

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ  
КОНДРАТЮКА»**

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

УДК 537.31:621.771

**Дослідження та модернізація електропривода та  
тиристорного перетворювача багатоклітєвого  
прокатного стану**

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

Виконав студент групи 601 МЕ: Кирпота Роман Романович

Полтава 2022

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки.

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Дослідження та модернізація електропривода та тиристорного перетворювача багатоклітєвого прокатного стану»

Виконав: студент б курсу, групи 601-МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кирпота Р.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник Бороздин М.К.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2022 рік

Національний університет Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра: автоматики, електроніки та телекомунікацій

Освітньо-кваліфікаційний рівень «Магістр»

Спеціальність: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри автоматики**  
**електроніки та телекомунікацій**  
**О.В. Шефер**  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Кирпоті Роману Романовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи: «Дослідження та модернізація електропривода та тиристорного перетворювача багатоклітєвого прокатного стану»,

керівник магістерської роботи: Бороздін Микола Кирилович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання) затверджені наказом вищого навчального закладу від "12" 08 2022 року N 544 фа магістерської роботи:

07.12.2022р.3.Вихідні Вибір електропривода з параметрами: потужність двигуна 320 об/хв; максимальний момент 52 кНм; переважувальна здатність за струмом 1,5. Вибір тиристорного перетворювача з пар метрами: номінальний випрямлений струм 56 А; номінальна випрямлена напруга 220 В. Вибір трансформатора з параметрами: повна потужність трансформатора 1600 кВА; первинна напруга 10 кВ; вторинна напруга 0,562 кВ; напруга короткого замикання 7%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз процесу прокатки металу; стан автоматизації прокатного стану; технологічні дані; вимоги до електропривода розрахунок елементів тиристорного перетворювача; розрахунок постійних часу об'єкта регулювання; статичні механічні характеристики динамічні характеристики електропривода; модель технологічного навантаження; модель прокату кліті; модель петлеутворення; модель електропривода прокатної кліті й петлі; синтез системи керування система керування електроприводом.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- Розташування та призначення груп датчиків станів;
- Багатоклітєвий прокатний стан;
- Реальна навантажувальна діаграма механізму;
- Механічні характеристики;
- Графіки зміни швидкості й моменту під час захоплення та викиду заготівлі;
- Модель технологічного навантаження і графік зміни моменту прокатки в часі;
- Модель прокатної кліті;

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналітична частина. Аналіз процесу прокатки металу; технологічні дані; аналіз діючого обладнання й ДПС; вимоги до ЕП; постановка задачі.	15% (13.09.2022)	Пл.1
2.	Розрахунково-конструкторська частина. Вибір електродвигуна, розрахунок постійних часу об'єкта регулювання; статичні механічні характеристики. Розрахунок елементів тиристорного перетворювача.	30% (10.10.2022)	Пл.2,3
3.	Дослідницька частина. Розрахунок регулятора струму якоря в режимі безперервного струму. Подача навантаження, скидання навантаження. Моделі технологічного навантаження.	50% (24.10.2022)	Пл.4,5
4.	Мова програмування для цифрової системи керування.	70% (08.11.2022)	Пл.6,7
5.	Чистове оформлення пояснювальної записки, креслень, презентацій, збір підписів.	100% (07.12.2022)	Пл. 8,9

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Кирпота Р.Р** \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Бороздін М.К** \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	6
Вступ.....	7
1. Аналітична частина.....	11
1.1. Аналіз процесу прокатки металу.....	11
1.2. Стан автоматизації прокатного стану .....	16
1.3. Постановка задачі.....	22
1.4. Висновки за розділ.....	23
2. Розрахунково-конструкторська частина.....	25
2.1. Вибір електродвигуна.....	25
2.1.1. Розрахунок моменту прокатки.....	25
2.1.2. Розрахунок потужності двигуна .....	28
2.1.3. Перевірка двигуна на нагрівання .....	31
2.2. Розрахунок елементів тиристорного перетворювача .....	33
2.3. Розрахунок постійних часу об'єкта регулювання .....	36
2.4. Статичні механічні характеристики.....	42
2.4.1. Природна характеристика .....	42
2.5. Висновки за розділом .....	44
3. Дослідницька частина.....	46
3.1. Динамічні характеристики електропривода.....	46
3.1.1. Електромеханічні перехідні процеси електропривода.....	46
3.1.2. Подача навантаження (захоплення заготівлі) .....	47
3.1.3. Скидання навантаження (викид заготівлі) .....	49
3.2. Модель технологічного навантаження .....	50

3.3. Модель прокатки кліті .....	52
3.4. Модель петлеутворення.....	62
3.5. Модель електропривода прокатної кліті й петлі .....	65
3.6. Синтез системи керування .....	68
3.6.1. Розрахунок регулятора струму якоря в режимі безперервного струму .....	68
3.6.2. Розрахунок регулятора струму в зоні переривчастого струму .	70
3.6.3. Розрахунок відносної похибки регулювання, перерегулювання і похідної струму .....	71
3.6.4. Розрахунок параметрів регулятора швидкості.....	76
3.6.5. Розрахунок параметрів регулятора струму збудження.....	80
3.6.6. Розрахунок параметрів регулятора електрорушійної сили .....	82
3.7. Висновки .....	83
3.8. Список використаних джерел .....	85
3.9. Додатки.....	86

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ТП – тиристорний перетворювач;
- ПС – прокатний стан;
- ЕО – електрообладнання;
- АУ – автоматичне управління;
- САУ – система автоматичного управління;
- ПУЕ – правила улаштування електроустановок;
- ПІ – пропорційно-інтегральний (регулятор);
- ЕРС – електрорушійна сила;
- ЕП – електропривод;
- КОМ – керуюча обчислювальна машина.

## ВСТУП

**Актуальність теми:** Подолання кризових явищ в економіці України супроводжуються обмеженням енергетичних і матеріальних ресурсів, збільшенням кількості споживання енергії, ускладненням вимог технологічних процесів, у зв'язку з цим виникла необхідність більш повного врахування взаємодії ЕП з приводними механізмами, які містять пружні зв'язки. На сьогодні найбільш перспективним і раціональним способом є електротехнічний, так як він простий у здійсненні, легко може використовуватися для автоматизації будь якої електромеханічної системи.

**Мета і задачі дослідження:** У результаті аналізу стан автоматизації даного виробництва видно, що доцільно було б оптимізувати процес модернізації тиристорного перетворювача у системі автоматизованого ЕП. Тому для виконання цього, у ході виконання магістерської роботи необхідно вирішити такі задачі: сформулювати вимоги до ЕП, обґрунтувати та вибрати модель прокатної кліти.

Прокатний стан – машина для обробки тиском металу та інших матеріалів між обертовими валками, тобто для здійснення процесу прокатки [12]. У більш широкому значенні, ПС – це автоматична система або лінія машин (агрегат), що виконує не лише прокатку, але й допоміжні операції: транспортування вихідної заготовки зі складу до нагрівних печей та до валків стану, передачу прокатного матеріалу від одного калібру до іншого, кантівку, транспортування металу після прокатки, різку на частини, маркування, правку, упаковку, передачу на склад готової продукції тощо.

Головна ознака, що відрізняє прокатний стан – це його призначення в залежності від сортименту продукції або виконуваного технологічного процесу. По сортименту продукції ПС поділяють на заготівкові, у тому числі стани для прокатки слябів та блюмів, листові й смугові, сортові, у тому числі балочні та дровові, трубопрокатні й деталепрокатні (бандажі, колеса, осі) тощо. З точки

зору технологічного процесу ПС поділяють на ливарно – прокатні (агрегати), обтискні(для обтискування злитків), у тому числі слябів та блюмів, реверсивні одноклітеві, тандеми, багатоклітеві, безперервні, холодної прокатки. Розмір ПС, призначеного для прокатки листів та смуг, характеризується довжиною бочки валків, для заготівлі або сортового металу – діаметром валків, а трубопрокатного стану – зовнішнім діаметром прокатуваних труб.

Обладнання ПС, що служить для деформації металу між валками, що обертаються, зветься основним, а для виконання інших операцій – допоміжним. Основне обладнання складається з однієї або декількох головних ліній, у кожній з яких розташовується три види пристроїв: робочі кліті (одна або декілька) – до них відносяться прокатні валки з підшипниками, станини, настановні механізми, плитовина, проводки, електродвигуни для оберту валків, передатні пристрої від електродвигунів до прокатних станів, що складаються, головним чином, із шестерної кліті, шпинделів та муфт. Між шестерною кліттю й електродвигуном часто встановлюють ще й редуктор. Якщо кожний валок має свій електродвигун, передатні пристрої складаються лише з шпинделів. Найбільше розповсюдження отримали стани з горизонтальними валками: двовалкові, трьохвалкові, чотирьохвалкові та багато валкові.

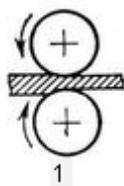


Рис. 1. Схема розташування валків в робочій кліті двовалкового ПС.

Кліть є основним технологічним обладнанням прокатного стану, що здійснює деформацію металу у валках в режимах: нереверсивного (прохід металу тільки в одному напрямку) або реверсивному (прокатуваний метал проходить між валками кілька разів).

Кліті класифікують за кількістю і розташуванням валків, режимом роботи. За кількістю валків кліті прокатних станів поділяються на дво-, три-, чотири- і багатовалкові (рис. 2).

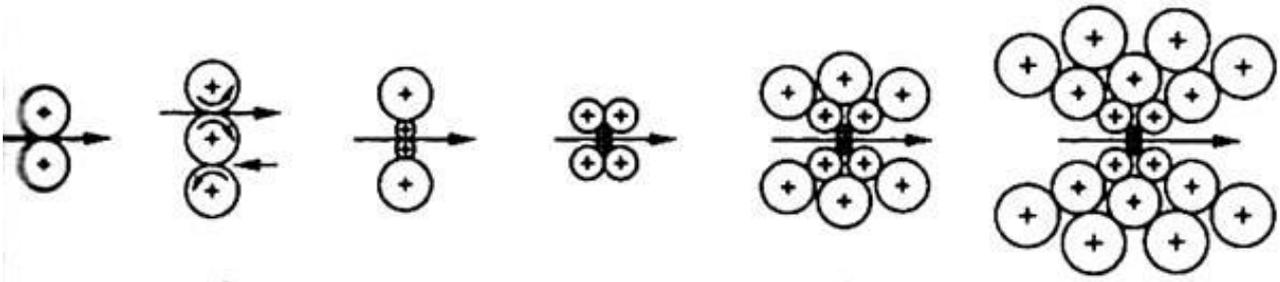


Рис. 2. Види багатовалкових клітей

Для обтискування металу по боковим поверхням використовують кліті з вертикальними валками, що отримали назву еджерів. Стани, у яких поблизу горизонтальних валків розташовані вертикальні, зветься універсальними. Вони служать для прокатки широких смуг та двотаврових балок з широкими полками. В станах гвинтової прокатки валки розташовані в робочій кліті косо – під кутом подачі. Такі стани використовують для прокатки труб, осей, шарів тощо.

Найбільш досконалий багатоклітевий стан – безперервний, у якому метал одночасно прокатується в декількох клітях. Безперервні стани служать для гарячої прокатки заготівлі, смуг, сортового металу, дроту, труб, а також для холодної прокатки листів, жерсті, стрічки та інших профілів.

Багатоклітевий безперервний прокатний стан двох або більше клітей, розташованих таким чином, щоб метал, що пройшов через одну кліть прямолінійно переходив в іншу. При безперервній прокатці різні кліті синхронізовані таким чином, щоб смуга могла прокочуватися у всіх клітях одночасно. На відміну від стану з однією кліттю.

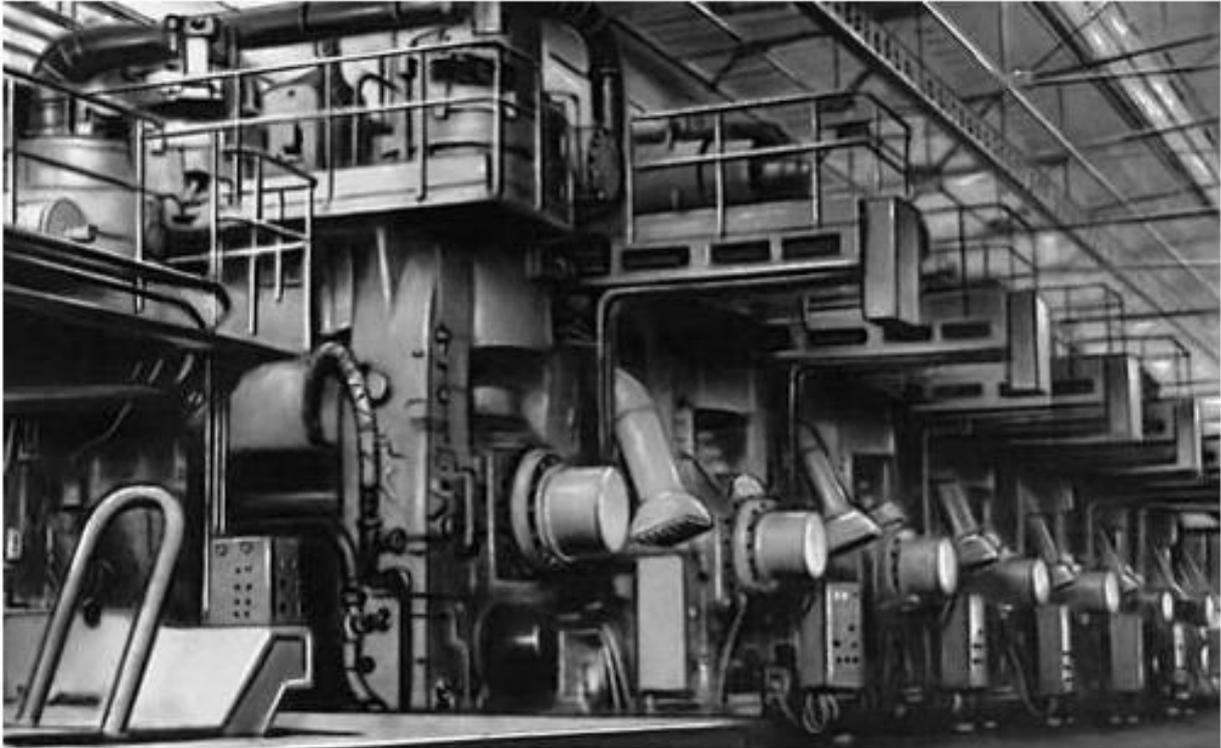


Рис. 3. Багатоклітєвий прокатний стан

Швидкості прокатки достатньо відрізнї та залежать, головним чином, від потрібної продуктивності ПС, асортименту прокатуваної продукції та технологічного процесу. У обтискних, заготівельних, товстолистових, крупносортових станів швидкість прокатки становить приблизно 2 – 8 м/с. Найбільші швидкості характерні для безперервних станів: при обтискуванні сортового металу 10 – 20 м/с, смугового 25 – 35 м/с, дроту 50 – 70 м/с, при холодному обтискуванні жерсті – 40 м/с.

# 1 Аналітична частина

## 1.1 Аналіз процесу прокатки металу

Ділянка клітей розрахована на прокатку наступних чистових профілів:

Дрібний сорт у прутках:

Кругла сталь	12...13...13 мм	ГОСТ 2590-71
Чотиригранники	12...29...29 мм	ГОСТ 2591-71
Шестигранники	12...31...31 мм	ГОСТ 2879-69
Смуги	6...28...28x30...120 мм	ГОСТ 103-76

Дрібний сорт у бунтах

Кругла сталь	12...50...50 мм	ГОСТ 2590-71
Чотиригранники	18...35...35 мм	ГОСТ 2591-71
Шестигранники	18...38...38 мм	ГОСТ 2879-69

Середній сорт

Кругла сталь	34...75...75 мм	ГОСТ 2590-71
Чотиригранники	30...65...65 мм	ГОСТ 2591-71
Шестигранники	32...70...70 мм	ГОСТ 2879-69
Смуги	20x90...18...18x20 мм	ГОСТ 103-76

Ділянка клітей призначена для прокатки нижченаведених марок сталей:

- Підшипникова сталь (ГОСТ 801-78 (20%));
- Ресорно-пружинна сталь (ГОСТ 14959-79 (10%));
- Легована конструкційна сталь (ГОСТ 4543-71 (35%));
- Сталь холодного висадження (ГОСТ 10702-78).

Як вихідний матеріал застосовуються катані заготівлі за ДСТ 4693-77. Максимальною міцністю 1200 МПа при +20°C. Максимальна границя текучості при +20°C становить 800 МПа.

Прокатка дрібного сорту, при проходженні «голови» заготівлі через датчик наявності заготівлі включається розподільна стрілка, що поперемінно

направляє заготівлі на обидва струмки рольганга печі-термостата. Кожний рольганг має 51 ролик з індивідуальним приводом. Рольганг печі-термостата може мати два режими: ручний і автоматичний. Вибір режиму виробляється за допомогою бакаюватого перемикача. Ручний режим роботи призначений для пуску рольганга печі, а також у випадку аварійної ситуації. Двигуни роликів рольганга при роботі в маятниковому режимі змінюють напрямок обертання через кожні 1,5 оберту. Керування здійснюється за допомогою реле часу.

За рольгангом печі-термостата розташовані ножиці, що забезпечують можливість робити різання «голови» прокату. Крім того, у випадку порушення процесу прокатки, є можливість аварійного різання. Далі метал надходить на 1-у проміжну групу клітей дрібносоротної лінії (кліті 7F – 10F).

Після проходження через першу проміжну групу клітей дрібносоротної лінії заготівля надходить на чотири кривошипні ножиці, що забезпечують різання «голови» і «хвоста» прокату. Імпульс на різання видається з датчика наявності металу. Далі прокат надходить на другу проміжну групу дрібносоротної лінії (кліті 11F – 18F), і на чистову групу клітей дрібносоротної лінії (кліті 19F – 24F). Тут, залежно від програми прокатки, застосовуються автоматично працюючій петлі регулятори або столи. Імпульс на включення петлі регулятора за кліттю 19F подається від світлового бар'єра по передньому кінці заготівлі, а на відключення від світлового бар'єра по задньому кінці.

Таблиця 1.1.

## Технічні параметри дрібносортих клітей

Номер кліті	Передавальне число	Діапазон числа обертів, хв <sup>-1</sup>
1	2	3
11F	4	230...840
12F	2,8	216...734
13F	2,8	220...854
14F	2,24	228...840
15F	2,5	235...725
16F	2,24	236...862
17F	2	236...862
18F	1,6	246...850
19F	1,4	228...900
20F	1,12	456...822
21F	1,12	226...878
22F	1:1,12	240...794
23F	1:1,12	215...904
24F	1:1,4	592...838

Розташований за кліттю 24F блок, що калібрує, служить для калібрування прокату з високою вимогою по точності профілю при прокатці круглої й шестигранної сталі. Якщо точних допусків не потрібно й качаються інші профілі, то робоча кліть блоку, що калібрує, виводять із прокату й заміняють на прохідну провідку. Після проходження чистової групи клітей заготовля надходить на ділянку холодильника.

Проектування систем автоматизації технологічних процесів вимагає обліку структури виробничих процесів і особливостей параметричної оцінки їхньої якості. Тому потрібен детальний аналіз обладнання і особливостей конкретного автоматизованого виробництва.

Прокатний стан являє собою систему машин і пристроїв для обробки тиском (прокатки) металевих злитків. До основної робочої частини прокатного стану відносяться обертові прокатні валки, між якими метал деформується. У прокатному стані є також пристрої, що транспортують розкати від нагрівальних пристроїв до валків, від однієї пари валків до іншої (рольганги), змінюють їхнє положення (кантувателі і маніпулятори), прохолоджують, випрямляють, розрізають, упаковують у пакети або змотують у бунти або рулони, маркірують прокачану продукцію.

Основні технологічні операції прокатного стану.

На прокатний стан злитки попадають після кристалізації. Перед прокаткою злитки піддаються додатковому нагріванню в нагрівальних колодязях блюмінга. Після завершення нагрівання, злитки перед початком прокатки зважуються, після чого транспортуються до груп обтискних клітей. Основна лінія прокатки блюмінга включає кліті, об'єднані в чотири групи: стан 1300 – кліть головного привода, стан 900, стан 700 і стан 500. Після прокатки на стані 1300 і первинного зачищення на 1250-тонних ножицях, розкат по черзі проходить двох груп клітей: стан 900 (2 кліті) і стан 700 (4 кліті). Далі, після зачищення переднього краю на маятникових ножицях, в оператора технологічного процесу є можливість або залишити злиток на основній лінії (для одержання заготівель у квадраті 80мм), або перевести злиток по шлепперному полю на обвідну лінію (одержання заготівель у квадраті 150 мм).

На основній лінії злиток піддається подальшому обтисненню на групі клітей стану 500 (при цьому поперечний переріз злитка зменшується до квадрата зі стороною 80 мм), після чого розкат розрізається на мірні заготівлі. Розкрій здійснюється без зупинки розкату – у русі. Для розкрою

використовуються барабанні летучі ножиці, що автоматично обертаються. Довжини заготівель, що відрізаються – штанг, визначаються різницею швидкостей руху розкату й обертання барабана летучих ножиців. Відрізані штанги укладаються в пакети (як правило, до 26 штанг у пакеті) і по вихідних рольгангах подаються на холодильники.

На обвідній лінії злиток більше не обжимається (у поперечному перерізі розкат має квадрат зі стороною 150 мм, отриманий після прокатки в стані 700) і кроїться оператором технологічного процесу вручну на 1000-тонних ножицях.

З цих штанг формуються пакети (розмір пакетів набагато менший, ніж на основній лінії – до 6 штанг), що також подаються по вихідних рольгангах на холодильники. В залежності від розташування робочих клітей прокатні стани поділяються на наступні групи: одноклітьові, лінійні багатоклітьові, послідовні, напівбезперервні, безперервні.

Найбільш простими є одноклітьові стани. До цієї групи ставляться блюмінги, слябінги, товстолистові двороликові, трироликові й чотирьох роликові стани, універсальні стани.

Багато яких профілерозміри з ряду причин неможливо одержати у валках однієї кліті. Тому набагато частіше застосовуються багатоклітьові стани, які будують головним чином з послідовним, а іноді й з лінійним розташуванням клітей.

Робочі кліті лінійних станів розташовують в одну, дві, три й більше лінії, кожна з яких звичайно приводиться від окремого електродвигуна. Лінійні стани нереверсивні, їх застосовують як заготівельні, рейко-балкові, сортові й дротові. Істотним недоліком цих станів є однакова частота обертання валків у всіх клітях окремої лінії, що перешкоджає збільшенню швидкості прокатки в міру росту довжини розкатів. Це приводить до втрати температури металу, обмежує масу заготівлі й продуктивність станів.

Значного збільшення продуктивності прокатних станів можна досягти при послідовному розташуванні клітей, число яких дорівнює числу проходів

при обтисненні заготовлі з доведенням її до готового профілю. З метою скорочення довжини цеху й кращого використання його площі кліті розташовують у кілька паралельних ліній. На станах з послідовним розташуванням клітей розкат одночасно перебуває тільки в одній кліті. У зв'язку із цим відстань між клітями збільшується від першої до останнього, тому що довжина розкату збільшується. Відповідно збільшується й частота обертання валків. Стани даної групи широко застосовують для прокатки сортових профілів.

## **1.2 Стан автоматизації прокатного стану**

Функції високого рівня.

REF – зв'язок з іншими контролерами й верхнім рівнем автоматизації;

SEQ – послідовність виконання операцій;

REG – мінімальний натяг/ регулювання петлі;

DRI – інтерфейс із приводами.

Функції високого рівня підрозділяються на дві системи:

Система 1: чорнова лінія й середньосортна лінія (кліті H1V (V6V, H7F (V16M))).

Система 2: дрібносоротна лінія (кліть H7F – кокс блок-моталка H24F)

Функції високого рівня REF.

У функціональному логічному контролері вирішуються наступні завдання: розрахунок швидкостей клітей, керування, уведення заданих значень із плану прокатки й зв'язок з іншими функціональними контролерами: SEQ, MTC, DLC, DRI, MILL (допоміжні приводу), COOL (холодильник), HASP (моталки) і т.д. (див. наведений нижче рисунок).

