії. Соціальна інженерія – це метод, який використовується для маніпулювання індивідуумами в наданні приватної інформації, наприклад, паролів. Ця інформація може бути використана для того, щоб скомпрометувати інші системи безпеки. Реалізація програми безпеки АСУ ТП може змінити спосіб доступу персоналу до комп'ютерних програм, додатків і самого робочого столу комп'ютера.

Організації повинні розробити ефективні навчальні програми та засоби комунікації, щоб допомогти співробітникам зрозуміти, чому потрібні нові методи доступу та контролю, ідеї, які вони можуть використовувати для зниження ризиків, та вплив на організацію, якщо методи контролю не включені. Програми навчання також демонструють прагнення керівництва до програми кібербезпеки та її цінність.

Висновки. В даному розділі подані рекомендації що до охорони праці праці сталепрокатного цеху і оператора АСУ ТП, що відповідають законодавству України.

7. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою даного проєкту є модернізація системи автоматичного регулювання натягу сталевих листів на ділянці змотування проката. Існуюча базова система керування за рахунок морального та фізичного зносу силових перетворювачів та релейно-контактної логіки не здатна забезпечити прецизійне двозонне регулювання швидкості та моменту при зміні радіуса рулону. Це призводить до:

– виникнення значних динамічних ударів і ривків смуги під час пуску/гальмування;

– підвищеного відсотка браку (перенатяг викликає звуження та обрив листа, а недонатяг – телескопічність рулону та дефекти змотування);

– частих аварійних зупинок агрегату, що знижує продуктивність усього прокатного стану.

Впровадження сучасної мікропроцесорної системи автоматизованого керування (САУ) на базі високошвидкісного промислового контролера та цифрових тиристорних перетворювачів дозволяє автоматично розраховувати поточний радіус рулону, здійснювати точну динамічну компенсацію моментів інерції та повністю ліквідувати ризики обриву сталевого листа.

Економічний ефект від реалізації проєкту досягається за рахунок:

1. Збільшення виходу придатного прокату (зменшення браку).
2. Підвищення продуктивності ділянки шляхом скорочення часу міжконтурних переходів та аварійних простоїв.
3. Зниження питомих витрат електроенергії завдяки оптимальному векторному та двозонному керуванню силовим електроприводом.

Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію.

Сукупні капітальні вкладення ($К_{\Sigma}$) у модернізацію та впровадження нової САУ визначаються за формулою:

$$К_{\Sigma} = К_{обл} + К_{монт} + К_{проект} + К_{налаг} \quad (7.1)$$

де:

$К_{об}$ – витрати на придбання основного технологічного, мікропроцесорного обладнання, датчиків та захисної апаратури;

$К_{монт}$ – витрати на монтажні роботи (приймаються в обсязі 15-20% від вартості обладнання);

$К_{проект}$ – витрати на проєктування та розробку програмного забезпечення для ПЛК та HMI-панелі (10% від вартості обладнання);

$К_{налаг}$ – пусконалагоджувальні роботи (10% від вартості обладнання).

Для оцінки капітальних витрат складається кошторис на придбання технічних засобів автоматизації.

Таблиця 7.1 – Кошторис витрат на придбання обладнання та матеріалів

Позначення	Найменування обладнання та елементів	Кіл., шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн
PLC	Промисловий контролер модульного типу (з модулями AI/AO, DI/DO)	1	42 000	42 000
ТП	Цифровий тиристорний перетворювач якірного кола	1	85 000	85 000
ТЗ	Реверсивний тиристорний збуджувач	1	35 000	35 000
ПЧ	Перетворювач частоти допоміжних приводів	1	28 000	28 000
HMI	Сенсорна графічна панель оператора (IP65)	1	22 000	22 000

BV	Інкрементальний оптичний енкодер вала	2	7 500	15 000
QF/SF	Комплект апаратури захисту та комутації (автомати, реле)	1	18 000	18 000
Кабельно-провідникова продукція та монтажні матеріали		1	14 000	14 000
РАЗОМ	Вартість обладнання та матеріалів ($К_{обл}$)	–	–	259 000

Проведемо повний розрахунок капітальних вкладень:

Витрати на монтажні роботи:

$$К_{монт} = 0{,}15 \cdot 259\,000 = 38\,850 \text{ грн.}$$

Витрати на проєктування:

$$К_{проект} = 0{,}10 \cdot 259000 = 25\,900 \text{ грн.}$$

Витрати на пусконалагодження:

$$К_{налаг} = 0{,}10 \cdot 259\,000 = 25\,900 \text{ грн.}$$

$$К_{\Sigma} = 259\,000 + 38\,850 + 25\,900 + 25\,900 = 349\,650 \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат та річної економії

Впровадження нової системи змінює річні експлуатаційні витрати підприємства. Економія формується за трьома основними статтями: зниження втрат від шлюбу (браку), зменшення витрат на ремонт старої релейної апаратури та економія електроенергії.

1. Економія від зниження браку сталевих листів.