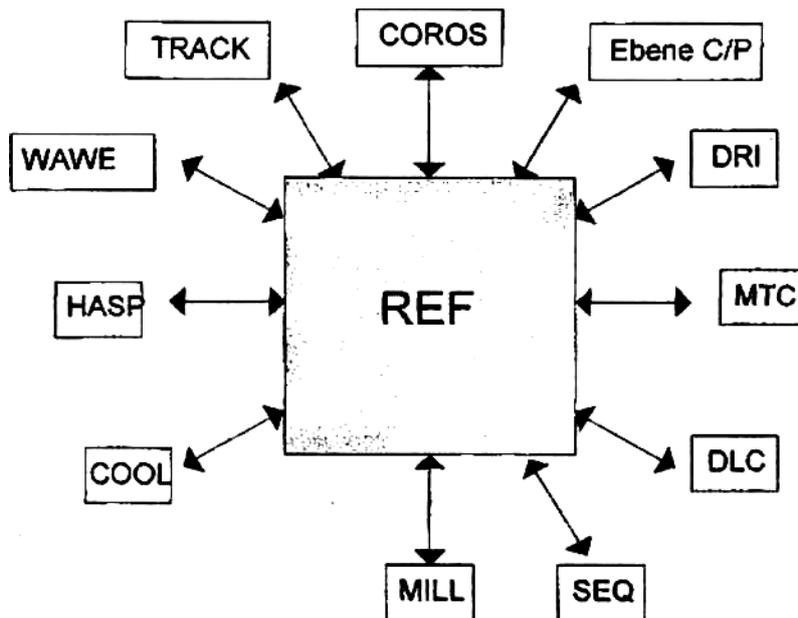


Рис. 1.2. Функції високого рівня REF

Введення заданих значень в REF здійснюється з рівня З/Р із програм прокатки або за допомогою введення оператора на станції візуалізації COROS. Отримана програма прокатки містить, крім іншого, заданого значення лінійних швидкостей для головних приводів. В REF задані значення лінійних швидкостей перераховуються в кутові швидкості обертання двигунів. Розраховані й уведені швидкості обертання рівняються в REF із запараметризованими граничними значеннями (за замовчуванням 95%) і перевіряються на погодженість (наростаюча швидкість матеріалу). При помилках формується повідомлення із вказівкою номера кліті, де з'явилася помилка. Блок даних, що містить помилку, не використовується. Якщо ніякого повідомлення про помилку не надійшло, то нові дані плану прокатки передаються на наступне регулювання. REF розраховує швидкості обертання двигунів приводів (обчислюючи їх з лінійних швидкостей матеріалу). На підставі змін конфігурації стану, відключені кліті (неактивні) управляються REF як неспряжені кліті. Оскільки, система призначена для використання на металургійному комбінаті, умови якого не дозволяють проводити експерименти у промислових умовах з системами, алгоритмічне середовище яких не має

достатнього рівня надійності, то тестувати та налагоджувати її в реальних умовах майже неможливо. Для того, щоб все ж таки мати змогу бачити результати роботи програм без реальних датчиків, мною була передбачена можливість налагодження програм на імітаторі, який працює без мережі. Головні програмні модулі залишилися без змін, але замість комплексу з МСКУ, серверами та мережами використовується програма-імітатор. Ця програма звертається до існуючих статичних файлів з базами даних та, звертаючись до них з зазначеним інтервалом часу і зчитуючи відповідні блоки інформації, формує інші файли, динамічні, до яких і звертаються головні програмні модулі. Для неспряженої кліті ( $n$ ) використовується задане значення кутової швидкості обертання перед цим приводом ( $n-1$ ). Перед входом заготівлі в лінію стану REF визначає швидкості двигунів, виходячи із заданої швидкості для провідної кліті (остання кліть за планом прокатки), і відносини частот обертання, виходячи із клина швидкостей. Кожний привід кліті, що приймає участь у процесі прокатки, може бути обраний оператором як провідна кліть для ручного регулювання. Для всіх обраних приводів клітей, починаючи із провідної кліті й всі кліті в напрямку печі, задані значення кутової швидкості обертання підвищуються або знижуються. При впливі на привід кліті, перед провідною кліттю, каскадне регулювання діє завжди в напрямку печі, у протилежному напрямку від напрямку прокатки. При впливі на швидкість провідної кліті, каскадне регулювання підвищує або знижує швидкості двигунів приводів усього стану. При ручному регулюванні, на підставі клина швидкостей, REF передає на DRI уставки для всіх клітей, то коефіцієнти, що забезпечують клин швидкостей, при ручному регулюванні впливають на всю ділянку стану. DRI циклічно підвищує одержувані задані значення для відповідних приводів. Завершення ручного регулювання здійснюється або оператором або при досягненні уставок в DRI. При завершенні ручного регулювання оператором, REF передає блок заданих значень в DRI, при цьому рампи всіх використовуваних приводів однакові. Якщо на підставі ручного регулювання

змінюється відношення кутових швидкостей обертання двох клітей, тоді записане на згадку відповідне відношення кутової швидкості обертання коректується.

Розрахунки для регулювання мінімального натягу (MTC) і регулювання петлі (DLC) виконуються після проходження заготівлі. REF переймає оптимізацію при регулюванні мінімального натягу або регулювання петлі відношення частот обертання й коректує блок значень, що містить відносини цих частот. В REF так само буферизуються актуальні відносини частот обертання, які були до останнього коректування.

Функції високого рівня SEQ.

У функціональному логічному контролері вирішуються наступні завдання: спостереження за заготівлею; формування команд керування відповідно до руху заготівлі; керування ножицями; формування аварійних сигналів; формування аварійних сигналів, тестування й моделювання сигналів фотоелементів у режимі моделювання. SEQ працює разом з функціональними програмувальними логічними контролерами REF, MTC, DLC, DRI, MILL, COOL, HASP і TRACK (спостереження за заготівлею). Наприклад, дії залежно від руху матеріалу: петлевиштовхувач Вкл / Викл; ролики трайбапарата звести / розвести й т.п.

SEQ формує сигнали керування: утворення / видалення петлі (розрахунок сигналу видалення петлі на підставі часу видалення петлі від DLC) «кліть навантажена» – сигнал для DLC і MTC. SEQ формує й відсилає телеграм на TRACK залежно від руху матеріалу.

Функції високого рівня DLC.

Цифрове регулювання петлі ( Digital Loop Control) реалізує формування 6 петель на мілкосортній лінії між кліттю H19F і кокс-блоком тільки при автоматичному режимі.

У лінії стану матеріал, що прокочується безупинно, повинен бути транспортований так, щоб не було розриву заготівлі. Отже, системою автоматизації повинні бути підготовлені точні задані значення.

У системі реалізований ПІ-регулятор петлі. Вихід регулятора – додаткове задане значення числа оборотів (граничне значення:  $\pm 5\%$  максимального числа оборотів). Є можливість блокувати регулятор. Безпосередньо після першого пропуску заготівлі, регулятор деблокується повним робочим заданим значенням. Швидкості клітей перераховуються так, щоб петля після виходу заготівлі була прибрана. У кожній позиції заготівлі підключаються різні задані значення висоти петлі. Висота петлі залежить від матеріалу, геометрії петлі й швидкості руху. При цьому потрібно звернути увагу, що занадто більша висота петлі приводить до механічної нестабільності, а занадто мала висота петлі до технічної нестабільності регулювання. Актуальні значення висоти петлі одержують із датчика положення петлі й уводять через аналоговий вхідний модуль. Актуальні значення висоти петлі перераховуються перед порівнянням із заданими значеннями висоти петлі.

Під клином швидкостей розуміється збереження певного співвідношення числа оборотів при завданні числа оборотів. Регулятори мінімального натягу й петлі працюють таким чином, що виведене додаткове задане значення числа оборотів для одного приводу містить крім вихідного регулюючого значення також значення коефіцієнта відповідно до клина швидкостей для попереднього приводу. Значення коефіцієнта відповідно до клина швидкостей при регулюванні мінімального натягу враховується тільки в приводах, які ведуть актуальну заготівлю. Для приводів, які перебувають за хвостом заготівлі, розрахунок клина швидкостей відключений. Регулювання петлі має місце в режимі самонавчання. Після першого пропуску оптимальне співвідношення кутових швидкостей обертання приймаючу участь у петлерегулюванні приводів, записується у пам'ять і передається на ЕОМ вищого рівня.

Для формування петлі існують різні допоміжні пристрої. При вартій петлі для підтримки петлеутворення використовується петлевиштовхувач. Петлевиштовхувач може функціонувати тільки тоді, коли матеріал перебуває в обох клітках. Тимчасова характеристика петлевиштовхувача визначається під час пуско-наладки. Датчик положення петлі встановлюється посередині між напрямними роликками. При цьому датчик повинен бути розташований у середині максимальної висоти петлі. Зазор у правому куті до прохідної лінії розраховується по:

$$L = \left( \frac{SH}{2 \cdot \tan \alpha} \right) \cdot 1,2$$

де  $(\alpha)$  - кут сканування датчика петлі.

За допомогою коефіцієнта 1,2 встановлюється активна видима область датчика положення петлі на 80%. Тобто встановлюється додаткова зона надійності для обліку положення петлі.

При петлерегулюванні використовуються датчики положення петлі фірми DELTA, тип TS 2006V, кут сканування датчика положення дорівнює  $30^\circ$ .

Функції забезпечення надійності обмежують додаткові задані значення. При каскадному регулюванні не мають ніякого впливу на регулювання петлі. Після ручного впливу й при аварійних ситуаціях всі розраховані співвідношення числа оборотів віддаляються.

Функції високого рівня DRI.

Основною функцією програмувального логічного контролера DRI є забезпечення видачі заданих значень на привід і одержання інформації про стан приводу. Обмін даними між приводом і програмувальним логічним контролером здійснюється по мережі PROFIBUS L2-DP і полягає в обміні телеграмами, що містять слова стану або слова керування. Привід клітей реалізований на приводі для двигунів постійного струму незалежного порушення SIMADYN D.

Основні переваги індивідуального приводу валків перед груповим, закладаються у збільшенні граничної потужності, що може бути прикладена до

кожного валка; зменшенні сумарного моменту інерції, що доводиться на одиницю потужності приводу; відсутності шестеренної кліті, втрати потужності в якій можуть досягати 5% потужності приводу; відсутності необхідності в точному підборі діаметра валків. Зменшення моменту інерції у свою чергу дає ряд переваг: зменшується тривалість прокатки внаслідок збільшення припустимих прискорень і вповільнень; скорочується витрата енергії на тонну прокату й на нагрівання електричних машин; менш небезпечними стають зриви при захопленні металу; швидкість захоплення може бути збільшена, що приводить до зростання швидкості прокатки й, отже, до росту продуктивності стану.

Основними недоліками індивідуального електропривода в порівнянні із груповим є: збільшення кількості електроустаткування; ускладнення схеми керування, пов'язане з необхідністю регулювання співвідношення швидкостей і вирівнювання навантажень двигуна; збільшення розмірів машзалу, тому що кут нахилу шпинделів не повинен перевищувати 6-8 градусів, внаслідок чого двигуни мусять бути винесені від кліті на значну відстань.

Індивідуальний привід валків доцільно застосовувати для потужних обтискних станів з діаметром валків 1100-1300 мм. Для блюмінга 1000 мм. можливе застосування як індивідуального так і групового приводу. Для заготівкових, рейкобалкових, середньо і дрібносортих станів доцільно застосування групового приводу [13].

Вимоги до електродвигуна.

Двигуни мають забезпечувати:

- знижений момент інерції;
- великий діапазон регулювання швидкості;
- більшу перевантажувальну здатність у широкому діапазоні регулювання швидкості;
- якісне регулювання швидкості.

Широке впровадження приводів змінного струму із частотним регулюванням, а також вимоги ПУЕ вимагає більше детального розгляду можливості застосування асинхронного або синхронного приводу.

Синхронний привід недоцільно застосовувати для приводу працюючого з ударним навантаженням і широким регулюванням швидкості.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором великої потужності розрахований на напругу живлення 6 – 10 кВ, що є недоліком. При частотному регулюванні забезпечується широкий діапазон і швидкість регулювання, однак має маленьку перевантажувальну здатність ( $\lambda \leq 1$ ), що в порівнянні із приводом постійного струму ( $\lambda \leq 2,0 \dots 2,5$ ) неминуче веде до 1,5...2 кратного збільшення потужності двигуна, а значить і пропорційному збільшенню втрат у двигуні. Отже, щонайкраще пропонованим вимогам відповідає двигун постійного струму.

### 1.3. Постановка задачі

У результаті аналізу стану автоматизації даного виробництва видно, що доцільно було б оптимізувати процес петлерегулювання у системі автоматизованого електроприводу. Тому для виконання цього, у ході виконання магістерської роботи необхідно вирішити такі задачі:

- Сформулювати вимоги до електроприводу;
- Обґрунтувати та вибрати електродвигун;
- Розрахувати елементи тиристорного перетворювача;
- Розрахувати постійні часу об'єкта регулювання;
- Розрахувати статичні механічні характеристики;
- Розрахувати динамічні характеристики електропривода;
- Виконати моделювання:
  - а) технологічного навантаження;
  - б) прокатної кліті;
  - в) процесу петлерегулювання;

- d) електроприводів прокатної кліті та петлі.
- Синтезувати систему керування;

#### **1.4. Висновки за розділом**

У силу цього, особливу важливість набували заходи, що використовують внутрішні резерви виробництва, оскільки їх реалізація, при значно менших витратах, приводила б до збільшення обсягу виробництва з одночасним зниженням собівартості продукції.

Такими заходами стала автоматизація прокатного виробництва, виконувана стосовно окремих агрегатів технологічного обладнання (станам, печей, нагрівальних колодязів і т.п.), а також оптимізація вирішення спільних завдань оперативного управління виробництвом.

Розробки КОМ в прокатному виробництві виконані для реалізації управління технологічними процесами прокату і розкрою металу, що прокочується в чорній металургії з метою скорочення втрат металу на обріз. Для того, щоб отримати мінімально необхідний склад апаратури, відносно невисоку вартість і достатню для практичного застосування надійність, ці КОМ розроблялися як спеціалізовані машини. У них використаний цифровий спосіб виконання обчислювальних і логічних операцій, що дозволив отримати необхідну точність і стабільність вирішення завдань управління, а також гнучкість уніфікованих структурних схем КОМ, що забезпечують можливість застосування одного типу КОМ для автоматизації управління на різних підприємствах.

## 2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1. Вибір електродвигуна

#### 2.1.1. Розрахунок моменту прокатки

Розрахунок виконано за методом термомеханічних коефіцієнтів [2].

Задаймося найжорсткішими умовами прокатки:

- сталь марки 60С2Г;
- температура металу при прокатці  $t = 950^\circ\text{C}$ .

Площа контакту деформованого металу з одним валком:

$$F_k = \sqrt{\frac{(R_k \Delta h)(b_1 + b_0)}{2}}, [m^2] \quad (2.1)$$

де  $\Delta h$  – абсолютний стиск, (м);

$$h = h_0 - h_1 = 0,0165 - 0,0141(m);$$

$R_k$  – радіус валка, що катає, (м);

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{0,3738}{2} = 0,1869(m);$$

$$D_k = 0,9D_{\text{гл.бочки}} - h_1 + \varphi; [m], \quad (2.2)$$

де  $0,9D_{\text{гл.бочки}} = 0,9 \cdot 0,380 = 0,342(m)$  – діаметр гранично зношеного валка;

$\varphi = 0,0032(m)$  – зазор між валками.

$$D_k = 0,342 - 0,0141 + 0,0032 = 0,331(m).$$

Довжина вогнища деформації, (м);

$$L = (R_k \cdot \Delta h)^{\frac{1}{2}} = (0,1869 \cdot 0,0048)^{\frac{1}{2}} = 0,029(m);$$

$$F_k = L \cdot \frac{b_1 + b_0}{2} = 0,029 \cdot \frac{0,020 + 0,015}{2} = 0,0005 (м);$$

Визначаємо границю текучості  $[\sigma_{\partial 0}]$ :

$\sigma_{\partial 0} = 130 \text{ МПа}$  – границя текучості для сталі марки 60С2Г [3].

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{\partial 0} \cdot k_t \cdot k_{\varepsilon} \cdot k_u, \left[ \frac{МН}{м^2} \right], \quad (2.3)$$

де  $k_t$  – коефіцієнт, що враховує температурний режим прокатки;

$k_{\varepsilon}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь обтиснення;

$k_u$  – коефіцієнт, що враховує швидкість заповнення металом вогнища деформації;

$\varepsilon$  – відносний стиск;

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{0,0048}{0,0165} = 0,29;$$

$$\varepsilon = 29\%.$$

Швидкість плинущ процесу деформації металу, що прокочується;

$$u = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{v}{L}, \left[ з^{-1} \right], \quad (2.4)$$

де  $v$  – швидкість прокатки,  $\left( \frac{м}{с} \right)$ ;

$L$  – довжина вогнища деформації, (м);

$$u = \frac{0,0048}{0,0165} \cdot \frac{14,95}{0,029} = 150 \left( з^{-1} \right).$$

Коефіцієнти, визначені із графіків 11.55 і 11.56 [4]:

$$k_t = 1,12;$$

$$k_{\varepsilon} = 1,28;$$

$$k_u = 1,3.$$

$$\sigma_{\partial} = 130 \cdot 1,12 \cdot 1,28 \cdot 1,3 = 242 \left( \frac{МН}{м^2} \right).$$

Визначаємо середній опір металу деформації:

$$P_{cp} = \sigma_D \cdot n_\sigma \cdot \left[ \frac{MH}{M^2} \right], \quad (2.5)$$

де  $n_\sigma$  – коефіцієнт, що характеризує умови об'ємно-напруженого стану деформованого тіла;

$$n_\sigma = n_b \cdot n_{1\sigma} \cdot n_{11\sigma} \cdot n_{111\sigma}, \quad (2.6)$$

де  $n_b$  – коефіцієнт, що враховує умови для розширення металу; визначається по діаграмі [2.2] стор.84,  $n_b = 0,79$ ;

$n_{1\sigma}$  – визначається за формулою:

$$n_{1\sigma} = 1 + \frac{1,6 \cdot \mu \cdot L - 1,2 \cdot \Delta h}{\Delta h}, \quad (2.7)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;

$L$  – довжина вогнища деформації, (м);

$\Delta h$  – абсолютний стиск, (м);

$$\mu = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot (0,79 - 0,0005 \cdot t);$$

згідно [5] стор. 29:

$K_1 = 0,8$  (для чавунних валків);

$K_2 = 1,0$  (при прокатці зі швидкостями  $v = 1,0 \frac{m}{c}$ );

$K_3 = 1,3$  (для сталі марки 60С2Г).

$$\mu = 1,3 \cdot 0,8 \cdot (0,79 - 0,0005 \cdot 950) = 0,327;$$

$$n_{1\sigma} = 1 + \frac{1,6 \cdot 0,327 \cdot 0,029 - 1,2 \cdot 0,0048}{0,0048} = 2,96;$$

$n_{11\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив «твердих» кінців смуги на опір металу деформації.

$$\frac{2L}{h_0 + h_1} = \frac{2 \cdot 0,029}{0,0165 + 0,0141} = 1,895;$$

$$n_{11\sigma} = \left( \frac{h_0 + h_2}{2L} \right)^{0,4} = 0,527^{0,4} = 0,774;$$

$n_{111\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує натяг;

$n_{111\sigma} = 1,1$  (при меж кліткового натягу 10%).

$$n_{\sigma} = n_b \cdot n_{1\sigma} \cdot n_{11\sigma} \cdot n_{111\sigma} = 0,79 \cdot 2,96 \cdot 0,774 \cdot 1,1 = 1,99.$$

$$P_{cp} = \sigma_D \cdot n_{\sigma} = 242 \cdot 1,99 = 481 \left( \frac{MH}{M^2} \right).$$

Зусилля прокатки, що діє на один валок:

$$P = P_{cp} \cdot F_k = 481 \cdot 0,0005 = 0,23 MH = 23(m),$$

де  $F_k$  – площа контакту деформованого металу з одним валком.

При проектному зусиллі прокатки для даної кліті 24 т: використання встаткування  $23/24 = 0,95$  або 95 %, таким чином, перевантаження кліті немає.

Визначимо «плече» зусилля прокатки:

$$a = \psi \cdot L, [m], \tag{2.8}$$

де  $\psi = 0,5$  – коефіцієнт «плеча»;

$$a = 0,5 \cdot 0,029 = 0,0145 (m).$$

Визначаємо момент прокатки:

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot a, [H \cdot m], \tag{2.9}$$

$$M_{np} = 2 \cdot 240 \cdot 0,0145 = 6,96 [кН \cdot м]$$

### 2.1.2. Розрахунок потужності двигуна

Визначаємо момент необхідний для подолання контактних сил тертя:

$$M_{np} = M_{mp1} + M_{mp2} + M_{mp3} + M_{mp4}, [H \cdot m], \quad (2.10)$$

де  $M_{mp1}$  – момент сили тертя в підшипниках валків;

$M_{mp2}$  – момент сили тертя в шпинделях і муфтах;

$M_{mp3}$  – момент сили тертя в шестеренній кліті;

$M_{mp4}$  – момент сили тертя в силовому редукторі;

$$M_{mp1} = P \cdot d_{ш} \cdot \mu_n, [H \cdot m], \quad (2.11)$$

де  $d_{ш}$  – діаметр «втулки-цапфи» ПЖТ валків, (м);

$\mu_n = 0,003 \dots 0,005$  – коефіцієнт тертя для ПЖТ;

$$M_{mp1} = 240 \cdot 0,250 \cdot 0,005 = 0,3 [кН \cdot м]$$

Згідно [2.2] стор. 97, при виконанні технологічних розрахунків досить точною формулою є:

$$M_{mp2,3,4} = 0,2 \cdot M_{np}, [H \cdot m] \quad (2.12)$$

$$M_{mp2,3,4} = 0,2 \cdot 6,96 = 1,4 [кН \cdot м];$$

$$M_{mp} = M_{mp1} + M_{mp2,3,4} = 0,3 + 1,4 = 1,7 [кН \cdot м];$$

Визначаємо момент двигуна:

$$M_{дв} = M_{np} + M_{mp} + M_{xx} \pm M_n \pm M_{дин}; [H \cdot m], \quad (2.13)$$

де  $M_{xx} = (0,05 \dots 0,088) \cdot M_{дв}$  – момент холостого ходу робочої кліті, що витрачається на подолання сил тертя в механізмах її головної лінії під час пауз при прокатці;

$M_{дин}$  – динамічний момент, необхідний для подолання інерційних зусиль, і виникаючий при зміні швидкості прокатки (за величиною й напрямком), у періоди прискорення, уповільнення й реверсування;

$M_n$  – момент, що створюється силами натягу заготовки.

У ході проектування, динамічний момент і момент натягу при розрахунках двигуна не враховуються тому що:

- пуск і розгін двигуна відбувається без навантаження;
- міжкліткові натяги враховані при визначенні зусилля прокатки.

Тому:

$$M_{\partial\partial} = \frac{M_{np} + M_{mp}}{1 - 0,065} = \frac{6,96 + 1,7}{0,935} = 9,3 (\text{кН} \cdot \text{м}).$$

«Приводимо» моменти до валу двигуна:

$$M'_{\partial\partial} = \frac{M_{\partial\partial}}{i} = \frac{9,3}{0,907} = 10,25 (\text{кН} \cdot \text{м}).$$

Швидкість двигуна визначається виходячи з:

$$n_{\partial\partial} = \frac{60 \cdot v \cdot i}{\pi \cdot D_k} = \frac{60 \cdot 14,95 \cdot 0,907}{3,14 \cdot 0,331} = 783 \left( \frac{\text{об}}{\text{хв}} \right).$$

Потужність приводного двигуна :

$$P_{\partial\partial} = M'_{\partial\partial} \cdot 0,105 \cdot n_{\partial\partial} = 10,25 \cdot 0,105 \cdot 783 = 843 (\text{кВт}).$$

За каталогом «Інформелектро» 1990р. вибираємо двигун типу МШС1250-800ВЗ, призначений для приводу головних механізмів прокатних станів, робота яких вимагає регулювання швидкості в широкому діапазоні і супроводжується більшими перевантаженнями за струмом, за умови, що середньоквадратичний момент не перевищує номінальний.

Виготовлювач: ЛПЭО «Електросила»; розроблювач: НДІЛПЭО «Електросила»

Таблиця 2.1

Дані двигуна

Параметр	Позн.	Од.вим.	Величина
----------	-------	---------	----------

Потужність на валу		$P_n$	<i>кВт</i>	1100
Номінальна напруга якоря		$U_n$	<i>В</i>	600
Номінальний струм якоря		$I_n$	<i>А</i>	1940
Максимальний струм якоря		$I_{max}$	<i>А</i>	3200
Частота обертання двигуна	мінімальна	$n_{min}$	<i>об/хв</i>	100
	номінальна	$n_n$	<i>об/хв</i>	320
	максимальна	$n_{max}$	<i>об/хв</i>	1000
Номінальна напруга живлення		$U_B$	<i>в</i>	220
Номінальний струм		$I_B$	<i>А</i>	56
Опір обмотки збудження		$R_{B20^\circ}$	<i>Ом</i>	2,89
Опір обмотки якоря		$R_{Я20^\circ}$	<i>Ом</i>	0,046
Опір обмотки додаткових полюсів		$R_{ДП20^\circ}$	<i>Ом</i>	0,0065
Опір компенсаційної обмотки		$R_{КО20^\circ}$	<i>Ом</i>	0,0045
Індуктивність обмотки якоря		$L_{Я}$	<i>Гн</i>	0,00032
Індуктивність обмотки збудження		$L_B$	<i>Гн</i>	3,8
Номінальна ЕРС двигуна		$E_n$	<i>В</i>	567
Максимальний момент		$M_{max}$	<i>кН·м</i>	52
Перевантажувальна здатність за струмом		$\lambda$		1,5
Максимальна швидкість наростання струму якоря		$\left(\frac{\partial I}{\partial t}\right)_{max}$	<i>кА</i>	400
Момент інерції двигуна		$J_{об}$	<i>Н·м</i>	480
Число паралельних полюсів обмотки якоря		$2a$		8
Число активних провідників якоря		$N$		308
Число полюсів		$p_n$		8
Клас ізоляції двигуна				F
Тривалість включення		$T_B$	<i>%</i>	100

### 2.1.3. Перевірка двигуна на нагрівання

При прокатці металу електродвигун прокатної кліті не повинен перевантажуватися по обертаючому моменті, потужності або струму понад припустиму норму тому що це може викликати перегрів й електричний пробій ізоляції обмоток. Така вимога сформульована в правилах технічної експлуатації електроустаткування.

Перевірка двигуна на нагрівання його електричних обмоток виконана з урахуванням перевантажувальної здатності

$$M_{\max} \geq \lambda M_n, \quad (2.14)$$

де  $M_n$  – максимально допустимий момент;

Умова виконується.

Так як двигун працює в нетривалому режимі зі змінним навантаженням (S1), то й час циклу  $t_u = 153(c)$ .

Визначаємо час прокатки

$$t_{np} = \frac{L}{v}, [з], \quad (2.15)$$

де  $v = 14,95 \frac{м}{с}$  – лінійна швидкість прокатки металу;

$L$  – довжина заготівлі,  $м$ .

Визначаємо довжину заготівлі при прокатці в четвертій кліті:

$$L = L_0 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4, [м], \quad (2.16)$$

де  $L_0 = 719 м$  – довжина початкової заготівлі;

$\lambda_1 = 1,227$ ,  $\lambda_2 = 1,139$ ,  $\lambda_3 = 1,195$ ,  $\lambda_4 = 1,129$  – коефіцієнти витяжки металу в

20, 21, 22, 23 – клітях відповідно.

$$L = 719 \cdot 1,227 \cdot 1,139 \cdot 1,195 \cdot 1,129 = 1357 (м),$$

$$t_{np} = \frac{1357}{14,95} = 91(c)$$

Час паузи визначається, виходячи із продуктивності печей нагрівання:

при продуктивності печей  $Q = 60 \frac{m}{год}$  й масі заготівлі  $m = 60 m$ .

$$t_n = \frac{3600 \cdot m}{Q} - t_{in}, (c); \quad (2.17)$$

$$t_n = \frac{3600 \cdot 2,5}{60} - 91 = 62(c).$$

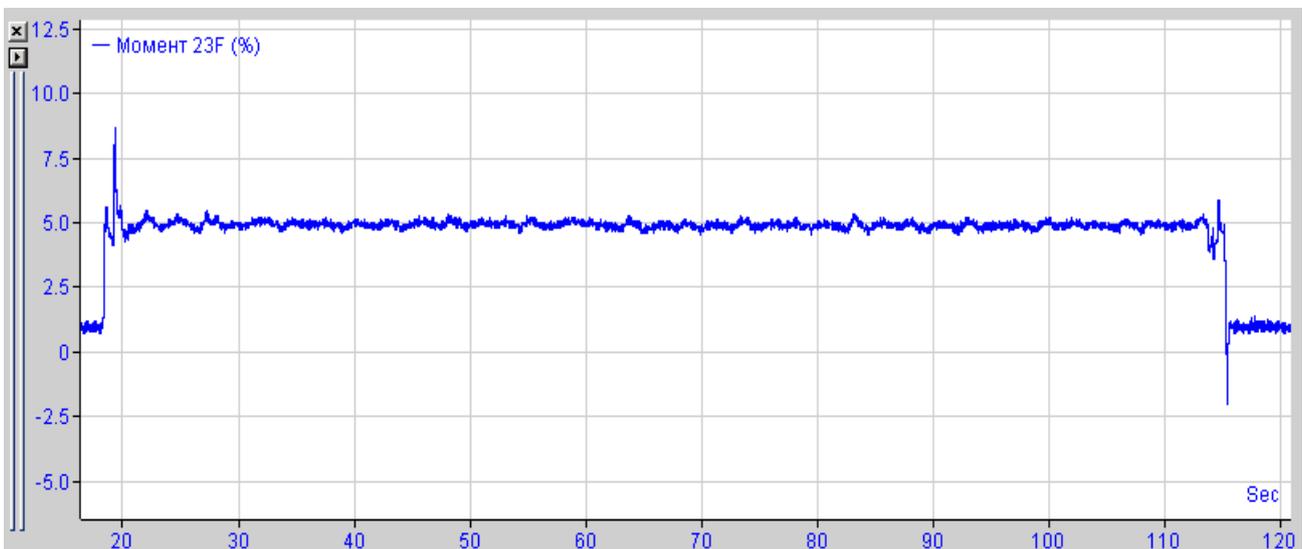


Рис. 2.1. Реальна навантажувальна діаграма механізму

## 2.2. Розрахунок елементів тиристорного перетворювача

До вибраного двигуна необхідно підібрати тиристорний перетворювач із номінальним випрямленим струмом  $I_{d.n.} > I_{я.n.}$  і номінальною випрявленою напругою  $U_{d.n.} > U_n$ .

$$I_{d.n.} > 1940 A;$$

$$U_{d.n.} > 600 B.$$

Тиристори вибираються за струмом виходячи з умови:

$$I_{mp} \geq \frac{\chi \cdot I_{d \max}}{j}, [A], \quad (2.18)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт, що враховує вид охолодження; примусове повітряне ( $\chi = 1$ ).

$I_{d \max} = \lambda \cdot I_{ное}$  – максимальний струм навантаження,

де  $\lambda$  – перевантажувальна здатність двигуна;

$j=3$  – число плечей моста (для трифазної мережі).

$$I_{mp} \geq \frac{1 \cdot 1,6 \cdot 1940}{3} = 1035 (A).$$

Необхідний клас тиристора визначається напругою:

$$U_m = k_3 \cdot U_{обр. \max}, [B], \quad (2.19)$$

де  $U_{обр. \max} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi}$ ,

$k_3 = 1,8$  – коефіцієнт запасу за напругою [6]

$$U_m = 1,8 \cdot \sqrt{6} \cdot 325 = 1430 (B).$$

Тоді клас тиристора виразиться найближчим цілим числом:

$$\text{Клас} \geq \frac{U_m}{100};$$

$$\text{Клас} \geq 15.$$

До вибраного двигуна необхідно підібрати тиристорний перетворювач з номінальним випрямленим струмом  $I_{d.n.} > I_{в.н.}$  і номінальною випрявленою напругою  $U_{d.n.} > U_{в.н.}$ .

$$I_{d.n.} > 56 (A);$$

$$U_{d.n.} > 220 (B).$$

Тиристори вибираються за струмом виходячи з умови (2.18):

$$I_{mp} \geq \frac{1 \cdot 1,6 \cdot 56}{3} = 29,8 (A).$$

Необхідний клас тиристора визначається напругою (2.19):

$$U_m = 1,8 \cdot \sqrt{6} \cdot 220 = 970 (B).$$

Тоді клас тиристора виразиться найближчим цілим числом:

$$\text{Клас} \geq \frac{U_m}{100};$$

$$\text{Клас} \geq 10.$$

У ході проектування за каталогом «Інформелектро» вибираємо перетворювач серії ТПП-1, що є пристроєм перетворення змінного струму в постійний і призначений для живлення якірних ланцюгів машин постійного струму, що застосовується у системах автоматизованого електропривода.

До складу перетворювача за бажанням замовника може входити ТП якоря (реверсивний/нереверсивний), ТП обмотки збудження (реверсивний/нереверсивний), силовий трансформатор або струмообмежуючий реактор, датчик струму (шунт), швидкодіючий автоматичний вимикач.

Якщо лінійні напруги живлення ТП і мережі рівні, то підключення перетворювача до мережі здійснюється через струмообмежуючий реактор. Умова виконується для трифазних мостових схем, якщо номінальна напруга двигуна дорівнює 440 В.

Так як  $U_{d.n.} > 440(B)$  потрібного трансформатора, то фазна напруга його вторинної обмотки мусить відповідати умові:

$$U_{mp.\phi} \geq \frac{U_{d.n.}}{k_U}, [B], \quad (2.20)$$

Таким чином ТПП-1 дозволяє збільшити кількість прокату, знизить питомі експлуатаційні витрати, завдяки повній автоматизації процесу, також дає можливість значно покращити якість прокату.

де  $k_U = 2,34$  для трифазних мостових схем випрямлення.

$$U_{mp.\phi} \geq \frac{600}{2,34} = 256(B);$$

$$U_{mp.l} = 1,73 \cdot U_{mp.\phi} = 1,73 \cdot 256 = 448(B).$$

Потужність трансформатора вибирається за умовою:

$$S_{mp} \geq 3 \cdot k_p \cdot U_{mp.l} \cdot k_I \cdot I_{я.н.} [B \cdot A], \quad (2.21)$$

де  $k_p = 1,045$  – коефіцієнт використання трансформатора за потужністю, для трифазних мостових схем.

$k_I = 0,815$  – коефіцієнт співвідношення між випрямленим струмом ТП і струмом споживаним з мережі (для трифазних мостових схем).

$$S_{mp} \geq 3 \cdot 1,045 \cdot 256 \cdot 0,815 \cdot 1940 = 1,270(B \cdot A).$$

За каталогом «Інформелектро» вибираємо трансформатор ТСЗП-2500/10ВЗ;

Таблиця 2.2.

Параметри трансформатора

Параметр	Позначення	Од. виміру	Величина
Повна потужність трансформатора	$S_n$	кВ·А	1600
Первинна напруга	$U_{в.н}$	кВ	10
Вторинна напруга	$U_{н.н}$	кВ	0,562
Втрати в сталі	$\Delta P_{XX}$	кВт	4,6
Втрати в міді	$\Delta P_{КЗ}$	кВт	25
Напруга короткого замикання	$u_k$	%	7,0

### 2.3. Розрахунок постійних часу об'єкта регулювання

1. Опір якірного ланцюга:

$$R_{я\Sigma} = \beta_T (R_{я20^\circ} + R_{КО20^\circ} + R_{ДП20^\circ}) [Ом], \quad (2.22)$$

де  $\beta_T$  – температурний коефіцієнт, що враховує зміну опору обмотки для міді:

$\beta_T = 1 + 0,004 \cdot \Delta\tau_{\max}$  – для класу ізоляції F гранично припустима величина перевищення температури  $\Delta\tau_{\max} = 100^\circ\text{C}$ .

$$\beta_T = 1 + 0,004 \cdot 100 = 1,4;$$

$$R_{\Sigma} = 1,4 \cdot (0,046 + 0,0045 + 0,0065) = 0,0798 (\text{Ом}).$$

2. Активний опір трансформатора:

$$R_T = \frac{\Delta P_{M.T.}}{3 \cdot I_{d.n.}^2}, [\text{Ом}], \quad (2.23)$$

де  $\Delta P_{M.T.} = 25 \text{ кВт}$  – втрати в міді трансформатора.

$I_{d.n.} = 2500 \text{ А}$  – номінальний струм тиристорного перетворювача.

$$R_T = \frac{25000}{3 \cdot (2500)^2} = 0,00126 (\text{Ом}).$$

3. Активний опір дроселя:

$$R_{dp} = \frac{\Delta P_{M.dp}}{I_{d.n.}^2}, [\text{Ом}], \quad (2.24)$$

де  $\Delta P_{M.dp} = 3 \text{ кВт}$  – втрати в міді дроселя;

$$R_{dp} = \frac{3000}{(2500)^2} = 0,00048 (\text{Ом}).$$

4. Номінальний струм фази вторинної обмотки:

$$I_{mp.n.} = \frac{S_{mp}}{3 \cdot U_{mp.ф.н.}}, [\text{А}], \quad (2.25)$$

$$I_{mp.n.} = \frac{16 \cdot 10^5}{3 \cdot 324} = 1646 (\text{А}).$$

5. Активний опір фази вторинної обмотки трансформатора:

$$R_{mp.\phi} = \frac{\Delta P_{K3}}{3 \cdot I_{mp.n}^2}, [OM], \quad (2.26)$$

$$R_{mp.\phi} = \frac{25000}{3 \cdot 1646^2} = 0,0031 (OM).$$

6. Повний опір фази вторинної обмотки трансформатора:

$$Z_{mp.\phi} = \frac{0,01 \cdot u_k \cdot U_{mp.\phi.n.}}{I_{mp.n.}}, [OM], \quad (2.27)$$

$$Z_{mp.\phi} = \frac{0,01 \cdot 324}{1646} = 0,0137 (OM).$$

7. Індуктивний опір фази вторинної обмотки трансформатора:

$$X_{mp.\phi} = \sqrt{Z_{mp.\phi}^2 - R_{mp.\phi}^2}, [OM], \quad (2.28)$$

$$X_{mp.\phi} = \sqrt{0,0137^2 - 0,0031^2} = 0,0133 (OM).$$

8. Індуктивний фази трансформатора:

$$L_{mp.\phi} = \frac{X_{mp.\phi}}{2\pi f_c}, [Гн], \quad (2.29)$$

$$L_{mp.\phi} = \frac{0,0133}{314} = 0,0000424 (Гн).$$

9. Еквівалентна індуктивність перетворювача:

$$L_{III} = k \cdot L_{mp.\phi}, [Гн], \quad (2.30)$$

$$L_{III} = 2 \cdot 0,0000424 = 0,0848 (мГн).$$

10. Еквівалентний опір перетворювача:

$$R_{ТП} = k \cdot R_{mp.ф.} + R_T + R_K, [Ом], \quad (2.31)$$

де  $k = 2$  для трифазних мостових схем;

$$R_T = \frac{(0,2...0,3) \cdot q \cdot \Delta U_T}{I_{AT}} \text{ – динамічний опір тиристорів, } Ом;$$

$\Delta U_T = (0,5...0,8)$  – пряме падіння напруги на тиристорі,  $B$ ;

$q$  – кількість одночасно провідних тиристорів (2 для мостових схем);

$I_{AT}$  – середнє значення анодного струму тиристора ( $0,33 \cdot I_{я.н.}$  для трифазних схем),  $A$ ;

$$R_T = \frac{0,3 \cdot 0,8}{0,33 \cdot 1940} = 0,00031 (Ом).$$

При паралельному з'єднанні трьох тиристорів:

$$R_{T\Sigma} = q \cdot \frac{R_T^2}{3} = 6,4 \cdot 10^{-8} (Ом).$$

$R_K$  – опір, обумовлений комутацією анодних струмів фаз:

$$R_K = m \cdot f_c \cdot L_{ТП}, [Ом], \quad (2.32)$$

де  $m$  – число пульсацій випрямленої напруги за період мережного (6 для трифазних мостових схем).

$$R_K = 6 \cdot 50 \cdot 0,0000848 (Ом).$$

За умовою забезпечення припустимих пульсацій випрямленого струму варто перевірити, необхідність реактора. Необхідна індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{я.ц.} = \frac{100 \cdot e_{II} \cdot E_{d0}}{2\pi \cdot f_c \cdot m \cdot i_E \cdot I_{я.н.}}, [Гн], \quad (2.33)$$

де  $e_{II}$  – відносна величина ефективного значення першої гармоніки випрямленого напруги; вона залежить від максимального кута відмикання тиристорів. Без великої похибки її можна прийняти для трифазних мостових схем рівною 0,2;

$i_E$  – відносна величина ефективного значення першої гармоніки випрямленого струму (2...5)%;

$E_{d0} = k_U \cdot U_{mp.ф.}$  – максимальна ЕРС перетворювача:

$$E_{d0} = 2,34 \cdot 324 = 758 (В).$$

$$L_{я.ц.} = \frac{100 \cdot 0,2 \cdot 758}{314 \cdot 6 \cdot 0,05 \cdot 1940} = 0,0008295 (Гн) = 0,8295 (мГн).$$

$$0,8295 > 0,32 + 0,0848 = 0,4048 (мГн).$$

$L_{я.ц.} > L_{я.д.} + L_{ТП}$ , отже необхідний реактор, що згладжує.

Вибираємо згладжуючий реактор з урахуванням умови:

$$L_{СГ.Р.} \geq L_{я.ц.} - (L_{я.д.} + L_{ТП}), [мГн], \quad (2.34)$$

$$L_{СГ.Р.} \geq 0,8295 - 0,4048 = 0,4247 (мГн).$$

За каталогом вибираємо реактор, типу СРОСЗ-2500М  $L_n = 1,25 мГн$ ,  
 $L_n = 1,25 мГн$

Активний опір головного ланцюга:

$$R_E = R_{я\Sigma} + 2R_{TP} + R_{op} + R_k, [Ом], \quad (2.35)$$

$$R_E = 0,0798 + 0,0062 + 0,00048 + 0,02544 = 0,112 (Ом).$$

Активний опір ланцюга збудження:

$$R_z = \beta_T \cdot R_{320}, [Ом], \quad (2.36)$$

де  $R_{320} = 2,89 Ом$  – опір «холодної» обмотки збудження;

$$R_3 = 1,4 \cdot 2,89 = 4,046 (\text{Ом}).$$

Індуктивність головного ланцюга:

$$L_E = L_{я} + L_{тр.ф.} + L_{др}, [\text{Гн}], \quad (2.37)$$

де  $L_{я} = 0,32 \text{ мГн}$  – індуктивність обмотки якоря;

$L_{др} = 1,25 \text{ мГн}$  – індуктивність дроселя;

$L_{тр.ф.} = 0,0424 \text{ мГн}$  – індуктивність трансформатора;

$$L_E = 0,32 + 1,25 + 0,0424 = 1,61 (\text{мГн}).$$

11. Постійна часу якоря:

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я\Sigma}} = \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,0798} = 0,004 (\text{с}).$$

12. Електромагнітна постійна часу головного ланцюга:

$$T_E = \frac{L_E}{R_E}, [\text{с}], \quad (2.38)$$

$$T_E = \frac{0,00161}{0,112} = 0,0144 (\text{с}).$$

13. Постійна часу ланцюга збудження:

$$T_3 = \frac{L_B}{R_B}, [\text{с}], \quad (2.39)$$

$$T_3 = \frac{3,8}{4,046} = 0,939 (\text{с}).$$

14. Коефіцієнт двигуна:

$$A = J_{\text{дв}} \cdot \frac{\pi}{30} = 480 \cdot \frac{3,14}{30} = 50,24 \left( \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{хв}}{\text{об}} \right). \quad (2.40)$$

$$C_e \Phi = \frac{E_n}{n_n} = \frac{567}{320} = 1,772 \left( \frac{B \cdot x \text{ в}}{\text{об}} \right). \quad (2.41)$$

$$C_M \Phi = \frac{M_n}{I_n} = \frac{M_{\max}}{\lambda \cdot I_n} = \frac{52 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 1940} = 17,87 \left( \frac{H \cdot M}{A} \right).$$

15. Електромеханічна постійна часу:

$$T_M = \frac{A \cdot R_E}{C_e \Phi \cdot C_M \Phi} = \frac{50,24 \cdot 0,112}{1,772 \cdot 17,87} = 0,177 (с).$$

16. Постійна часу вихрових струмів:

$$\Phi_n = 0,1 \cdot T_s = 0,1 \cdot 0,939 = 0,0939 (с).$$

17. Номінальний потік двигуна:

$$\Phi_n = \frac{2\pi a E_n}{p_n N \omega_n}, [B\text{ в}], \quad (2.42)$$

де  $a = 4$  – число паралельних віток обмотки якоря;

$p_n = 8$  – число пар полюсів;

$N = 308$  – число активних провідників на якорі.

$$\Phi_n = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 567}{8 \cdot 308 \cdot 33,5} = 0,17 (B\text{ в}).$$

## 2.4. Статичні механічні характеристики

### 2.4.1. Природна характеристика

Швидкість ідеального холостого ходу на природній характеристиці:

$$\omega_{0ном} = \frac{U_n}{c}, [c^{-1}] \quad (2.43)$$

$$\omega_{0ном} = \frac{600}{4,28} = 140,2 (c^{-1})$$

Модуль жорсткості природної механічної характеристики:

$$\beta_E = \frac{c^2}{R_E}, [H \cdot m \cdot c], \quad (2.44)$$

$$\beta_E = \frac{4,28^2}{0,112} = 163,5 (H \cdot m \cdot c).$$

Одержимо рівняння статичної механічної характеристики приводу, прирівнявши в (1)  $\frac{d}{dt} = 0$ :

$$M = \beta_E (\omega_0 - \omega). \quad (2.45)$$

Рівняння статичної природної механічної характеристики:

$$M = 163,5 \cdot (140,2 - \omega).$$

Для побудови природної характеристики по двох точках  $(\omega_0; 0)$ ,  $(\omega_n; M_n)$ , визначаємо електромагнітний номінальний момент:

$$M_n = c \cdot I_n = 4,28 \cdot 1940 = 8303 (H \cdot m).$$

При ослабленні поля  $\Phi = 0,5\Phi_n$ :

$$c' = 0,5 \cdot c = 0,5 \cdot 4,28 = 2,14 (B \cdot c).$$

Швидкість ідеального холостого ходу при ослабленому полі:

$$\omega'_0 = \frac{U_n}{c'}, [c^{-1}] \quad (2.46)$$

$$\omega'_0 = \frac{600}{2,14} = 280,4 (c^{-1})$$

Модуль жорсткості при ослабленому полі:

$$\beta' = \frac{c'^2}{R_E}, [H \cdot m \cdot c], \quad (2.47)$$

$$\beta' = \frac{2,14^2}{0,112} = 40,8 (H \cdot m \cdot c).$$

Рівняння статичної механічної характеристики при ослабленому полі:

$$M_1 = 40,8 \cdot (280,4 - \omega);$$

$$M_{\text{дон}} = \frac{P_H}{\omega_0'}, [H \cdot m], \quad (2.48)$$

$$M_{\text{дон}} = \frac{1100}{280,4} = 3,90 (H \cdot m).$$

При зниженні напруги якоря до  $U_{\text{я}} = 0,25 U_H$  швидкість ідеального холостого ходу дорівнює:

$$\omega_0'' = \frac{0,25 \cdot U_H}{c} = \frac{150}{4,28} = 35,1 (c^{-1})$$

$$M_2 = 163,5 \cdot (35,1 - \omega).$$

Рівняння статичної природної механічної характеристики:

$M = 163,5 \cdot (140,2 - \omega)$ . На графіку зображено суцільною лінією (—————).

Рівняння статичної механічної характеристики при ослабленому полі:

$M_1 = 40,8 \cdot (280,4 - \omega)$ . На графіку зображено пунктирною лінією (·····).

Рівняння статичної механічної характеристики при зниженні напруги:

$M_2 = 163,5 \cdot (35,1 - \omega)$ . На графіку зображено штриховою лінією (-----).

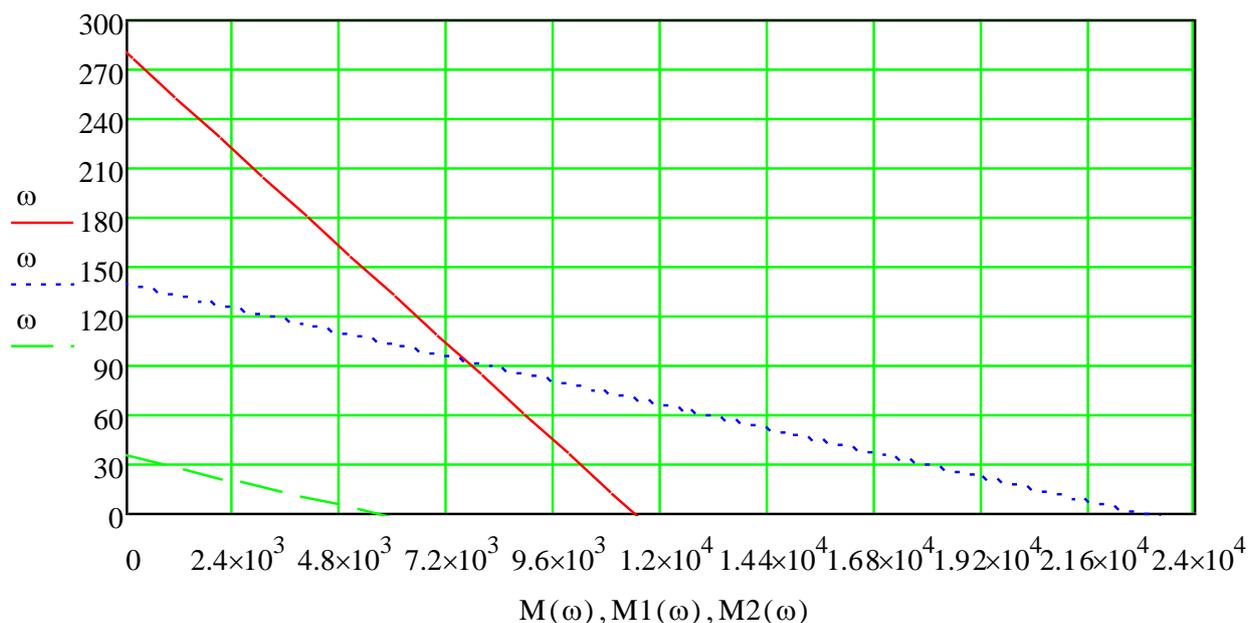


Рис. 2.2. Механічні характеристики

## 2.5. Висновки за розділом

Електропривод безперервних станів повинен задовольняти вимогам відпрацювання ударної програми навантаження в процесі захоплення металу і ведення прокатки з дотриманням сталості секундного об'єму металу, забезпечення необхідного діапазону, роздільного та спільного управління клітьми безперервної групи.