За статистичними даними цеху, через нестабільний натяг і дефекти змотування рулонів обсяг відбракованого металу складав близько 0,8 % від загального річного обсягу виробництва ($V_{річ}$ = 50000 тонн). Після впровадження цифрової двозонної САР натягу відсоток браку зменшується до 0,2 %.

Зниження втрат металу складає:

$$\Delta V_{брак} = 50\,000 \cdot 0{,}006 = 300 \text{ тонн/рік}$$

При різниці між собівартістю виробництва та ціною реалізації брухту (чистий збиток на одній тонні) $\Delta C_{тонна}$ = 800 грн/т, річний економічний ефект у грошовому еквіваленті становить:

$$E_{брак} = 300 \cdot 800 = 240\,000 \text{ грн/рік}$$

2. Економія на експлуатаційних витратах та обслуговуванні.

Заміна застарілих елементів зменшує витрати на поточний ремонт контактів та обслуговування аналогових регуляторів. Оціночна річна економія на замінних компонентах та фонді оплати праці ремонтного персоналу складає

$$E_{обсл} = 35\,000 \text{ грн/рік.}$$

Загальна річна економія (розрахунковий прибуток від впровадження проекту) дорівнює:

$$E_{річ} = E_{брак} + E_{обсл} = 240\,000 + 35\,000 = 275\,000 \text{ грн/рік}$$

4. Розрахунок показників економічної ефективності проєкту

Для визначення фінансової доцільності проєкту розраховуються два

ключові показники: коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ($Е_к$) та строк окупності проекту ($Т_{ок}$).

Розрахунковий коефіцієнт ефективності капітальних вкладень:

$$Е_к = Е\ річ/К_\Sigma = 275\ 000/349\ 650 = 0,786$$

Отримане значення $Е_к = 0,786$ суттєво перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для металургійної галузі та промислової автоматизації ($Е_н = 0,15$), що свідчить про високу рентабельність проєкту.

$Т_{ок}$ (строк окупності капітальних вкладень):

$$Т_{ок} = 349\ 650/275\ 000 = 1,27 \text{ року.}$$

Таким чином, інвестовані кошти в модернізацію системи автоматичного регулювання натягу сталевих листів повністю окупляться за 1 рік і 3 місяці, що є чудовим показником для реального промислового сектору.

Висновок. Техніко-економічний аналіз розробленого проєкту автоматизації процесу регулювання намотування сталевих листів підтвердив його високу фінансову та виробничу ефективність. При капітальних інвестиціях у розмірі 349 650 грн, річний економічний ефект становить 275 000 грн. Проєкт характеризується швидким терміном окупності (1,27 року) та дозволяє не лише повернути вкладений капітал, а й значно покращити якість продукції та стабільність роботи ділянки змотування сталі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу щодо модернізації та автоматизації процесу двозонного регулювання намотування сталевих листів на ділянці моталки прокатного стану. За результатами виконаних досліджень, аналітичних розрахунків та комп'ютерного моделювання можна зробити такі висновки:

1. Проаналізовано стан автоматизації існуючого технологічного комплексу змотування металевої смуги. Виявлено, що базові системи на основі релейно-контактної логіки та зношених аналогових регуляторів не здатні забезпечити прецизійну точність підтримки натягу в умовах безперервної зміни радіуса рулону. Це призводило до появи дефектів (телескопічності рулонів, обривів смуги, звуження профілю) та підвищеного аварійного простою обладнання.

2. Обґрунтовано та розроблено математичну модель суміщеного процесу зміни радіуса рулону та формування натягу сталевого листа в системі «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму». Враховано нелінійні динамічні чинники, зокрема зміну сукупного моменту інерції механізму моталки в міру збільшення діаметра намотування, а також вплив пружності довгої смуги.

3. Синтезовано двозонну систему автоматичного регулювання (САР), яка базується на принципах підпорядкованого регулювання параметрів. Для першої зони (нижче номінальної швидкості) реалізовано алгоритм стабілізації натягу за рахунок регулювання струму якоря, а для другої зони (вище номінальної швидкості) — алгоритм ослаблення магнітного потоку збудження двигуна за умови підтримки сталої ЕРС.

4. Розроблено алгоритм адаптивного обчислення поточного радіуса рулону в реальному часі на основі інтегрування імпульсів від оптичного інкрементального енкодера. Це дозволило реалізувати динамічну компенсацію динамічних струмів під час перехідних процесів (прискорень та уповільнень стану) без використання дорогих і ненадійних у металургійному виробництві прямих датчиків натягу (месдоз).

5. Здійснено вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів автоматизації. Базову релейну систему замінено на сучасний високошвидкісний програмований логічний контролер (ПЛК) модульної архітектури, цифровий тиристорний перетворювач якірного кола та реверсивний збуджувач обмотки збудження двигуна. Проєктована архітектура охоплює три рівні (нижній, контролерний, верхній HMI-рівень) та інтегрована у єдину завадостійку мережу промислового стандарту (PROFINET).

6. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження розробленого проєкту. Розрахункові капітальні витрати на закупівлю обладнання, монтажні та пусконалагоджувальні роботи становлять 349650 грн. Очікуваний річний економічний ефект за рахунок зниження браку прокату на 0,6% та скорочення витрат на ремонти становить 275000 грн. Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень дорівнює 0,786, а розрахунковий термін окупності проєкту становить 1,27 року (1 рік і 3 місяці), що свідчить про високу доцільність інвестицій.

7. Оцінено заходи з промислової безпеки та екології. Розроблені рішення повністю задовольняють чинним нормам ПУЕ та ОП щодо заземлення металевих корпусів електрообладнання, захисту від струмів короткого замикання та забезпечення безпечних умов праці для обслуговуючого персоналу прокатного цеху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с.

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям. [Чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [Чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.06.2026).

22. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.06.2026).

23. Бондаренко С.М., Креславський О.І., Некрасова Л.В. Система мікропроцесорного управління електроприводом моталки агрегату обробки смуги. АТЗТ «Важпромавтоматика», Харків, 2019. 221 с.

24. Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука – 2020» : у 5 т. / Запорізький національний університет. – Запоріжжя : ЗНУ, 2020. – Т.5. 280 с.

25. Конспект лекцій з дисципліни «Конструкції технологічних агрегатів в процесах ОМТ. Частина 4. Обладнання прокатних та волочильних цехів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 136 – Металургія за освітньо-професійною програмою «Металургія» / Укладач В. М. Самохвал – Кам'янське, ДДТУ, 2019. 91 с.

26. Кустов К.І., Шершевер М.А. Автоматичне регулювання і регулятори.– М.: Металургія, 2007. 180 с.

27. Куваєв В.М., Розробка електрогідропривода укладальника моталки для процесу змотування сортового прокату / Куваєв В.М., Д.О. Бешта // Гірнича електромеханіка та автоматика – 2016. – №97. 56 с.

28. Куваєв В.М., Динамічна модель взаємодії механізмів ділянки кліть-моталка при змотуванні сортового прокату моталкою типу Гаррета / Куваєв В.М., Бешта Д.О. // *Науковий вісник НГУ:* Науково-технічний журнал. Дніпро – 2017 – № 4. 160 с.

29. Куваєв В.М., Аналітичні дослідження механізму зриву витків у процесі намотування прокату на барабан моталки / Куваєв В.М., Д.О. Бешта // Теория и практика металлургии – 2017. – №3-4. 111 с.

30. Кухар, В.В., Присяжний, А.Г., Балалаєва, О.Ю., Тузенко, О.А., Курпе, О.Г., Аніщенко, О.С., Кармазіна, І.В. Управління тепловим станом тонколистового прокату для підвищення рівномірності розподілу механічних властивостей, ПДТУ, Маріуполь. – 2018. 144 с.

31. Курпе О.В. Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей, ПГТУ, Маріуполь. – 2020. 534 с.

32. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

33. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково – графічної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Рівне, 2010. 31 с.

34. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Розрахунок ректифікаційної установки періодичної дії. Проектування насадкової колони.» з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III–IV курсів; уклад. В. М. Задорожній, В. І. Зражевський, С. О. Опарін. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2010. 38 с.

35. Методичні вказівки з розрахунку насадкової ректифікаційної колони періодичної дії з курсу «Основні процеси та апарати хімічної технології» для студентів IV–V курсів усіх спеціальностей і форм навчання ; уклад. П. Г. Сорока, В. В. Івашкевич, В. І. Зражевський. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2000. 25 с.

36. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему «Розрахунок ректифікаційної установки безперервної дії» проектування насадкової колони з курсу «Основні процеси та апарати хімічної технології» для студентів IV – V курсів усіх спеціальностей і форм навчання ; уклад. Т. П. Єльцова, Т. В. Гриднєва, П. В. Рябік. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2012. 46 с.

37. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: метод. вказівки до вик. курс. проекту для студ. спец. 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні

процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навчання ; уклад. К. С. Архангельська, О. Й. Рішан. Київ : НУХТ, 2005. 223 с.

38. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація так комп'ютерно-інтегровані технології» / ред. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

39. Мочалін В.Н., Кочнев Н.В. Моделювання та дослідження систем автотичних управління з використанням ПЕОМ: Учеб. посібник. – Череповець: ЧГІІ, 2005. 178 с.

40. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – К.: Основа, 2006. 448 с.

41. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: Метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: В.Г. Трегуб. – К.:НУХТ, 2008. 67 с.

42. Проектування систем керування : конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами»; уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький, Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

43. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.06.2026).

44. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

45. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту для студентів напряму

6.050202 «Автоматизація та комп’ютерно – інтегровані технології» денної та заочної форм навчання. Київ, 2013. 46 с.

46. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: Навч. посібник – К.: НМК ВО, 2015. 80 с.

47. Тимофеев Б. Б. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Справочник/ ред. Б. Б. Тимофеева. Киев : Техника, 1983. С. 87 – 88.

48. Kuzmenko M. Active controlsystemof mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill / M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta // Naukovyi Visnyk NHU – 2018 – № 5. – 167 p.