Статичні характеристики повинні забезпечувати зміну швидкості при дії навантаження від 2 до 0,1%. Менші значення відносяться до більш швидкохідних станів. Динамічна зміна швидкості не повинно перевищувати 0,5...3%. Діапазон регулювання залежно від типу стану 2:1...6:1.

На широкополосному стані гарячої прокатки здійснюється прокатка листової сталі товщиною 1,5...10 мм, шириною до 2000 мм при швидкостях 15...20 м/с на виході з чистової групи.

Прокатка тонкої сталевий смуги товщиною менше 1 мм можлива тільки при холодній обробці металу, оскільки тонка стрічка в гарячому стані має малу міцністю. Крім того, окалина, що утворюється в процесі нагрівання металу в печах, порівнянна по товщині із смугою, що не дозволяє вести стійку прокатку з отриманням високої якості поверхні і структури металу.

Технологічний режим на станах холодної прокатки складається з наступних основних етапів: заправка смуги з розмотувача в робочу кліть (або кліті для безперервних станів) і моталку; встановлення заданого натягу металу; одночасний розгін двигунів клітей, розмотувача і моталки; робота на сталій швидкості прокочується смуги; гальмування двигунів. У процесі роботи якість смуги, що прокочується в чому визначається постійністю натягу металу, тому в процесі роботи доцільно знижувати час перехідних процесів двигуна робочої кліті і забезпечувати такий принцип керування швидкістю моталки, щоб в період намотування (або розмотування) швидкість двигуна намотувальних пристроїв змінювалася залежно від радіусів рулонів.

### 3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

#### 3.1. Динамічні характеристики електропривода

##### 3.1.1. Електромеханічні перехідні процеси електропривода

Електромеханічні перехідні процеси в розглянутій системі при  $Z_{12} = Z_{23} = \infty$  описуються рівняннями механічної характеристики й рівнянням руху електропривода:

$$\begin{cases} M = \beta(\omega_0 - \omega_1) - T_{\Sigma} \frac{dM}{dt}; \\ M - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Розв'язавши друге рівняння щодо моменту й підставивши цей вираз в перше, одержимо диференціальне рівняння системи, розв'язане відносно швидкості:

$$T_{\Sigma} T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_C}{\beta} = \omega_c. \quad (3.2)$$

Аналогічно одержано диференціальне рівняння системи, розв'язане щодо моменту:

$$T_{\Sigma} T_M \frac{d^2 M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_C. \quad (3.3)$$

якщо  $m > 4$  ( $m = 12$ ), то  $p_1 = -\alpha_1$ ;  $p_2 = -\alpha_2$ .

$$p_1 = \beta;$$

$$p_2 = \beta_1.$$

У цьому випадку розв'язок рівняння (3.2) повинен бути записаним так:

$$\omega = \omega_c + Ae^{-\alpha_1 t} + Be^{-\alpha_2 t}. \quad (3.4)$$

Рівняння для визначення коефіцієнтів  $A$  і  $B$  можна одержати, підставивши в (1.52) початкові умови:  $t = 0, \omega(0) = \omega_{ноч}, \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{ноч} - M_c}{J_\Sigma}$ .

$$\omega = \omega_c - \left( \frac{\alpha_2(\omega_{ноч} - \omega_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{ноч} - M_c}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) \cdot e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_c - M_{ноч}) - \alpha_1 J_\Sigma(\omega_{ноч} - \omega_c)}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}. \quad (3.5)$$

Розв'язок рівняння (3.3) у загальному виді має вид:

$$M = M_c + Ce^{-\alpha_1 t} + De^{-\alpha_2 t}. \quad (3.6)$$

Початкові умови:  $t = 0, \omega(0) = \omega_{ноч}, M(0) = M_{ноч}$ , згідно (3.1):

$$\left( \frac{dM}{dt} \right)_0 = \frac{\beta \Delta \omega_{ноч} - M_{ноч}}{T_\Sigma};$$

$$\Delta \omega_{ноч} = \omega_0 - \omega_{ноч}.$$

Одержимо:

$$M = M_c - \left( \frac{\alpha_2(M_{ноч} - M_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{ноч} - \beta \Delta \omega_{ноч}}{T_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) \cdot e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_{ноч} - \beta \Delta \omega_{ноч}) - \alpha_1 T_\Sigma(\omega_{ноч} - \omega_c)}{T_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

### 3.1.2. Подача навантаження (захоплення заготовлі)

$$M_c = M_{np} = 7000 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{ноч} = M_{XX} = 350 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\omega_c = 104 \text{ с}^{-1};$$

$$J_\Sigma = 634 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Зміна швидкості валу двигуна в момент захоплення заготовки:

$$\omega = \omega_c - \left( \frac{\alpha_2(\omega_{ноч} - \omega_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{ноч} - M_c}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) \cdot e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_c - M_{ноч}) - \alpha_1 J_\Sigma(\omega_{ноч} - \omega_c)}{J_\Sigma(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

$$\omega = 104 + 40,34 \cdot e^{-61t} - 4,14 \cdot e^{-6t}.$$

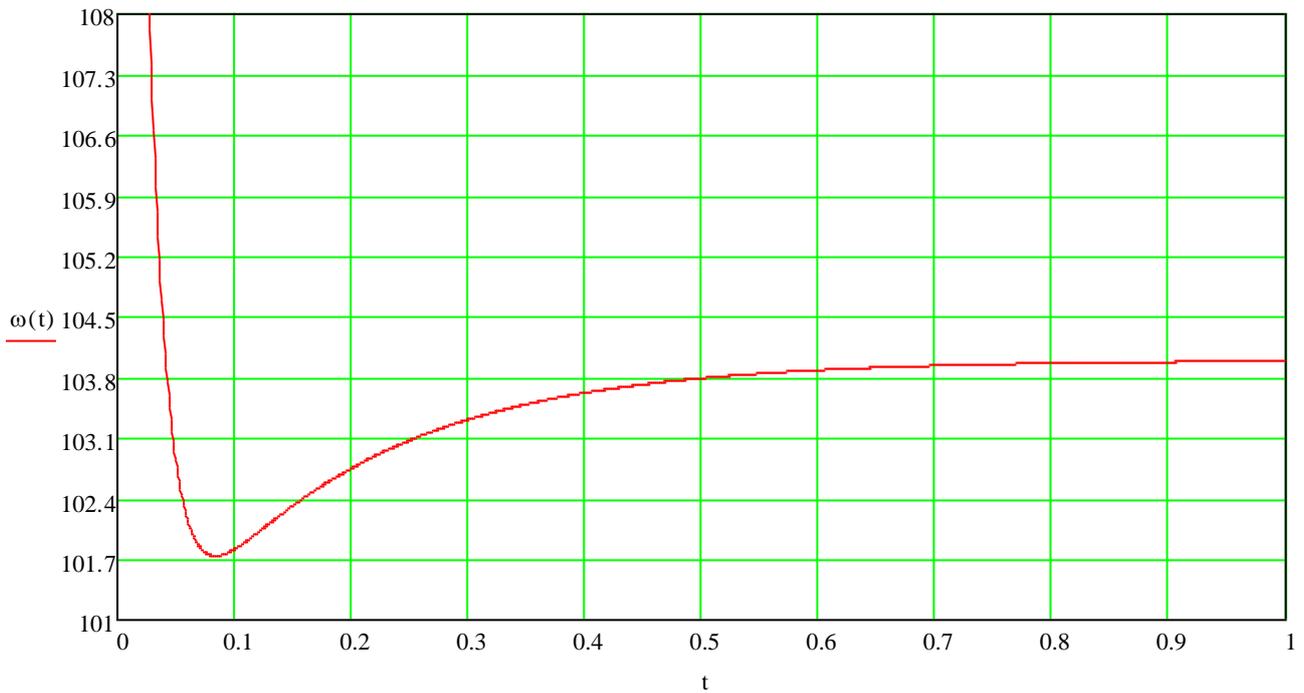


Рис. 3.1. Графік зміни швидкості

Зміна моменту на валу двигуна в момент захоплення заготовки:

$$M = M_c - \left( \frac{\alpha_2(M_{noch} - M_c)}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{M_{noch} - \beta \Delta \omega_{noch}}{T_{\text{э}}(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) \cdot e^{-\alpha_1 t} - \frac{(M_{noch} - \beta \Delta \omega_{noch}) - \alpha_1 T_{\text{э}}(\omega_{noch} - \omega_c)}{T_{\text{э}}(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

$$M = 7000 - 7701,45 \cdot e^{-6t} + 1051 \cdot e^{-61t}.$$

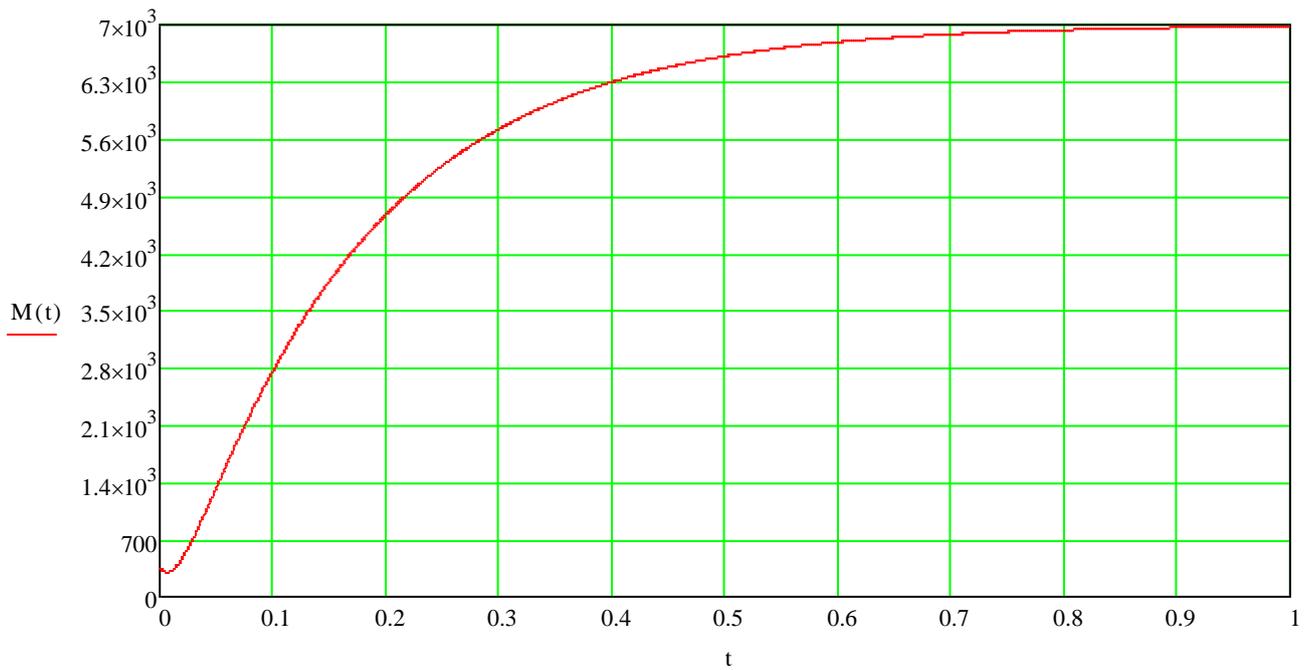


Рис. 3.2. Графік зміни моменту

### 3.1.3. Скидання навантаження (викид заготівлі)

$$M_C = M_{np} = 7000 \text{ H} \cdot \text{м};$$

$$M_{поч} = M_{XX} = 350 \text{ H} \cdot \text{м};$$

$$\omega_c = 104 \text{ с}^{-1};$$

$$J_{\Sigma} = 634 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Зміна швидкості валу двигуна в момент викиду заготовки:

$$\omega = 104 - 44,51 \cdot e^{-6t} - 6,01 \cdot e^{-61t}.$$

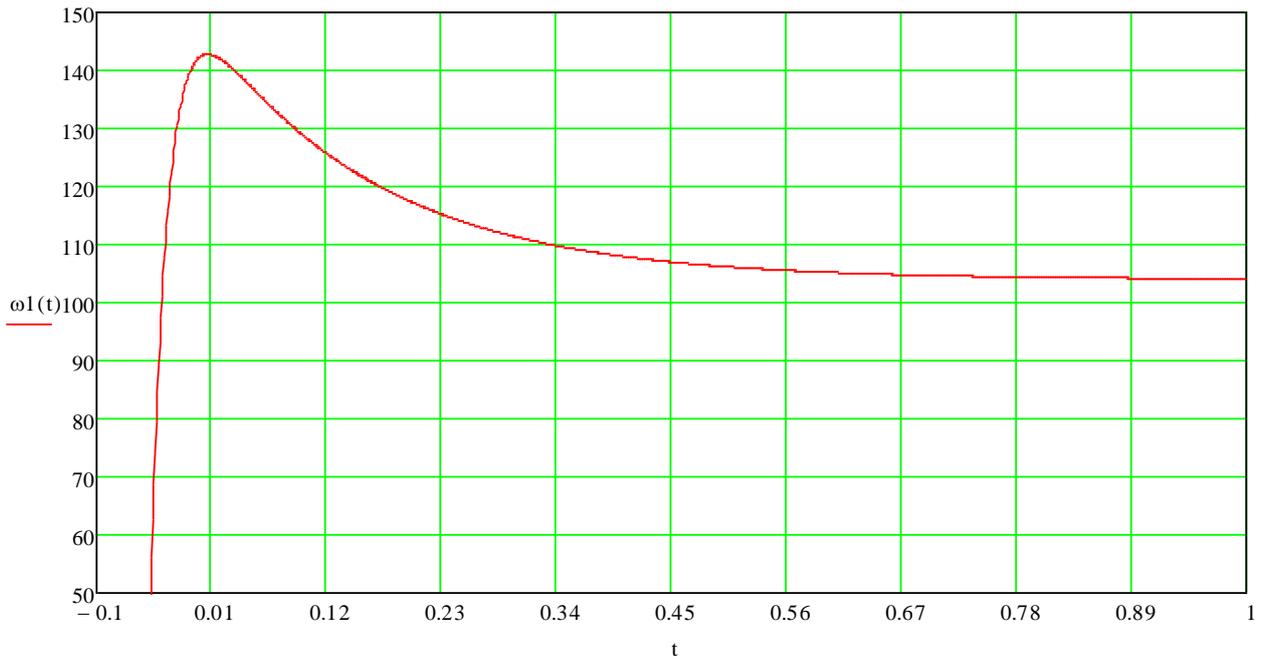


Рис. 3.3. Графік зміни швидкості

Зміна моменту на валу двигуна при викиді заготовки:

$$M = 350 - 7313 \cdot e^{-6t} - 663 \cdot e^{-61t}.$$

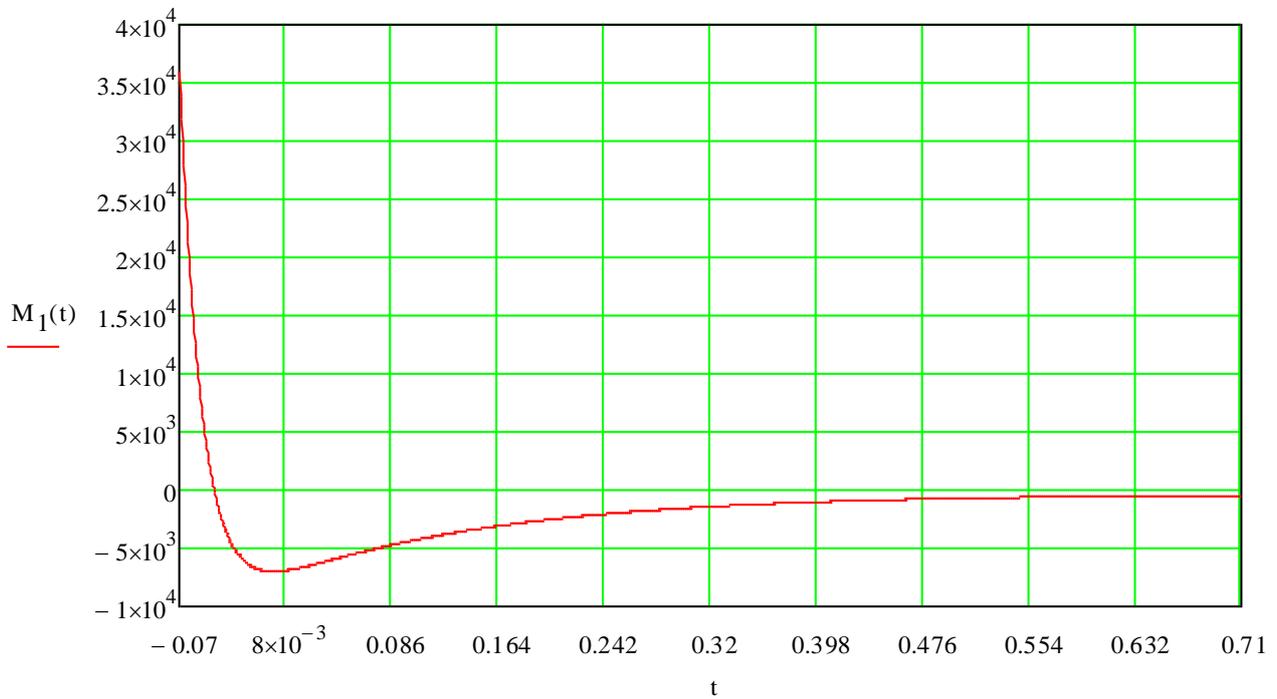


Рис. 3.4. Графік зміни моменту

### 3.2. Модель технологічного навантаження

Закон зміни моменту статичного опору є функцією повороту робочих валків, але з метою спрощення розрахунків може бути представлений функцією часу. Звичайно його приймають у вигляді кусочно-лінійної, синусоїдальної або експонентної функції.

У ході виконання магістерської роботи вибрана експонентна функція наростання моменту прокатки, що, крім монотонності, повніше відображає характер навантаження, тому що для станів гарячої прокатки після закінчення заповнення вогнища деформації металом навантаження, внаслідок ефекту зовнішніх зон, продовжує якийсь час рости [3].

$$M_{np} = M_{cm} (1 - e^{-\alpha t}), [H \cdot m] \quad (3.7)$$

де  $M_{cm} = 7000 (H \cdot m)$  – момент прокатки в сталій стадії;

$\alpha \approx \frac{2,5}{u} = 0,0167$  – параметр заповнення вогнища деформації;

$u = 150 (c^{-1})$  – швидкість заповнення вогнища деформації.

$$M_{np} = 7000 \cdot (1 - e^{-0.0167t})$$

Для комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB 6.0 розроблена модель технологічного навантаження. Для більшої адекватності в модель включена завада у вигляді «білого шуму», що в дійсності відбиває вплив нерівномірного прогріву заготовок на момент прокатки.

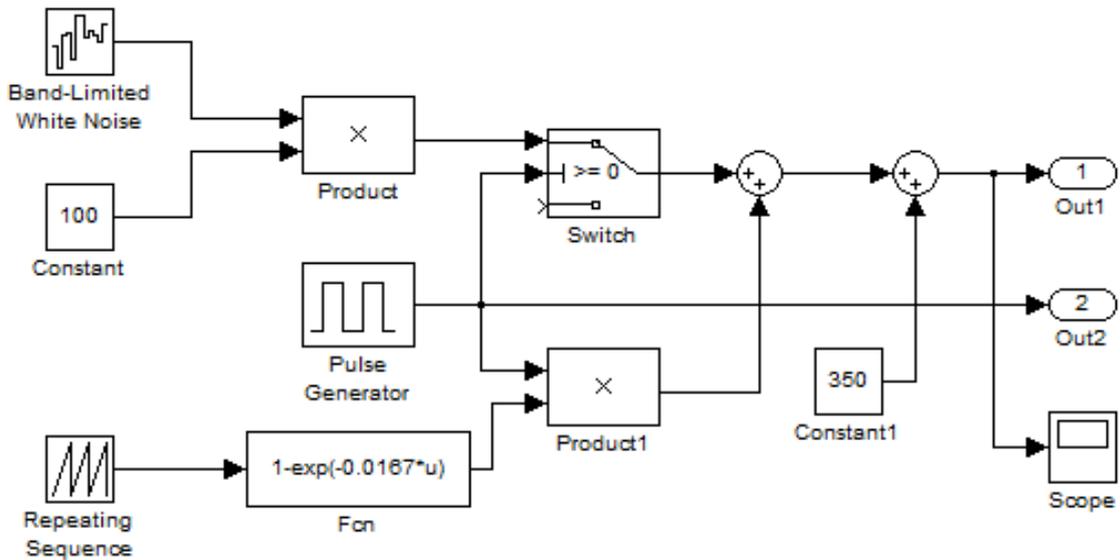


Рис. 3.5. Модель технологічного навантаження

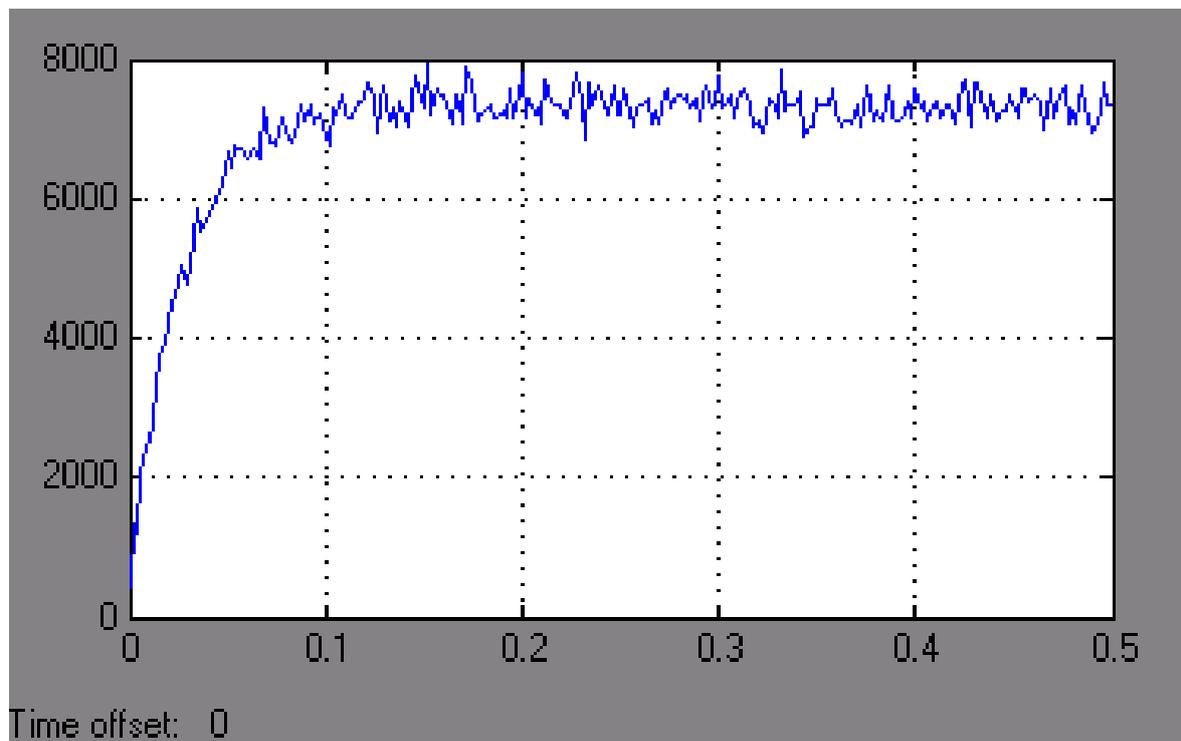


Рис. 3.6. Зміна моменту прокатки в часі

### 3.3. Модель прокатки кліті

Теоретичні й експериментальні дослідження динаміки металургійного обладнання, у тому числі й прокатних станів, були розпочаті колективом наукових співробітників під керівництвом С.Н. Кожевникова й узагальнені в [4].

Структура й властивості головних приводних ліній прокатних станів цілком визначаються на стадії проектування й залежать від наявності доступних методів динамічного аналізу й синтезу механізмів, на підставі яких конструктор міг би знайти й використовувати близькі до оптимального за критеріями найбільшої надійності схемні й конструктивні рішення. Недостатня обґрунтованість застосовуваних на стадії проектування рішень веде до тяжких наслідків.

У зв'язку із цим, останнім часом значна увага приділяється створенню й розвитку методів синтезу машин з оптимальними параметрами. У цьому напрямку суттєве значення має моделювання динамічних характеристик, при якому реальна машина подається її динамічною моделлю, що включає зосереджені маси, з'єднані пружними зв'язками й елементами демпфування. Модель може приймати вид ланцюгової, розгалуженої або замкненої системи.

При аналізі динамічних завдань, у більшості випадків обмежуються розглядом абсолютно твердої механічної трансмісії головного приводу. При цьому з аналізу випадає перехідний процес механічних коливань пружного моменту в головній лінії й резонансні явища, пов'язані зі збігом частот зовнішніх збурювань і власних частот механічних коливань трансмісії.

Приводна лінія прокатної кліті, з погляду динамічного аналізу є складною багаточасовою системою з розподіленими параметрами, що виконує обертові рухи. Звичайним прийомом, що застосовується для аналізу таких систем є заміна системи з розподіленими параметрами, системою із зосередженими параметрами, що характеризуються моментами інерції мас  $J_i$  і піддатливістю пружних зв'язків  $e_i$  (або міцністю зв'язків  $c_i$ ).

$$c_i = \frac{1}{e_i}; \quad (3.8)$$

Таке подання приводних ліній дозволяє розглядати їх як багатомасові системи з дискретними параметрами, у яких положення кожної маси

визначається однією кутовою координатою, а число ступенів свободи дорівнює числу мас.

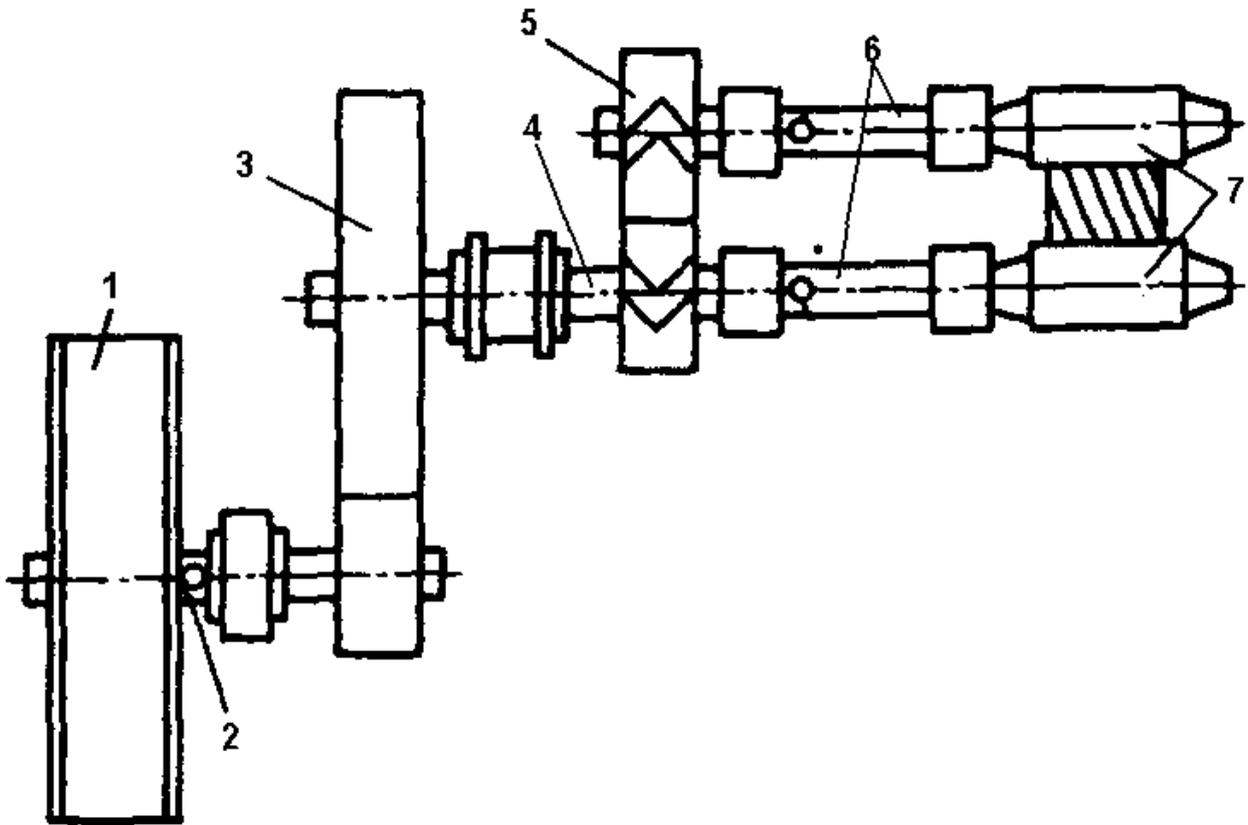


Рис. 3.7. Система з розподіленими параметрами

- 1 – Двигун
- 2 – Приводний вал
- 3 – Редуктор
- 4 – Кінцевий вал редуктора
- 5 – Шестерна кліть
- 6 – Шпиндель
- 7 – Валкова система

Застосовують різні приклади спрощення моделі для складання еквівалентної розрахункової схеми. Кількість ступенів свободи, якими мусить володіти розрахункова еквівалентна схема приводу, визначається рядом власних частот спрощеної системи, так і спектром частот можливих збурювань. Звичайно досить зберегти перші три нижчі власні частоти, тобто розрахункові схеми варто спрощувати до одно-, двох- або тримасових. [3].

До одномасової моделі із закладенням зводяться лінії безредукторного приводу в які момент інерції валу двигуна значно перевершує моменти інерції інших обертових мас. Двомасова модель може представляти безредукторний привід, у якому момент інерції валу двигуна й валкової системи одного порядку. Тримасова модель застосовується при описі редукторного приводу, у якій середня маса представляє зубчасті колеса редуктора.

Таблиця 3.1.

Значення моментів інерції виділених мас

№	Найменування	Позначення	Одиниці виміру	Довжина
1	Діаметр приводного валу	$d_{не}$	$м$	0,180
2	Довжина приводного валу	$l_{не}$	$м$	0,655
3	Діаметр кінцевого валу редуктора	$d_p$	$м$	0,238
4	Довжина кінцевого валу редуктора	$l_p$	$м$	0,615
5	Діаметр шпинделя	$d_{ш}$	$м$	0,333
6	Довжина шпинделя	$l_{ш}$	$м$	2,1–2,9
7	Модуль зсуву (сталь)	$\sigma$	$МН \cdot м$	$8 \cdot 10^4$
8	Момент інерції двигуна	$J_{дв}$	$кг \cdot м^2$	48
9	Момент інерції редуктора (наведений)	$J_p$	$кг \cdot м^2$	37,5
10	Момент інерції шпинделя (наведений)	$J_{ш}$	$кг \cdot м^2$	11
11	Момент інерції навантаження з валками (наведений)	$J_n$	$кг \cdot м^2$	83
12	Момент інерції валків (наведений)	$J_v$	$кг \cdot м^2$	0,9
13	Передавальне число редуктора	$i_p$		1,12

Продовження табл. 3.1.

14	Допустимий зазор у з'єднаннях шпинделя	$\Delta\varphi_{ш}$	мкм	0,06
15	Допустимий зазор у редукторі	$\Delta\varphi_p$	мкм	0,03

Таблиця 3.2.

Твердість пружних елементів механізмів приводу

№	Пружний елемент	Розрахункова формула
1	Циліндрична ділянка валу	$C = \frac{\sigma \pi d^4}{32 \cdot l},$ $\sigma$ – модуль зсуву, $d$ – діаметр, $l$ – довжина.
2	Шпонкове й шліцьове з'єднання	$C = k_{ш} d^2 l h z,$ $k_{ш}$ – коефіцієнт, $d$ – діаметр, $l$ – довжина з'єднання, $h$ – висота, $z$ – кількість на валу.
3	Зубчаста передача	$C = k_3 R^2 b,$ $k_3$ – коефіцієнт приведення, $R$ – радіус початкової окружності, $b$ – ширина вінця.

Визначимо твердість шпинделя (наведену до валу двигуна):

$$C = \frac{\sigma \pi d_{ш}^4}{32 \cdot l_{ш} i_p^2}, [H \cdot m], \quad (3.9)$$

$$C = \frac{8 \cdot 10^{10} \cdot 3,14 \cdot 0,333^4}{32 \cdot 2,1 \cdot 1,12^2} = 3,66 \cdot 10^7 (H \cdot m).$$

Визначимо твердість приводного валу:

$$C = \frac{\sigma \pi d^4}{32 \cdot l}, [H \cdot M], \quad (3.10)$$

$$C = \frac{8 \cdot 10^{10} \cdot 3,14 \cdot 0,18^4}{32 \cdot 0,655} = 1,25 \cdot 10^7 (H \cdot M).$$

Визначимо твердість кінцевого валу (приведеного до валу двигуна):

$$C = \frac{\sigma \pi d_p^4}{32 \cdot l_p i_p^2}, [H \cdot M], \quad (3.11)$$

$$C = \frac{8 \cdot 10^{10} \cdot 3,14 \cdot 0,238^4}{32 \cdot 0,615 \cdot 1,12^2} = 3,2 \cdot 10^7 (H \cdot M).$$

Перша маса містить момент інерції двигуна:

$$J_1 = J_{\text{дв}} = 48 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Друга маса містить моменти інерції редуктора, шестерінчатої кліті й шпинделя. Момент інерції шпинделя входить у другу й третю масу, відповідно до правила переносу центра мас.

$$J_2 = J_p + J_{\text{шк}} + J_{\text{ш}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2] \quad (3.12)$$

$$J_2 = 37,5 + 11 = 48,5 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Третя маса містить моменти інерції навантаження з валками й шпинделя:

$$J_3 = J_n + J_{\text{ш}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2] \quad (3.13)$$

$$J_3 = 83 + 11 = 94 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Визначимо твердість зв'язку першої та другої мас:

$$C_{12} = \frac{C_{н6}C_p}{C_{н6} + C_p}, [H \cdot m] \quad (3.14)$$

$$C = \frac{1,25 \cdot 10^7 \cdot 3,2 \cdot 10^7}{1,25 \cdot 10^7 + 3,2 \cdot 10^7} = 8,9 \cdot 10^6 (H \cdot m).$$

Визначимо твердість зв'язку другої до третьої маси:

$$C_{23} = 2C_{uu} = 2 \cdot 3,66 \cdot 10^7 = 7,32 \cdot 10^7, (H \cdot m).$$

Таблиця 3.3.

Значення моментів інерції та міцності зв'язку тримасової системи

$J_1, [кг \cdot м^2]$	$C_{12}, [H \cdot м]$	$J_2, [кг \cdot м^2]$	$C_{23}, [H \cdot м]$	$J_3, [кг \cdot м^2]$
48	$8,9 \cdot 10^6$	48,5	$7,32 \cdot 10^7$	94

Повна система диференціальних рівнянь, що описують рух розрахункової тримасової системи головної приводної лінії кліті має вигляд:

$$\left\{ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{np} - M_{12}; \quad J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{23}; \quad J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{об} - M_{23}; \quad \frac{dM_{np}}{dt} = \alpha M_{cm} e^{-\alpha t}; \right\} \quad (3.15)$$

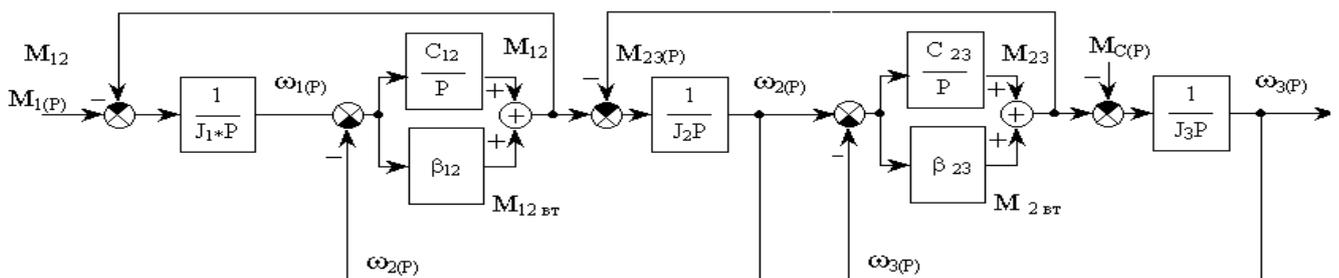


Рис. 3.8. Тримасова система із зосередженими параметрами

Характеристичне рівняння тримасової пружної системи без урахування внутрішнього в'язкого демпфування:

$$p \left( p^4 + \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3} \right) = 0, \quad (3.16)$$

$$p_1 = 0;$$

$$p_{2,3} = \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2b}{a^2}} \right)};$$

$$p_{4,5} = \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{2b}{a^2}} \right)}.$$

$$a = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3} \quad (3.17)$$

$$a = 2,3 \cdot 10^6$$

$$b = \frac{C_{12}C_{23}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3} \quad (3.18)$$

$$b = 1,85 \cdot 10^{11}$$

Аналіз коренів показує, що при всіх реальних з'єднаннях параметрів підкореневі вирази являють собою дійсні позитивні числа.

Отже,

$$p_1 = 0;$$

$$p_{2,3} = \pm j\Omega_1;$$

$$p_{4,5} = \pm j\Omega_2.$$

Корені характеристичного рівняння свідчать проте, що система може бути подана у вигляді послідовного з'єднання інтегруючої ланки й двох консервативних коливальних ланок з резонансними частотами коливань  $\Omega_1$  і  $\Omega_2$ .

Розв'язавши бікватратне рівняння, одержимо корені характеристичного рівняння:

$$p_1 = 0;$$

$$p_{2,3} = \pm j\Omega_1 = \pm j \cdot 202;$$

$$p_{4,5} = \pm j\Omega_2 = \pm j \cdot 1503.$$

Визначимо коефіцієнт внутрішнього грузлого тертя:

$$\beta = \frac{\lambda C}{\pi\Omega}; \beta_{12} = \frac{\lambda_{12} C_{12}}{\pi\Omega_1}; \beta_{23} = \frac{\lambda_{23} C_{23}}{\pi\Omega_2}, \quad (3.19)$$

де  $\lambda = 0,1 \dots 0,3$  – логарифмічний декремент внутрішніх сил в'язкого тертя;

$\Omega$  – резонансна частота;

$$\beta = \frac{0,15 \cdot 8,9 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 202} = 2105;$$

$$\beta = \frac{0,15 \cdot 7,32 \cdot 10^7}{3,14 \cdot 1503} = 2327;$$

Визначимо частоти власних коливань парціальних ланок:

$$\Omega_{01} = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}} = \sqrt{\frac{8,9 \cdot 10^6}{480}} = 136,2;$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{C_{12} + C_{23}}{J_2}} = \sqrt{\frac{8,9 \cdot 10^6 + 7,32 \cdot 10^7}{48,5}} = 1301,1;$$

$$\Omega_{03} = \sqrt{\frac{C_{23}}{J_3}} = \sqrt{\frac{7,32 \cdot 10^6}{94}} = 8825.$$

Для моделювання в середовищі MATLAB 6.0 розроблена модель прокатної кліті, що враховує зміну моментів інерції мас на холостому ході й при захопленні заготівлі. Поряд з величинами, розподілом моментів інерції й пружності системи приводу врахована реакція системи на зовнішні збурювання, обумовлена величинами зазорів у з'єднаннях трансмісії.

Під час пуску двигуна (пуск без навантаження) і роботи на холостому ході через незначну величину моменту інерції валкової системи в порівнянні з моментами інерції двигуна й шестерінчастої кліті в місце тримасової визнаємо можливим представити кліть у вигляді двомасової пружної системи.

Перша маса містить момент інерції двигуна:

$$J_{1X} = J_{об} = 48 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Друга маса містить моменти інерції редуктора, шестерінчатої кліті й шпинделя:

$$J_{2X} = J_p + J_{ш} = 37,5 + 11 = 48,5 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Знайдемо твердість зв'язку першої та другої маси.

$$C_{12X} = \frac{C_{нс} C_p}{C_{нс} + C_p} = \frac{1,25 \cdot 10^7 \cdot 3,2 \cdot 10^7}{1,25 \cdot 10^7 + 3,2 \cdot 10^7} = 8,9 \cdot 10^6 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Таблиця 3.4.

Значення моментів інерції й міцності зв'язку тримасової системи

$J_{1X}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$	$C_{12X}, [\text{Н} \cdot \text{м}]$	$J_{2X}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$
480	$8,9 \cdot 10^6$	48,5

Пружні моменти  $M_{12}$  і  $M_{23}$  визначаються кутами повороту сусідніх мас  $\varphi_i$  і величиною зазору  $\delta_i$ :

$$M_{12} = \delta_i \{0\} \tag{3.20}$$

На першому етапі, у процесі розгону синхронізуючий сигнал «З» з моделі технологічного навантаження фіксує перемикачі Switch і Switch1 у верхньому положенні, при цьому модель прокатної кліті має двомасову структуру. При захопленні заготовлі (збільшення  $M_c$ ) синхронізуючий сигнал «З» переводить перемикачі Switch і Switch1 у нижнє за схемою положення при цьому модель прокатної кліті перетворюється в тримасову.

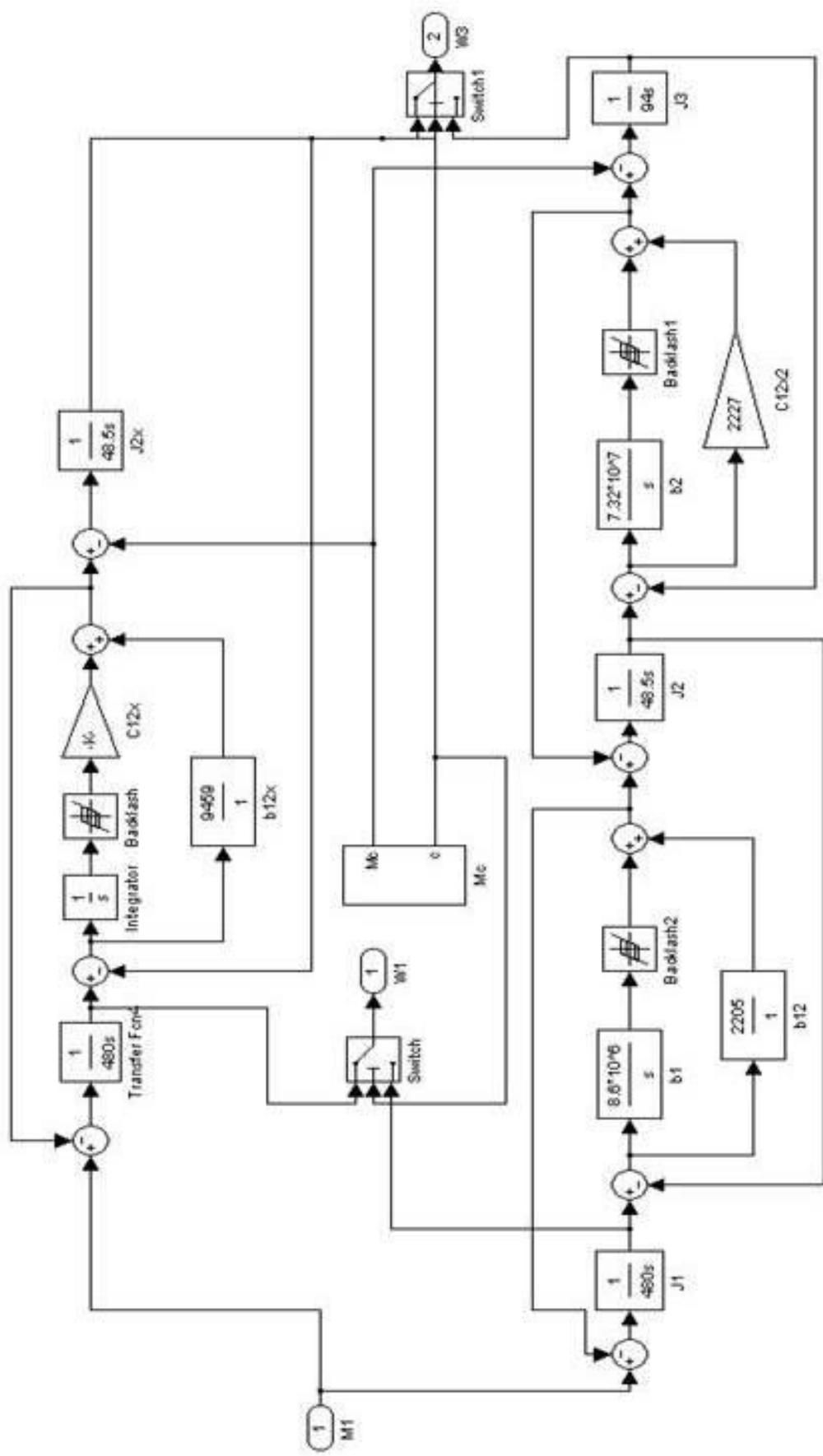


Рис. 3.9. Модель прокатної кліти

### 3.4. Модель петлеутворення

При безперервному прокаті, коли метал перебуває одночасно в декількох клітках, коливання швидкості може привести як до порушення технологічного процесу, так і до зниження якості продукції. Тому для безперервних станів розробляють спеціальні двигуни з низьким ударним падінням швидкості (з підвищеним маховим моментом) і малою індуктивністю якоря для того, щоб забезпечити співвідношення  $T_M > 4 \cdot T_{\Sigma}$ . Габарити таких двигунів, природно більші, ніж двигунів нормального виконання, що змушує вирішити це завдання за допомогою розробки швидкодіючої системи регулювання швидкості.

Узгодження швидкостей між клітками стану забезпечується застосуванням у системах електропривода автоматичних регуляторів струму, швидкості, напруги, ЕРС, петлі та ін.

На високих швидкостях важко забезпечити узгодження груп клітей за швидкістю. Для полегшення цього завдання й зниження вимог до динаміки системи регулювання вводиться система регулювання петлі між клітками й групами клітей. При широкому сортаменті безперервних сортових станів і високій швидкості прокатки регулювання петлі ускладнюються через малу величину припустимої петлі при відносно малій відстані між клітками. При регулюванні петлі важливо забезпечити систему надійно працюючими безконтактними датчиками величини петлі.

При прокатці профілю з невеликою товщиною можна прийняти, що утворення петлі не супроводжується появою напруги стиску в металі. У випадку прокатки твердих фасонних профілів утворення петлі супроводжується появою в металі стискаючих напруг і прокатка відбувається з підпором. Така петля має стійкість при цілком певних її розмірах. Практично вважається, що при прокатці фасонних профілів на мілкосортних станах стріла стійкої петлі не перевищує 0.1 відстані між клітками. Утворення петлі між клітками відбувається у випадку, коли швидкість виходу металу з попередньої кліті  $v_{\text{вих } i}$  більша швидкості входу металу в наступну кліть  $v_{\text{вх } i+1}$ . Різниця  $\Delta \lambda_{II}$  між довжиною

петлі металу  $\lambda$  й відстанню між осями суміжних валків, що виходить за рахунок різниці швидкостей  $v_{\text{вix } i}$  і  $v_{\text{вix } i+1}$ :

$$\Delta\lambda_{II} = \frac{\pi \cdot D \cdot (1+s)}{60} \cdot \int_0^{t_i} \left( n_i - \frac{n_{i+1}}{\lambda_{i+1}} \right) dt + \Delta\lambda_H$$

де  $D = D_i = D_{i+1}$ ;

$s = s_i = s_{i+1}$ ;

$t_\lambda = \frac{\lambda}{v_{\text{вix } i+1}}$  - час проходження перетином відстані ;

$\Delta\lambda_H$  - різниця між довжиною петлі й відстанню між осями суміжних валків при заході в наступну кліть.

Вимоги до динаміки системи регулювання довжини петлі значно нижчі, ніж при регулюванні мінімального натягу.

Для комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB 6.0 розроблена модель петлі.

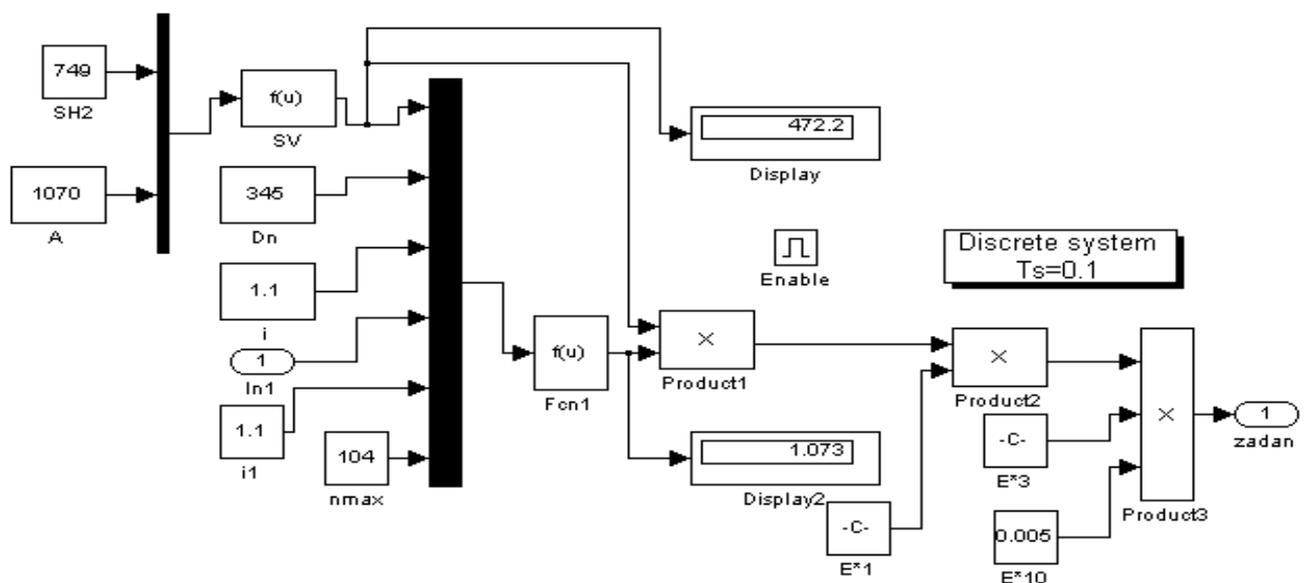


Рис. 3.10. Модель петлі

Розрахунок подовження петлі залежно від її висоти. (SV)

SH – висота петлі ( істинна від дельти або задана)

A – відстань від середини стола до виштовхувача

$SV$  – довжина петлі ( істинна або задана)

$$SV = (\sqrt{A^2 + SH^2} - A) \cdot 2$$

Розрахунок коефіцієнта, що нормує ( $F_{cn1}$ )

$FKN$  – номінальний нормуючий коефіцієнт

$DN$  – номінальний діаметр валка

$DAKT$  – діаметр валка від REF

$UN$  – номінальне передавальне число редуктора

$UAKT$  – активне передавальне число редуктора

$FAKT$  – фактичний нормуючий коефіцієнт

$$FAKT = FKN \cdot \frac{DN}{DAKT} \cdot \frac{UAKT}{UN}$$

Нормуючий коефіцієнт являється коефіцієнтом перетворення різниці заданої та істинної довжини петлі, в додаткові оберти на привод.

### 3.5. Модель електропривода прокатної кліті й петлі

Системи двозонного регулювання застосовуються для електроприводів, керування швидкістю обертання яких задається як зміною напруги на якорі, так і зміною потоку збудження. Для забезпечення нормальних енергетичних показників електропривода регулювання швидкості в межах від нуля до основної створюються при номінальному потоці збудження тільки за рахунок зміни напруги якоря, а в діапазоні зміни швидкості вище основної регулювання здійснюється шляхом зміни потоку збудження при номінальній напрузі або ЕРС якоря.

Автоматичний поділ зазначених двох зон регулювання щонайкраще виконується в системах із залежним керуванням потоком збудження двигуна, у яких регулювання струму збудження здійснюється у функції сполучного параметра – напруги або ЕРС двигуна. Завдяки застосуванню астатичного регулювання зміна потоку збудження в повному діапазоні відбувається при незмінному значенні об'єднуючого параметра. При виборі об'єднуючого параметра перевагу звичайно віддають ЕРС двигуна, оскільки в цьому випадку забезпечуються більш високі енергетичні параметри установки.

Сказане легко пояснити, розглянувши режим прикладення статичного моменту у двократно інтегруючій системі двозонного регулювання швидкості. Якщо в якості сполучного параметру використовується ЕРС двигуна, то відновлення швидкості буде за рахунок збільшення ЕРС перетворювача, що живить якорь двигуна, при незмінному потоці збудження. У випадку регулювання струму збудження у функції напруги двигуна останнє буде підтримуватися за рахунок збільшення ЕРС перетворювача на величину, меншу, ніж у першому випадку, а компенсація спадання напруги в якорі двигуна відбудеться за рахунок відповідного ослаблення потоку. Таким чином, у другому випадку двигун навантажений статичним моментом, буде працювати при меншому потоці, тобто з більшим струмом якоря, і при більш зарегульованому перетворювачі.

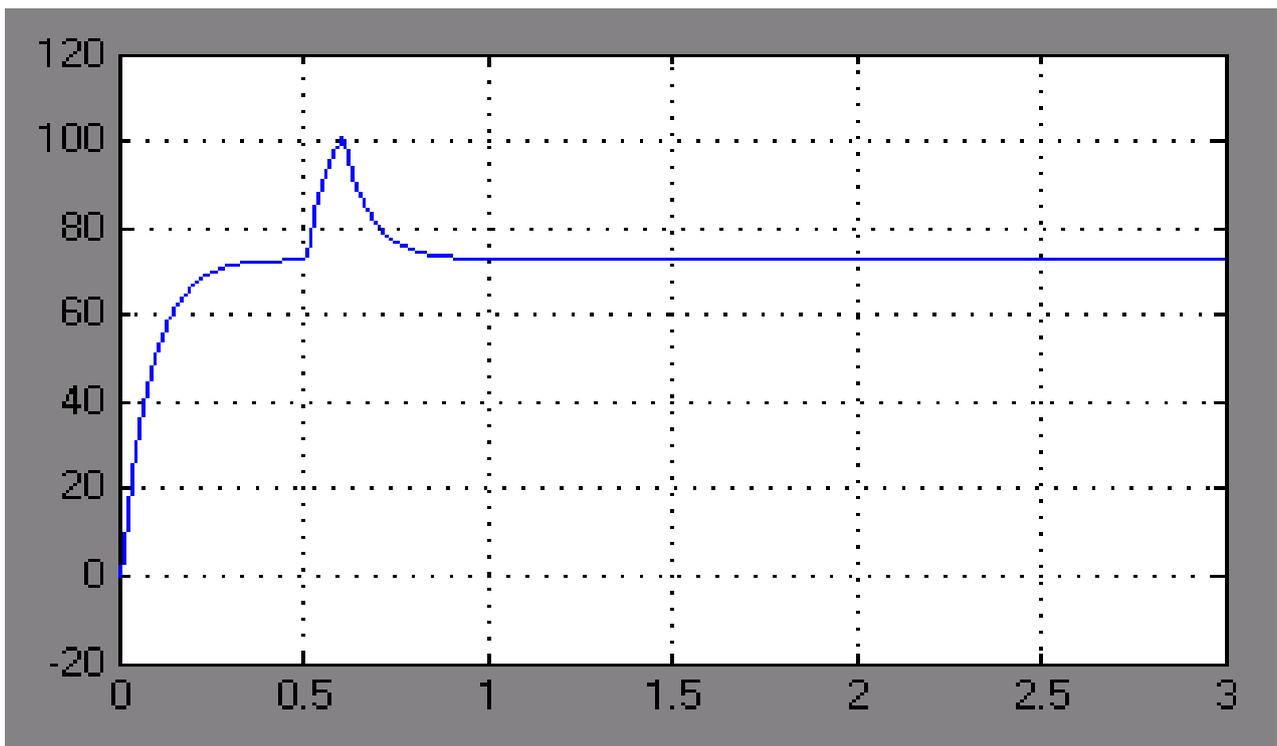


Рис. 3.11. Графік зміни швидкості



### 3.6. Синтез системи керування

Системи двозонного регулювання застосовуються для електроприводів, керування швидкістю обертання яких виробляється як зміною напругою на якорі, так і зміною потоку порушення. Для забезпечення нормальних енергетичних показників електропривода регулювання швидкості в межах від нуля до основної відбувається при номінальному потоці збудження тільки за рахунок зміни напруги якоря, а в діапазоні зміни швидкості вище основного регулювання здійснюється зміною потоку збудження при номінальній напрузі або ЕРС якоря.

Автоматичний поділ зазначених двох зон регулювання щонайкраще виконується в системах із залежним керуванням потоком збудження двигуна, у яких регулювання струму збудження здійснюється у функції сполучного параметра – напруги або ЕРС двигуна. Завдяки застосуванню астатичного регулювання зміна потоку збудження в повному діапазоні відбувається при незмінному значенні сполучного параметра. При виборі об'єднуючого параметра перевагу звичайно віддають ЕРС двигуна, оскільки в цьому випадку забезпечуються більш високі енергетичні параметри установки.

#### 3.6.1. Розрахунок регулятора струму якоря в режимі безперервного струму

Бажана передавальна функція розімкненого контуру струму з урахуванням неединичного зворотного зв'язку:

$$W(p) = \frac{1}{a_T T_\mu p (T_\mu p + 1) K_T} \quad (3.21)$$

де  $K_T = \frac{I_3}{I_H} = \frac{10}{1940} = 0.0051$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом якоря;

$T_\mu = 0.005$  с – некомпенсуюча мала постійна часу;

$a_T = 2$  – співвідношення постійних часу контуру струму (модульний оптимум).

Передавальна функція об'єкта регулювання (без обліку внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна).

Фізичною передумовою для такого допущення є та обставина, що для більшості промислових електроприводів потужністю більше 100 кВт у силу значної інерційності каналу зворотного зв'язку по ЕРС двигуна поведінка струму якоря в перехідному режимі визначається в основному зміною ЕРС тиристорного перетворювача й мало залежить від ЕРС двигуна.

$$W_{O.P.}(p) = \frac{\frac{K1}{R_{\Sigma}}}{(T_{\Pi}p + 1)(T_{\Sigma}p + 1)} \quad (3.22)$$

де  $R_E = 0,112$  (Ом) – опір силового ланцюга якоря;

$T_E = 0,0144$  (с) – постійна часу силового ланцюга якоря;

$= 0,004 \dots 0,01$  (с) – постійна часу тиристорного перетворювача;

$K1 = 0,1 E_{d0} = 76$  – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача.

Визначаємо налагодження інтегрального регулятора струму (ПІ-РС), що дозволяє одержати будь-які попередньо задані параметри контуру струму.

Його передавальна функція:

$$W_{P.T.}(p) = k_{\Pi} + \frac{1}{T_i p} \quad (3.23)$$

де  $k_{\Pi}$ ,  $T_i$ , – відповідно коефіцієнт пропорційної частини й постійні часу інтегрування.

Налаштування обчислюються по формулах:

$$T_i = \frac{K1 K_T T_{M1}}{R_E}, [c] \quad (3.24)$$

$$T_i = \frac{76 \cdot 0,0051 \cdot 0,35}{0,112} = 1,211 \text{ (с)}.$$

$$k_{II} \frac{T_{M1}}{T_i}, \quad (3.25)$$

$$k_{II} = \frac{0,35}{1,211} = 0,289.$$

### 3.6.2. Розрахунок регулятора струму в зоні переривчастого струму

Погіршення динамічних властивостей у режимі переривчастого струму виражається в значному затягуванні перехідного процесу в зоні переривчастих струмів через некомпенсоване збільшення еквівалентного опору якірного ланцюга.

Для поліпшення динаміки використовується адаптивний регулятор струму з нелінійною характеристикою, що характеризується різними передаточними функціями в режимах переривчастого й безперервного струмів. Для поділу зон роботи регулятора використовується спеціальний датчик, реагуючий на переривання струму.

Як вже відзначалось, у режимі переривчастого струму якірний ланцюг з перетворювачем може бути описаний передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{KI}{R'_E (T_\mu p + 1)}, \quad (3.26)$$

де  $KI = 76$  – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача якоря;

$R'_E = f(\lambda)$  – еквівалентний опір якірного ланцюга ( $\epsilon$  параметром у функції відносної тривалості протікання струму) і значно перевищує  $R_E$ .

Передавальна функція регулятора струму, що забезпечує таку ж динаміку, яка задана в режимі безперервного струму, визначається з виразу:

$$W_{PT}(p) \frac{K_T K_1}{R'_E (T_\mu p + 1)} = \frac{1}{2T_\mu p (1 + T_\mu p)},$$

звідки визначено:

$$W_{PT}(p) = \frac{R'_E}{K_T \cdot K_1 \cdot 2T_\mu p}.$$

Регулятор струму повинен бути інтегральним зі змінної постійної часу, що залежить від значення  $R'_E$ .

Оскільки  $R'_E$  пов'язано зі скважністю струму, запропонована ключова схема, що змінює структуру з ІІІ-регулятора на І-регулятор із частотою й скважністю, що відповідає скважності струму в переривчастому режимі.

У нелінійному регуляторі струму збільшення  $R'_E$  компенсується збільшенням коефіцієнта підсилення регулятора струму.

$$T_i = \frac{K_T \cdot K_1 \cdot 2T_\mu R'_E}{R'_E} = \frac{0,0051 \cdot 76 \cdot 2 \cdot 0,005 \cdot 1,12}{1,12} = 0,0039 \text{ с.}$$

### 3.6.3. Розрахунок відносної похибки регулювання, перерегулювання і похідної струму

Розглянемо режим відпрацьовування стрибка завдання струму  $I_3 = U_{3.C} / K_C$  на вході контуру, не з огляду на дії ЕРС двигуна.

Рівняння для струму двигуна в операторній формі в цьому випадку має вигляд:

$$I(p) = \frac{I_3}{T_C p (T_\mu p + 1) + 1}. \quad (3.27)$$

Перейшовши до оригіналу одержуємо:

$$I(t) = I_3 \left( 1 - \sqrt{2} \times e^{-\frac{t}{T_T}} \times \sin\left(\frac{t}{T_T} + \frac{\pi}{4}\right) \right) \quad (3.28)$$

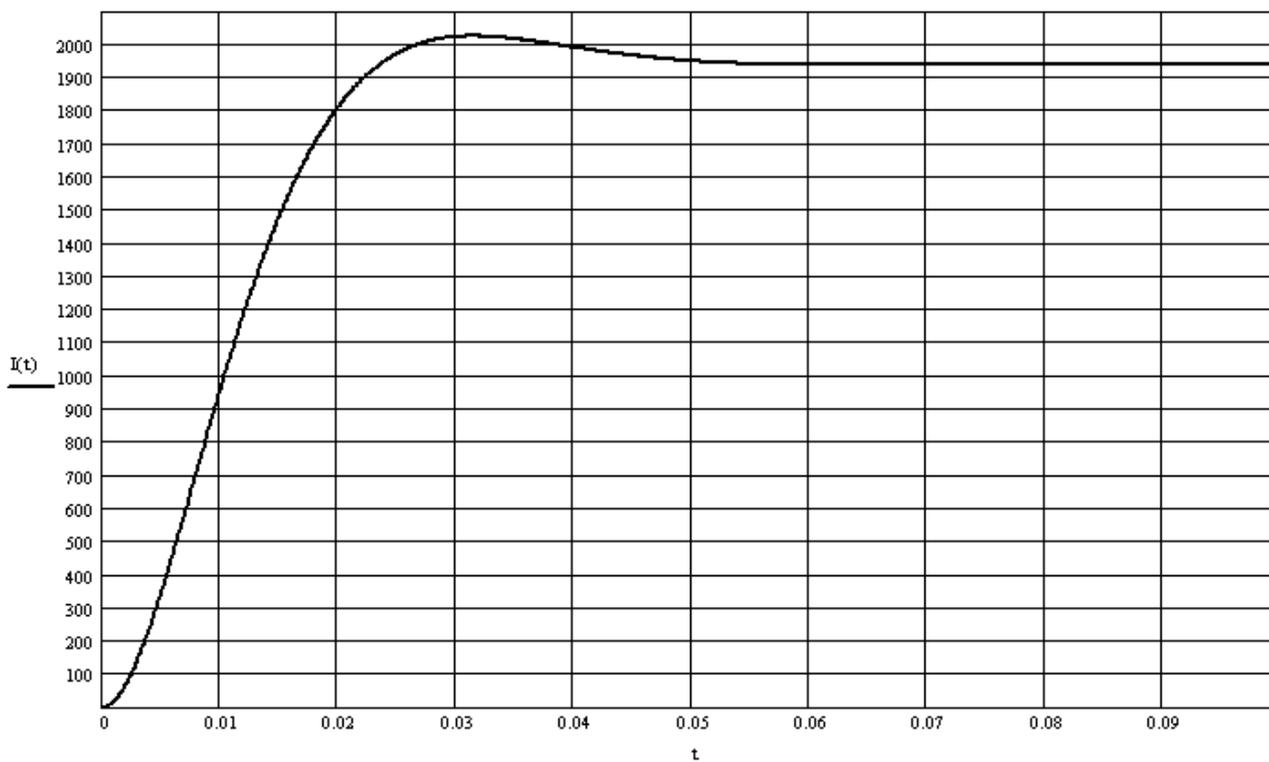


Рис. 3.13. Зміна струму при стрибку завдання на вході регулятора струму

### Похідна струму

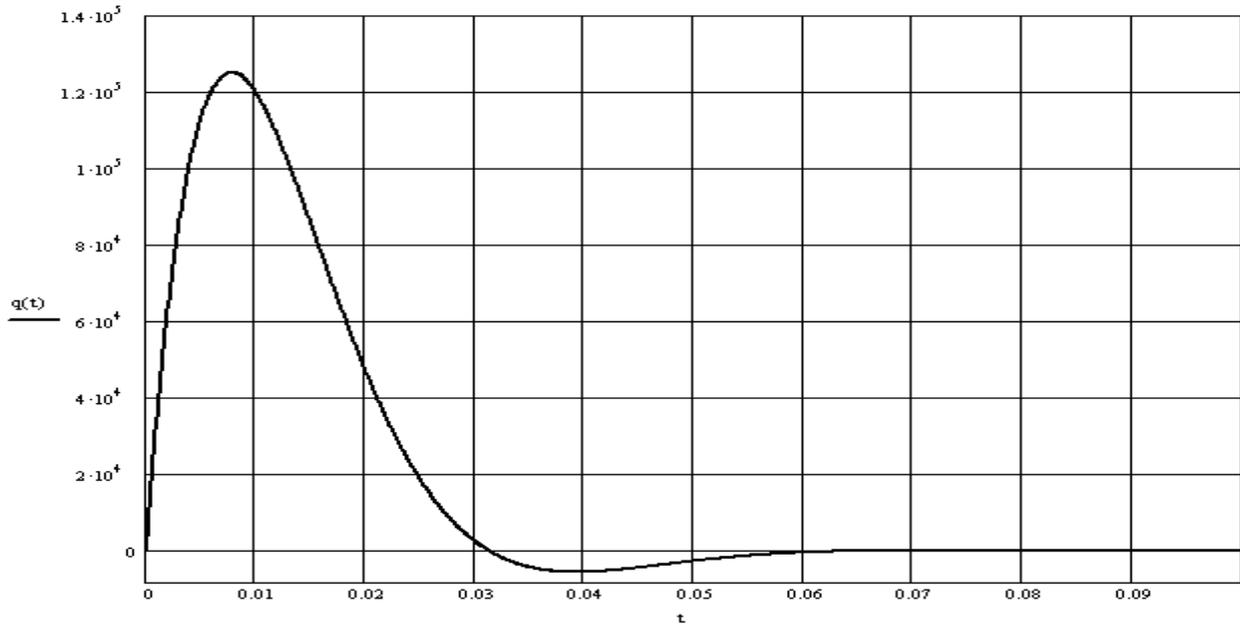


Рис. 3.14. Зміна похідної струму при стрибку завдання на вході регулятора струму

Прирівнявши похідну струму нулю, знайдемо:

$$\frac{t_{01}}{T_T} = \pi \quad (3.29)$$

де  $t_{01}=0,0314$  (с) – момент часу, що відповідає першому максимуму струму.

Отже, максимальне значення струму дорівнює:

$$I_{MAX} = I_3 \times (1 + e^{-\pi}) = 2025 \text{ (A)}.$$

Перерегулювання струму двигуна:

$$\delta j\% = \frac{I_{MAX} - I_3}{I_3} \times 100 = 4,42\% .$$

Для визначення максимальної величини похідній струму знайдемо другу похідну струму й застосуємо аналогічний метод:

$$\frac{d^2i}{dt^2} = \frac{4I_3}{\sqrt{2}T_T^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_T}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{T_T}\right), \quad (3.30)$$

$$\frac{t_{02}}{T_T} = \frac{\pi}{4},$$

де  $t_{02}=0,0079$  (с) – момент часу, що відповідає першому максимуму похідній струму.

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{MAX} = \frac{\sqrt{2}I_3}{T_T} \cdot e^{-\frac{\pi}{4}} = 0.64 \cdot \frac{1940}{0,01} = 145 \left(\frac{\kappa A}{c}\right)$$

$145 \kappa A/c < 400 \kappa A/c$  – отже немає необхідності в обмеженні у швидкості наростання струму.

Відносна похибка регулювання струму:

$$\frac{\Delta I}{I_{MAX}} = \frac{1}{1 + \frac{T_M}{T_T}} = \frac{1}{1 + 35} = 0,028 = 2,8\%.$$

Перевіримо контур струму на стійкість по діаграмі Боде. Для цього складемо структурну схему контуру струму:

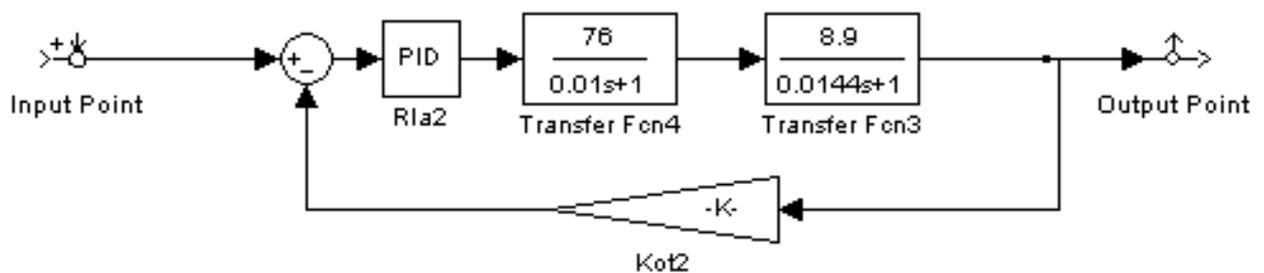
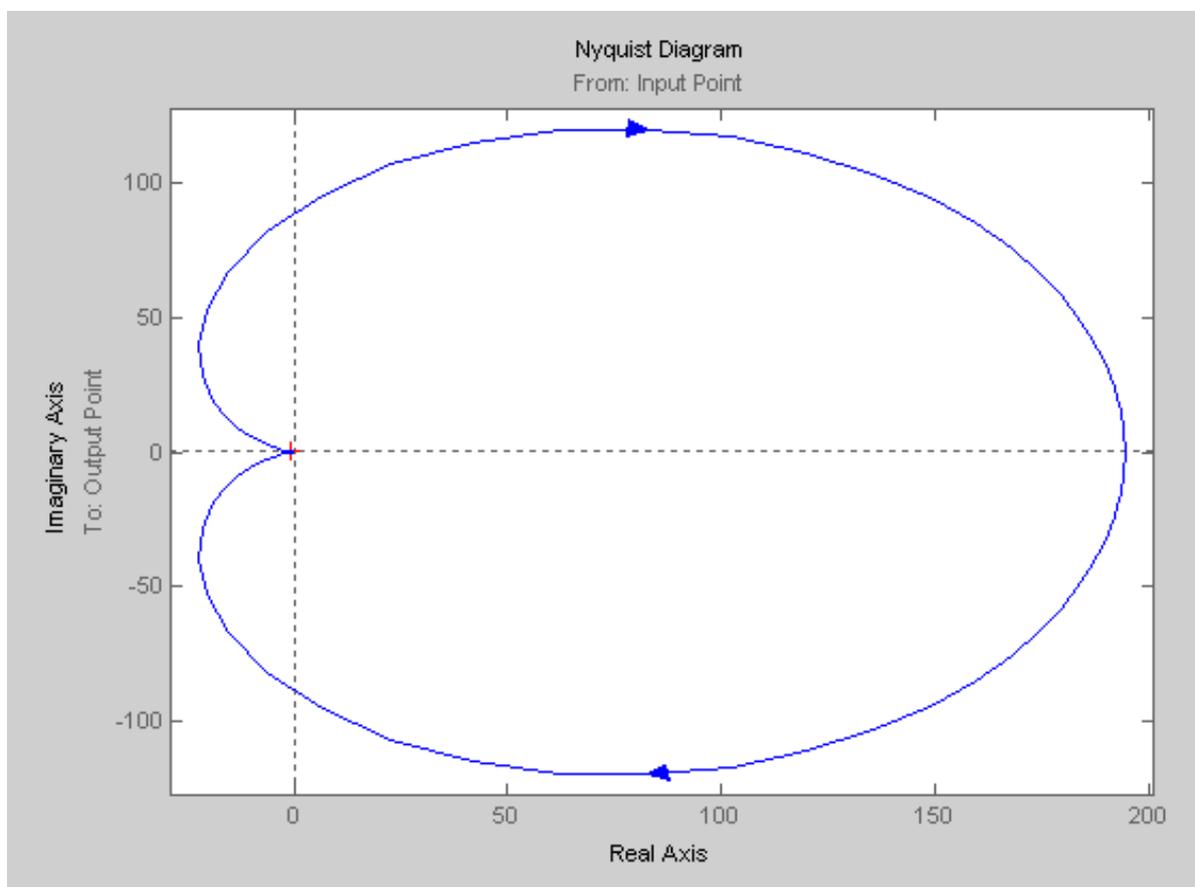
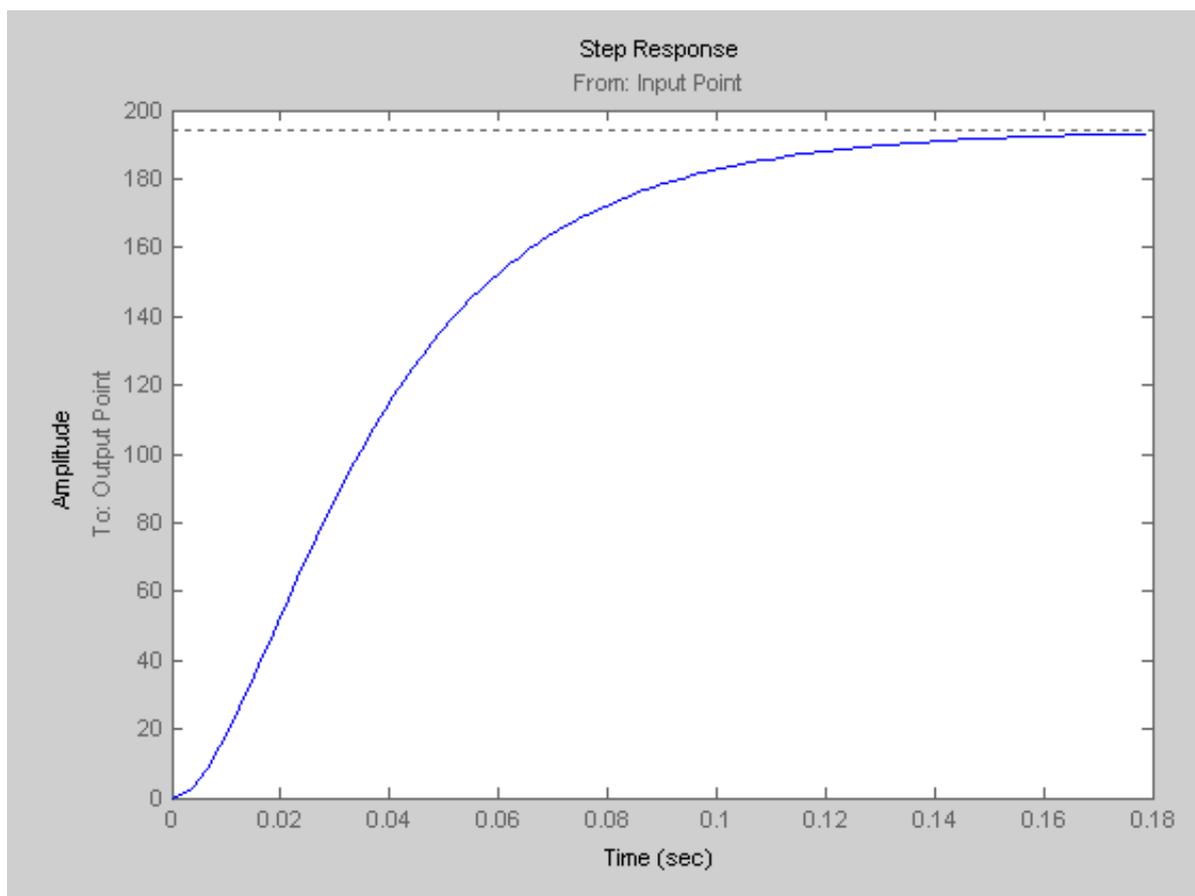
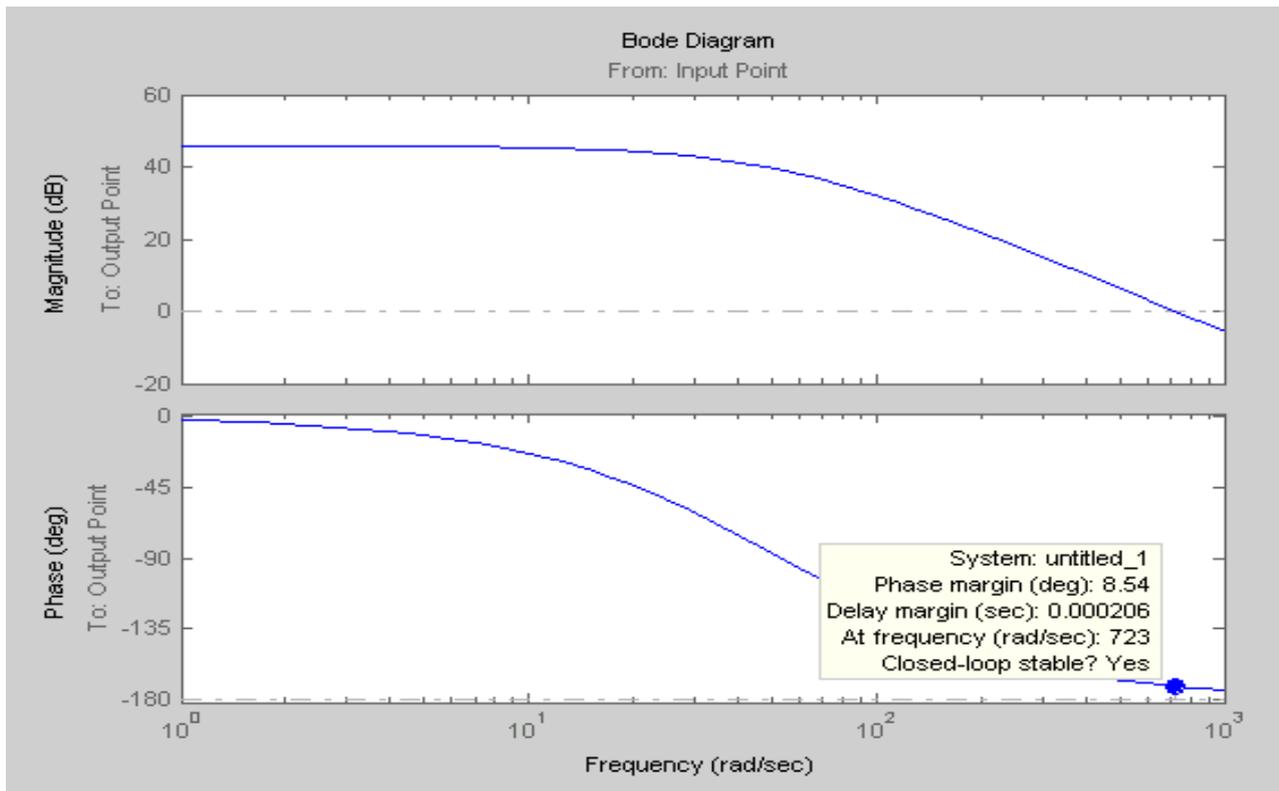


Рис. 3.15. Контур струму

## Перехідні процеси, реалізовані в середовищі MATLAB 6.0





### 3.6.4. Розрахунок параметрів регулятора швидкості

Стандартне налаштування контуру регулювання швидкості на модульний оптимум широко використовуються на практиці у зв'язку із простотою технічної реалізації й сприятливим для більшості електроприводів характером протікання перехідних процесів. Однак, точність регулювання може бути нижчою, ніж у розімкненій системі електропривода, і не задовольняти заданим вимогам. У цих випадках в багатоконтурних уніфікованих структурах регулювання необхідно виконувати збільшення порядку астатизму системи стосовно впливу навантаження.

Одним з можливих шляхів збільшення точності регулювання швидкості при змінах навантаження є доповнення двоконтурної системи регулювання швидкості, що налагоджений на модульний оптимум, другим контуром регулювання швидкості, налагодженим так само, як і перший.

Забезпечити астатизм за навантаженням при регулюванні швидкості можна без застосування другого контуру регулювання швидкості шляхом

налагодження двоконтурної системи на симетричний оптимум. Для реалізації цього шляху при послідовній корекції контуру регулювання швидкості задаються бажаною передаточною функцією розімкненого контуру у вигляді:

$$W(p) = \frac{1 + 8T_{\mu}p}{8T_{\mu}p} \times \frac{1/K_C}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p + 1)} \quad (3.31)$$

де  $T_{\mu} = 0,01$  - постійна часу контуру струму;

$$K_C = \frac{U_{3C}}{\omega_{MAX}} = \frac{10}{104} = 0,096 \quad - \text{коєфіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.}$$

Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_{OP}(p) = \frac{1/K_T}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1} \cdot \frac{c}{J_{\Sigma}p} \quad (3.32)$$

Практика налагодження регульованих електроприводів показує, що без великої похибки для оцінки якості регулювання в знаменнику (3.32) можна відкинути член другого порядку, при цьому:

$$W_{OP}(p) = \frac{1/K_T}{2T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{c}{J_{\Sigma}p} \quad (3.33)$$

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W(p) = \frac{K_T \cdot J_{\Sigma}}{K_C \cdot c} \cdot \frac{1 + 8T_{\mu}p}{32T_{\mu}^2p} = \frac{1 + T_Kp}{T_i p} \quad (3.34)$$

Отримано передатну функцію ПІ-регулятора швидкості.

$$T_i = \frac{32 \cdot T_{\mu}^2 \cdot K_C \cdot c}{K_T \cdot J_{\Sigma}}, [c] \quad (3.35)$$

$$T_i = \frac{32 \cdot 0,0001 \cdot 0,096 \cdot 4,28}{0,0051 \cdot 622,5} = 0,000414 \text{ (с)}$$

$$T_K = 8T_\mu = 8 \cdot 0,01 = 0,08 \text{ (с)}$$

$$K_{II} = \frac{T_K}{T_i} = \frac{0,08}{0,000414} = 193.$$

Зображення помилки регулювання при змінах керуючого впливу в такій системі:

$$\Delta\omega_{3C}(p) = \frac{\omega_{03C}(p) \cdot 32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1) + 8T_\mu p + 1} \quad (3.36)$$

Рівняння (2.84) показує, що завдяки астатизму другого порядку стала динамічна помилка в режимі лінійного наростання завдання  $\omega_0 = \varepsilon_3 t$  відсутній із цієї причини двоконтурну систему з ПІ-регулюванням швидкості називають дворазово-інтегруючою системою й застосовують у тих випадках, коли важливо мати високу точність відпрацювання змін сигналу завдання й збурювання.

Перевіримо контур швидкості на стійкість по діаграмі Боде. Для цього складемо структурну схему контур струму:

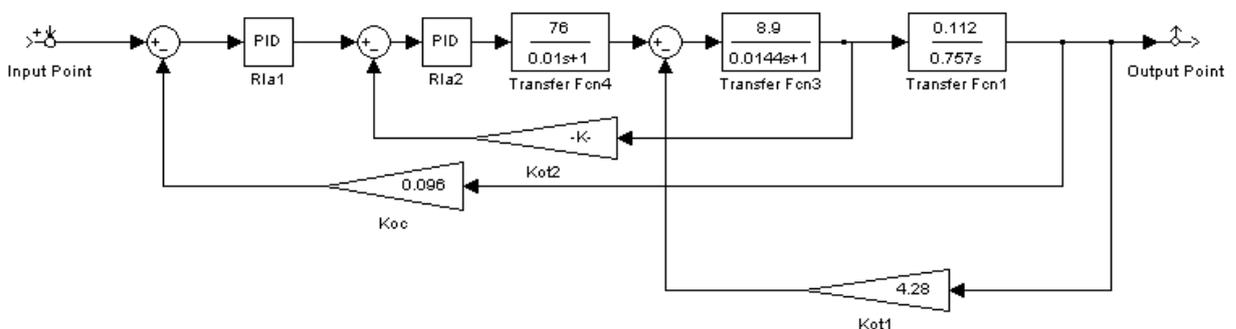
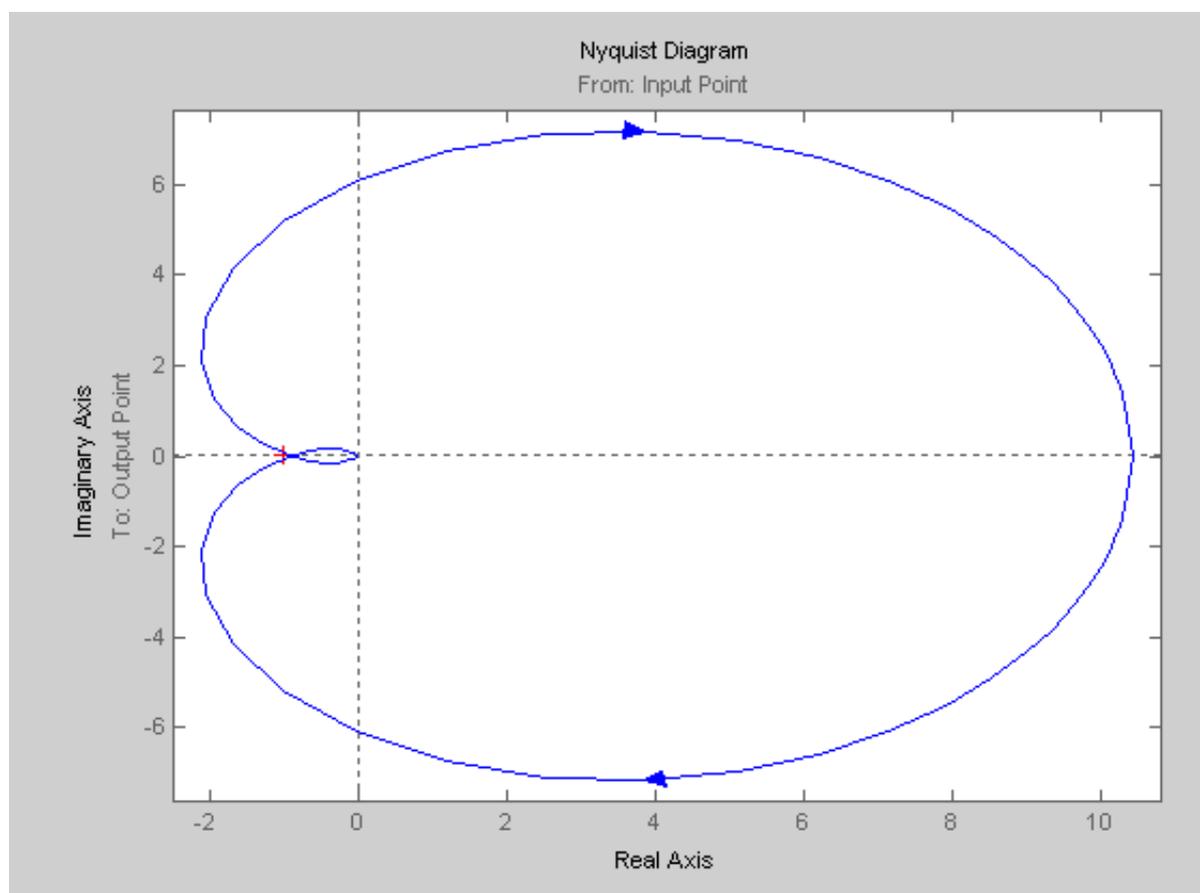
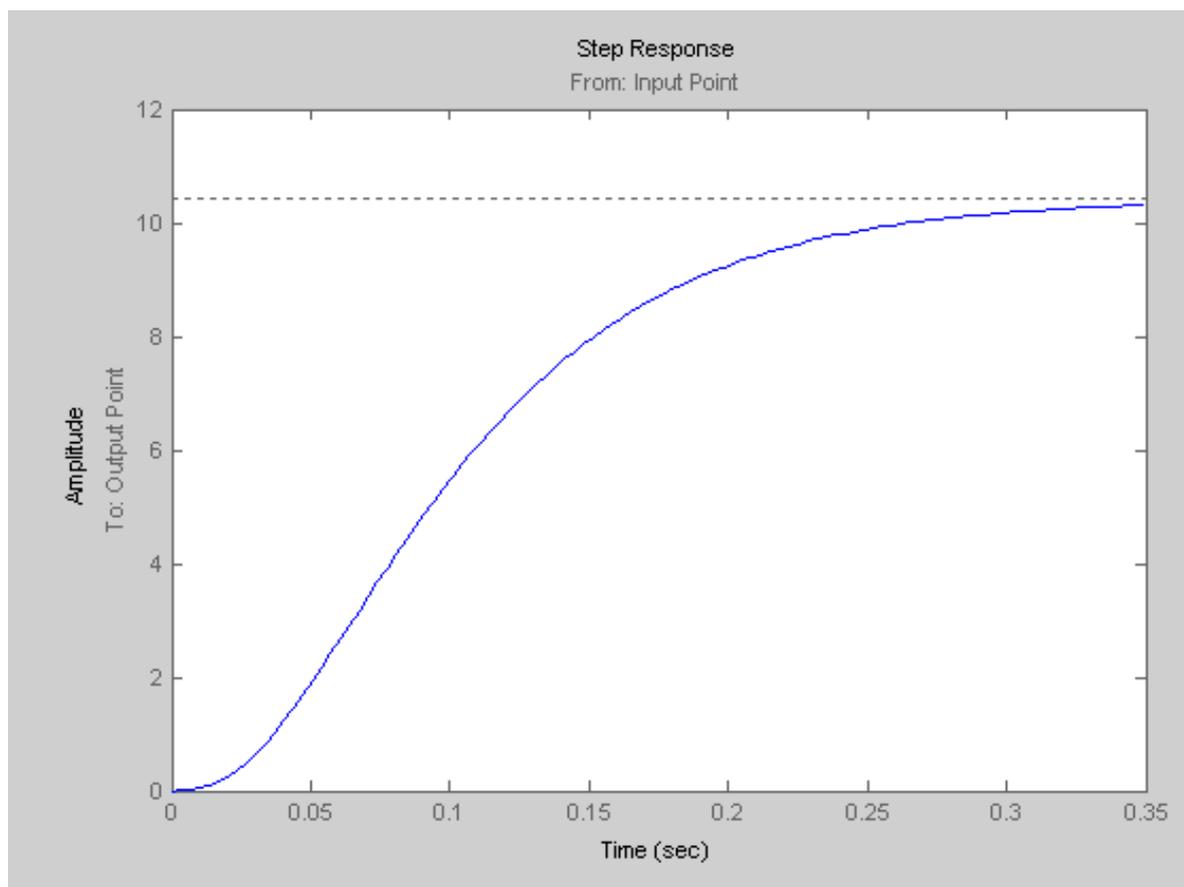
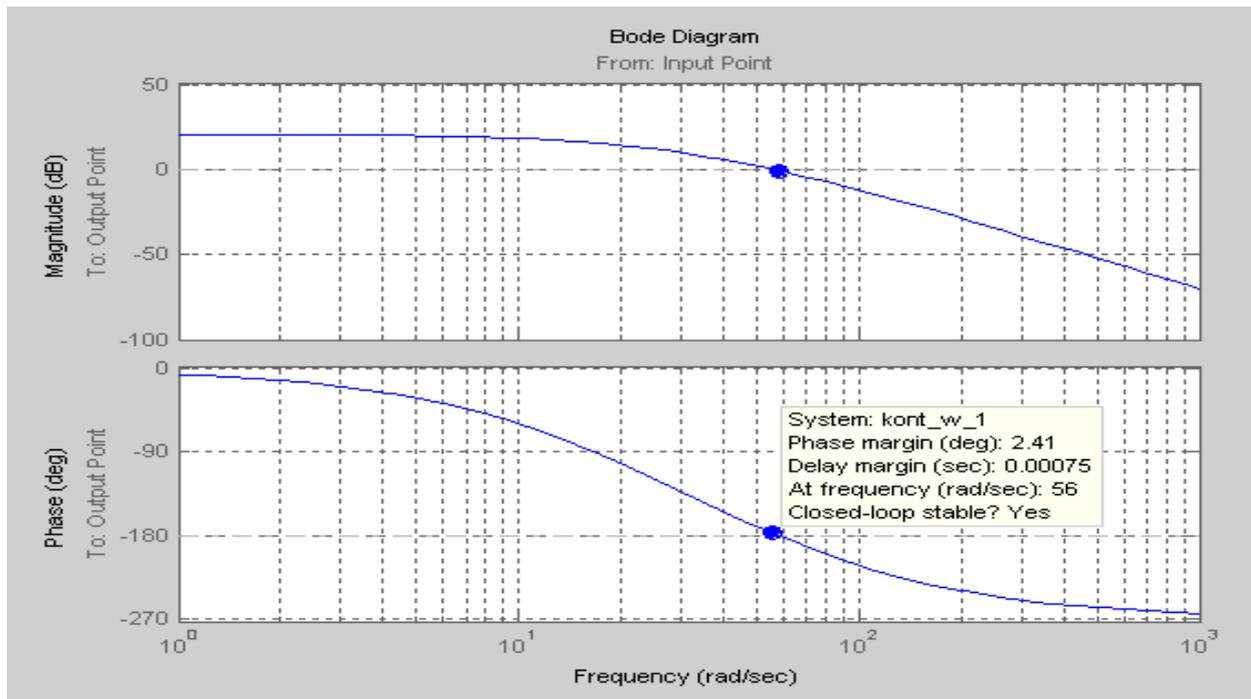


Рис. 3.16. Контур швидкості

## Перехідні процеси, реалізовані в середовищі MATLAB 6.0





### 3.6.5. Розрахунок параметрів регулятора струму збудження

Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_{OP}(p) = \frac{K_2(T_{BT}p + 1)}{R_B(T_{B\Sigma}p + 1)(T_{II}p + 1)} \quad (3.37)$$

де  $K_2 = 0,15 \cdot U_B = 0,15 \cdot 220 = 33$  – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача ланцюга збудження;

$T_{BC} = 0,0939$  (с) – постійна часу контуру вихрових струмів;

$T_{B\Sigma} = T_B + T_{BC} = 0,0939 + 0,939 = 1,033$  (с) – сумарна постійна часу ланцюга збудження;

$T_{II} = 0,005$  (с) – постійна часу тиристорного перетворювача ланцюга збудження.

Бажана передавальна функція контуру:

$$W(p) = \frac{(T_{BT} p + 1) K_B}{a_T T_\mu p (T_\mu p + 1)} \quad (3.38)$$

де  $K_3 = \frac{I_{3B}}{I_{BH}} = \frac{15}{56} = 0,268$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму

збудження;

$T_\mu = 0,005$  (с) – некомпенсуюча мала постійна часу;

$a_T = 2$  – співвідношення постійних часу контуру струму (модульний оптимум);

$T_{C3} = 0,01$  (с) - постійна часу контуру струму збудження.

Включення аперіодичної ланки з постійної часу  $T_{BT}$  у канал зворотного зв'язку контуру струму збудження забезпечує форсування струму, необхідну для компенсації аперіодичної ланки з такою ж постійною часу в контурі ЕРС.

Передавальна функція регулятора струму збудження:

$$W(p) = \frac{R_B (T_{B\Sigma} p + 1)}{a_T K_2 K_B T_\mu p} \quad (3.39)$$

Одержали ПІ-регулятор струму збудження.

$$T_i = \frac{a_T K_2 K_B T_\mu}{R_B} = \frac{2 \cdot 33 \cdot 0,268 \cdot 0,005}{4,046} = 0,0218 \text{ (с)}$$

$$K_{II} = \frac{T_{B\Sigma}}{T_i} = \frac{1,033}{0,0218} = 47,4$$

Передаточна функція замкненого контуру регулювання струму збудження має вигляд:

$$W_3(p) = \frac{T_{BT} p + 1}{K_B (a_T T_\mu p (T_\mu p + 1) + 1)} \quad (3.40)$$

### 3.6.6. Розрахунок параметрів регулятора електрорушійної сили

Передавальна функція об'єкта регулювання

$$W_{OP}(p) = \frac{T_{BT} p + 1}{K_B (a_T T_\mu p (T_\mu p + 1) + 1)} \times \frac{K_3}{T_{BT} p + 1};$$

$$W_{OP}(p) = \frac{K_3}{K_B (a_T T_\mu p + 1)} \quad (3.41)$$

де  $K_3 = K_\Phi \cdot K_E \cdot \omega$  – коефіцієнт підсилення;

$K_\Phi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_B}$  – коефіцієнт нахилу кривої намагнічування;

$K_E = 0,05$  – конструктивна постійна двигуна.

Бажана передавальна функція:

$$W(p) = \frac{(T_J p + 1) / K_H}{a_\Omega T_{TB} p (T_{TB} p + 1)} \quad (3.42)$$

Залежність коефіцієнта  $K_3$  від швидкості обертання спричиняється нелінійність контуру регулювання ЕРС. Внаслідок цього передавальна функція регулятора ЕРС відповідає оптимальному налагодженню контуру лише при одному певному («налаштованому») значенні швидкості обертання. Для всіх інших значень швидкості налагодження контуру регулювання ЕРС буде відрізнятись від оптимальної. При чому при збільшенні швидкості коливання контуру регулювання ЕРС зростає, тому оптимальне налагодження контуру звичайно роблять при максимальній швидкості обертання тобто для

$$K_3 = K_\Phi \cdot K_E \cdot \omega_{\max}.$$

У цьому випадку для всіх інших значень швидкості обертання ступінь коливання контуру регулювання ЕРС буде нижче.

Передавальна функція регулятора ЕРС (ПІ-регулятор):

$$W(p) = \frac{(T_{Яp} + 1)K_B}{a_E T_{TB} K_3 K_H p}, \quad (3.43)$$

де  $K_H = \frac{E_3}{E_H} = \frac{15}{557} = 0,026$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по ЕРС;

$a_E$  – співвідношення постійних часу контуру регулювання ЕРС.

Визначимо параметр  $a_E$  виходячи з умови одержання перерегулювання ЕРС не більше 10%, тобто  $\delta E = 0.1$ .

Час розгону приводу до номінальної швидкості при  $M = M_{\text{хх}}$  відповідно до технологічних вимог не більше шести секунд.

$T_S = T_{TB} + T_{Я} = 0,01 + 0,004 = 0,014$  (с) – сумарна постійна часу контуру збудження;

$$a_E = \frac{\delta E \cdot t_{II}}{D \cdot T_S} = \frac{0,1 \cdot 307}{5,8} = 4,3.$$

$$K_3 = K_{\phi} \cdot K_E \cdot \omega = 0,9 \cdot 0,05 \cdot 104 = 4,7.$$

Параметри ПІ-регулятора ЕРС:

$$T_i = \frac{a_E T_{TB} K_3 K_H}{K_B} = \frac{4,3 \cdot 0,01 \cdot 4,7 \cdot 0,026}{0,268} = 0,024$$
 (с).

$$K_{II} = \frac{T_{Я}}{T_i} = \frac{0,004}{0,024} = 0,17.$$

### 3.7. Висновки

Застосування контролерного програмного керування станом і установка сервосистем на всіх основних приводах забезпечили можливість оптимізувати режими прокатки матеріалу. Заданий графік подачі заготовки реалізується через керований головний привід, що обертає валки. Заданий графік деформації заготовки реалізується за допомогою гідравлічних сервоклапанів, що працюють на циліндри гідронатисного пристрою. Всі основні операції стану автоматизовані; управління технологічним процесом забезпечено зручними

засобами операторського інтерфейсу, у тому числі засобами відображення різноманітних відеокадрів і чіткої форми.

Оператору немає необхідності запам'ятовувати або записувати вдалі програми прокатки – вони запам'ятовуються в базі даних і легко витягуються за запитом. Завдяки повній автоматичній архівації технологічних параметрів оператор має можливість зробити вибірку по будь-якому заданому критерію.

Впровадження представленої в статті системи АСУ технологічного процесу мінімізувало кількість забракованих заготовок, енергоспоживання стану, втрати часу обслуговуючого персоналу. Використовувані в системі засоби управління і відображення визнані обслуговуючим персоналом замовника цілком зручними для роботи. Основу високої надійності системи заклали застосування технічних і програмних засобів провідних світових та кращих вітчизняних виробників, а також продуманість і, як результат, коректність розробленого програмного забезпечення.

Автоматизована система управління реверсивним прокатним станом успішно експлуатується декілька років.

## **ВИСНОВКИ**

У ході виконання магістерської роботи одержані знання і навички по постановці задач керування, проектування функціональних схем прокатки металу і схем функціонування основних задач, проаналізований технологічний процес, вибрано структуру і тип системи, засоби автоматизації і описано функціональні схеми, надходження сигналів в і їхня обробка.

Так як оптимізація була проведена на об'єкті шляхом заміни електродвигуна GMMN 7121-320 на новий МШС1250-800В3, був складений кошторис вартості робіт з розробки системи і визначений термін окупності нового обладнання.

Модернізація, що була проведена на об'єкті шляхом заміни електродвигуна і тиристорного перетворювача, дозволила збільшити продуктивність виробництва, а також час міжремонтного періоду збільшився на 50%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Онушко В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 536с.
2. Шебітченко В.Г. Датчики і регулятори в автоматизованому електроприводі: навчальний посібник / В.Г. Шебітченко, О.В. Шефер, М.К. Бороздін. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 88с.
3. Шебітченко В.Г. Електротехніка. Частина 1. Електротехніка та основи електронних пристроїв: навчальний посібник / В.Г. Шебітченко, О.В. Шефер, М.К. Бороздін. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 141с.
4. Шефер О.В. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: навчальний посібник / О.В. Шефер, В.Г. Шебітченко. Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 195с.
5. Бороздін М.К. Заміна системи головного привода на тиристорний перетворювач на прокатному стані. Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської наукової-практичної конференції <<Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика>> 4 листопада 2022 р. – 52 с.
6. Галай М.В. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник / М.В. Галай. – Полтава: вид-во "Полтава", 1998. – 470 с.
7. Галай М.В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматизованого керування: Навчальний посібник / М.В. Галай. – Полтава: ПДТУ, 2002. - 220 с.
8. Шульга О.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Системи керування електроприводами" / О.В. Шульга. – Полтава: ПДТУ, 2001. – 15 с.

9. Онушко В.В. "Двигуни постійного струму": Посібник з курсового проектування з дисципліни "Електричні машини" / В.В. Онушко. – Полтава: ПДТУ, 2001. – 81 с.
10. Структура российского экспорта и импорта проката чёрных металлов и труб в январе – сентябре 2008 г. Информация корпорации "Чермет"// Производство проката. – 2009. – № 2, – 43 с.
11. Королёв А. А. Конструкция и расчёт машин и механизмов прокатных станов: учебник для вузов / А.А. Королёв. – М.: Металлургия, 1969. – 464 с.
12. Выпуск промышленной продукции крупнейшими предприятиями чёрной металлургии Российской Федерации в январе – сентябре 2008 г. Информация корпорации "Чермет"// Производство проката – 2009. – № 1, – 42 с.
13. Перель Л. Я. Расчёт, проектирование и обслуживание опор: Справочник / Л.Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1983 – 543 с.
14. Грудев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М.: Металлургия, 1994. – 656с.
15. Башарин А.В. Управление электроприводами / В.И. Башарин, В.А. Новиков. – Л.: Энерггоиздат, 1982. – 392 с.
16. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоиздат, 2001.
17. Тимошенко А.В. Исследование динамических режимов приводов рабочих клеток прокатных станов / А.В. Тимошенко, А.А. Пушкин, Г.В. Колесникова. – Краматорськ: ДДМА. – 2008. – 340 с.
18. Челюсткин А.Б. Автоматизация процессов прокатного производства / А.Б. Челюсткин. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
19. Туманов М.П. Технические средства автоматизации и управления. Цифровые средства обработки информации и программное

- обеспечение: учебное пособие / М.П. Туманов. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2005. – 71 с.
20. Модернизация комплекса систем автоматического управления для пятиклетевого стана «1700» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2006. URL [http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/6\\_10\\_stan-1700.pdf](http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/6_10_stan-1700.pdf).
21. Система автоматического регулирования плоскостности полосы пятиклетевого стана «1700» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2007. URL [http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/ASRjpolosi\\_stana\\_1700.pdf](http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/ASRjpolosi_stana_1700.pdf).
22. Регулирование плоскостности полосы // FRIEDRICHVOLLMER.DE/RU: Официальный сайт Vollmer GmbH: КИП и автоматика. 2008. URL [http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit\\_r.html](http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit_r.html)
23. Измерение плоскостности полосы // FRIEDRICHVOLLMER.DE/RU: Официальный сайт Vollmer GmbH: КИП и автоматика. 2008. URL [http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit\\_m.html](http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit_m.html)
24. Бодров Ю. В. Применение АСУТП для совершенствования процессов непрерывной прокатки труб / Ю.В. Бодров, Д.В. Овчинников, А.А. Богатов и др. // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова / Под. ред. А.А. Восканьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 157 с.

# ДОДАТКИ

## 1 Analytical part

The area of the cages is designed for rolling the following finishing profiles:

Small variety in bars:

Round steel 12...13...13 mm GOST 2590-71

Tetrahedrons 12...29...29 mm GOST 2591-71

Hexagons 12...31...31 mm GOST 2879-69

Strips 6...28...28x30...120 mm GOST 103-76

Small variety in riots

Round steel 12...50...50 mm GOST 2590-71

Tetrahedrons 18...35...35 mm GOST 2591-71

Hexagons 18...38...38 mm GOST 2879-69

Medium grade

Round steel 34...75...75 mm GOST 2590-71

Tetrahedrons 30...65...65 mm GOST 2591-71

Hexagons 32...70...70 mm GOST 2879-69

Strips 20x90...18...18x20 mm GOST 103-76

The area of cages is intended for rolling the following grades of steel:

- Bearing steel (GOST 801-78 (20%));
- Spring steel (GOST 14959-79 (10%));
- Alloy structural steel (GOST 4543-71 (35%));
- Cold-pressed steel (GOST 10702-78).

Rolled blanks according to DST 4693-77 are used as raw material. The maximum strength is 1200 MPa at +20°C. The maximum yield strength at +20°C is 800 Mpa.

Small grade rolling, when the "head" of the workpiece passes through the sensor of the presence of the workpiece, the distribution arrow is turned on, which alternately directs the workpieces to both streams of the roller gang of the furnace-thermostat. Each roller conveyor has 51 rollers with an individual drive. The roller thermostat furnace can have two modes: manual and automatic. The mode is selected using a rocker switch. The manual mode of operation is intended for starting the roller conveyor of the furnace, as well as in case of an emergency.

The motors of the rollers of the roller conveyor when working in the pendulum mode change the direction of rotation every 1.5 revolutions. Control is carried out using a time relay.

Behind the roller conveyor of the thermostat furnace there are scissors, which provide the possibility of cutting the "head" of the rolled sheet. In addition, in the event of a disruption of the rolling process, there is a possibility of emergency cutting. Next, the metal enters the 1st intermediate group of cells of the fine grade line (cells 7F - 10F).

After passing through the first intermediate group of cages of the fine-grade line, the workpiece is fed to four crank shears, which provide cutting of the "head" and "tail" of the roll. The impulse for cutting is issued from the sensor for the presence of metal. Next, the rolling stock goes to the second intermediate group of the fine grade line (cells 11F - 18F) and to the final group of cells of the fine grade line (cells 19F - 24F). Here, depending on the rolling program, automatically operating loop regulators or tables are used. The impulse to turn on the regulator loop behind the 19F cage is supplied from the light barrier at the front end of the workpiece, and to turn it off from the light barrier at the rear end.

The calibrating unit located behind cage 24F is used for calibrating rolled products with a high requirement for profile accuracy when rolling round and

hexagonal steel. If exact tolerances are not required and other profiles are used, then the working cage of the calibrating unit is removed from the rolling stock and replaced with through wiring. After passing through the finishing group of cages, the workpiece enters the refrigerator area.

The design of technological process automation systems requires accounting for the structure of production processes and the features of parametric assessment of their quality. Therefore, a detailed analysis of the equipment and features of specific automated production is required.

A rolling mill is a system of machines and devices for pressure treatment (rolling) of metal ingots. The main working part of the rolling mill includes rotating rolling rolls, between which the metal is deformed. In the rolling mill, there are also devices that transport coils from heating devices to rolls, from one pair of rolls to another (rolling mills), change their position (edge benders and manipulators), cool, straighten, cut, pack into bags or wind into bundles or rolls, mark pumped products.

The ingots enter the rolling mill after crystallization. Before rolling, the ingots are subjected to additional heating in the heating wells of the bloomery. After the heating is completed, the ingots are weighed before rolling, after which they are transported to groups of crimping cages. Blooming's main rolling line includes cages grouped into four groups: mill 1300 - main drive mill, mill 900, mill 700 and mill 500. After rolling on mill 1300 and primary cleaning on 1250-ton shears, the rolling passes through two groups in turn cages: condition 900 (2 cages) and condition 700 (4 cages).

Next, after cleaning the front edge with pendulum scissors, the process operator has the option to either leave the ingot on the main line (to obtain blanks 80 mm square), or transfer the ingot along the slapper field to the bypass line (obtain blanks 150 mm square).

On the main line, the ingot is subjected to further crimping on a group of state 500 cages (at the same time, the cross section of the ingot is reduced to a square with a side of 80 mm), after which the roll is cut into dimensional blanks. Cutting is

carried out without stopping the rolling - in motion. Drum flying shears that rotate automatically are used for cutting. The lengths of the workpieces to be cut off - the rods - are determined by the difference in the speed of the rolling motion and the rotation of the drum of the flying shears. The cut rods are placed in bags (as a rule, up to 26 rods in a bag) and fed to the refrigerators on the outgoing roller conveyors.

At the circumferential line, the ingot is no longer crimped (in the cross-section, the roll has a square with a side of 150 mm, obtained after rolling in the 700 state) and is cut manually by the process operator on 1000-ton shears.

Packages are formed from these bars (the size of the packages is much smaller than on the main line - up to 6 bars), which are also fed to the refrigerators on the exit roller conveyors. Depending on the location of the working cages, rolling mills are divided into the following groups: single-cell, linear multi-cell, sequential, semi-continuous, continuous.

Unicellular states are the simplest. Blooming, slabbing, thick-sheet two-roll, three-roll and four-roll looms, universal looms belong to this group.

For a number of reasons, many profile sizes cannot be obtained in the rolls of one cage. Therefore, multi-cell stands are used much more often, which are built mainly with a sequential, and sometimes with a linear arrangement of cells.

Working cages of linear machines are arranged in one, two, three or more lines, each of which is usually driven by a separate electric motor. Linear machines are non-reversible, they are used as procurement, rail-beam, grade and wire machines. A significant disadvantage of these states is the same frequency of rotation of rolls in all cages of a separate line, which prevents an increase in the rolling speed as the roll length increases. This leads to a loss of metal temperature, limits the mass of the workpiece and the productivity of the lathes.

A significant increase in the productivity of rolling mills can be achieved with the sequential arrangement of cages, the number of which is equal to the number of passes when pressing the workpiece to bring it to the finished profile. In order to reduce the length of the workshop and better use its area, the cages are arranged in

several parallel lines. On looms with a sequential arrangement of cages, the roll is in only one cage at a time. In this regard, the distance between the cages increases from the first to the last, because the roll length increases. Accordingly, the frequency of rotation of the rolls also increases. Mills of this group are widely used for rolling graded profiles.

## **1.2 State of rolling mill automation**

High-level functions.

REF – communication with other controllers and the upper level of automation;

SEQ - sequence of operations;

REG – minimum tension/loop adjustment;

DRI is an interface with actuators.

High-level functions are divided into two systems:

System 1: draft line and intermediate line (HIV cells (V6V, H7F (V16M))).

System 2: fine line (H7F cage – H24F coke block winder)

High-level REF functions.

The following tasks are solved in the functional logic controller: calculation of cage speeds, control, input of set values from the rolling plan and communication with other functional controllers: SEQ, MTS, DLC, DRI, MILL (auxiliary drives), COOL (refrigerator), HASP (winders) etc.

Input of set values in REF is carried out from the Z/P level from the rolling programs or by operator input at the COROS visualization station. The resulting rolling program contains, among other things, the set value of the linear speeds for the main drives. In REF, the specified values of linear speeds are converted into angular speeds of motor rotation. The calculated and entered rotational speeds are equalized in REF with the parameterized limit values (default 95%) and checked for agreement (increasing material speed). In case of errors, a message is generated

indicating the cell number where the error occurred. The data block containing the error is not used.

If no error message is received, the new rolling plan data is transferred to the next adjustment. REF calculates the rotational speeds of the drive motors (calculating them from the linear velocities of the material). Based on state configuration changes, disabled (inactive) cells are managed by the REF as unpaired cells. Since the system is intended for use at a metallurgical plant, the conditions of which do not allow conducting experiments in industrial conditions with systems whose algorithmic environment does not have a sufficient level of reliability, it is almost impossible to test and debug it in real conditions.

In order to still be able to see the results of the programs without real sensors, I provided the possibility of debugging the programs on a simulator that works without a network. The main software modules have remained unchanged, but instead of a complex with MSCU, servers and networks, an emulator program is used. This program accesses existing static files with databases and, accessing them at the specified time interval and reading the corresponding blocks of information, forms other dynamic files, which are accessed by the main program modules.

For an uncoupled cage ( $n$ ), the given value of the angular speed of rotation in front of this drive ( $n-1$ ) is used. Before the workpiece enters the state line, the REF determines the motor speeds based on the set speed for the leading cage (the last cage in the rolling plan) and the speed ratio based on the speed wedge. Each cage drive participating in the rolling process can be selected by the operator as the leading cage for manual adjustment. For all selected cage drives, starting with the leading cage and all cages in the direction of the furnace, the angular speed setpoints are increased or decreased.

When acting on the drive of the cage, in front of the driving cage, the cascade adjustment always acts in the direction of the furnace, in the opposite direction from the direction of rolling. When affecting the speed of the wire cage, the cascade adjustment increases or decreases the speed of the drive motors of the whole state.

With manual adjustment, based on the speed wedge, REF transmits the settings for all cages to the DRI, then the coefficients providing the speed wedge, with manual adjustment, affect the entire section of the state. DRI cyclically increases the resulting setpoints for the respective actuators. Completion of manual adjustment is carried out either by the operator or when the setpoints in the DRI are reached.

When the operator completes manual adjustment, the REF transfers a block of setpoints to the DRI, with the ramps of all actuators used being the same. If, on the basis of manual adjustment, the ratio of the angular speeds of rotation of two cages changes, then the corresponding ratio of the angular speed of rotation recorded in memory is corrected.

Calculations for minimum tension adjustment (MTS) and loop adjustment (DLC) are performed after passing the workpiece. REF takes over the optimization when adjusting the minimum tension or adjusting the frequency ratio loop and adjusts the block of values containing the ratios of these frequencies.

In the REF, the actual relations of rotation frequencies that existed before the last adjustment are also buffered.

High-level functions of SEQ.

The following tasks are solved in the functional logic controller: monitoring of the workpiece; formation of control teams in accordance with the movement of the workpiece; control of scissors; formation of emergency signals; generation of emergency signals, testing and modeling of photocell signals in simulation mode. SEQ works together with REF, MTS, DLC, DRI, MILL, COOL, HASP and TRACK functional programmable logic controllers.

For example, actions depending on the movement of the material: loop ejector On / Off; the rollers of the traibaparata to raise / lower, etc.

SEQ forms control signals: loop formation / removal (calculation of loop removal signal based on time of loop removal from DLC) "cell loaded" - signal for DLC and MTS. SEQ forms and sends a telegram to TRACK depending on the movement of the material.

High level DLC features.

Digital loop control (Digital Loop Control) implements the formation of 6 loops on the fine-grade line between the H19F cage and the coke block only in automatic mode.

In the state line, the continuously rolling material must be transported so that there is no break in the workpiece. Therefore, the automation system must prepare exact set values.

A loop PI controller is implemented in the system. The output of the regulator is an additional set value of the number of revolutions (limit value:  $\pm 5\%$  of the maximum number of revolutions). It is possible to block the regulator. Immediately after the first workpiece pass, the controller is unlocked by the full working setpoint. The speeds of the cages are recalculated so that the loop is removed after the workpiece exits. In each position of the workpiece, different set values of the loop height are connected.

The height of the loop depends on the material, the geometry of the loop and the speed of movement. At the same time, it is necessary to pay attention that too much height of the loop leads to mechanical instability, and too little height of the loop leads to technical instability of regulation. Actual loop height values are obtained from the loop position sensor and input via the analog input module. The actual loop height values are recalculated before comparing with the specified loop height values.

A wedge of speeds is understood as maintaining a certain ratio of the number of revolutions at a given number of revolutions. The minimum tension and loop regulators work in such a way that the output additional speed setpoint for one drive contains, in addition to the output control value, also the value of the coefficient according to the speed wedge for the previous drive. The value of the coefficient according to the speed wedge when adjusting the minimum tension is taken into account only in the drives that drive the actual workpiece. For drives located behind

the tail of the workpiece, the speed wedge calculation is disabled. Loop adjustment takes place in self-learning mode.

After the first pass, the optimal ratio of the angular speeds of rotation of the drives participating in the loop regulation is recorded in memory and transmitted to a higher-level computer.

There are various auxiliary devices for loop formation. A loop pusher is used to maintain the loop formation in a standing loop. The loop ejector can only function when the material is in both cages. The temporal characteristic of the loop ejector is determined during commissioning. The hinge position sensor is installed in the middle between the guide rollers. At the same time, the sensor should be located in the middle of the maximum height of the loop.

Using a factor of 1.2, the active visible area of the hinge position sensor is set to 80%. That is, an additional zone of reliability is established to account for the position of the loop.

During loop regulation, DELTA loop position sensors are used, type TS 2006V, the scanning angle of the position sensor is 30°.

Reliability features limit additional setpoints. With cascade adjustment, they have no effect on loop adjustment. After manual influence and in emergency situations, all calculated ratios of the number of revolutions are removed.

DRI high-level functions.

The main function of the programmable logic controller DRI is to provide setpoints to the drive and receive information about the state of the drive. The data exchange between the drive and the programmable logic controller is carried out over the PROFIBUS L2-DP network and consists in the exchange of telegrams containing status words or control words. The drive of the cages is implemented on the drive for direct current motors of independent disturbance SIMADYN D.

The main advantages of the individual roll drive over the group drive are laid in the increase of the maximum power that can be applied to each roll; reduction of the total moment of inertia per unit of drive power; absence of a gear cage, loss of

power in which can reach 5% of the power of the drive; the absence of the need to accurately select the diameter of the rolls. Reducing the moment of inertia, in turn, gives a number of advantages: the duration of rolling is reduced due to an increase in permissible accelerations and decelerations; energy consumption per ton of rolling stock and heating of electric machines is reduced; breakdowns when metal is seized become less dangerous; the gripping speed can be increased, which leads to an increase in the rolling speed and, therefore, to an increase in the state productivity.

The main disadvantages of an individual electric drive in comparison with a group one are: an increase in the number of electrical equipment; complication of the control scheme associated with the need to adjust the speed ratio and equalize engine loads; increasing the size of the mashzall, because the angle of inclination of the spindles should not exceed 6-8 degrees, as a result of which the engines must be moved from the cage to a considerable distance.

The individual roll drive is advisable to use for powerful crimping machines with a roll diameter of 1100-1300 mm. For blooming 1000 mm. it is possible to use both individual and group drives. It is advisable to use a group drive for billet, rail-beam, medium- and small-grade mills [13].

Requirements for an electric motor.

Engines must provide:

- reduced moment of inertia;
- a large range of speed regulation;
- greater overload capacity in a wide range of speed regulation;
- high-quality speed control.

The wide implementation of AC drives with frequency regulation, as well as the requirements of PUE, requires a more detailed consideration of the possibility of using an asynchronous or synchronous drive.

It is not advisable to use a synchronous drive for a drive operating with a shock load and wide speed regulation.

An asynchronous motor with a short-circuited rotor of high power is designed for a supply voltage of 6 - 10 kV, which is a disadvantage. With frequency regulation, a wide range and speed of regulation is provided, but it has a small overload capacity, which, compared to a direct current drive, inevitably leads to a 1.5...2 times increase in engine power, which means a proportional increase in losses in the engine. Therefore, the proposed requirements are best met by a DC motor.

### **1.3. Formulation of the problem**

As a result of the analysis of the state of automation of this production, it can be seen that it would be expedient to optimize the process of loop control in the automated electric drive system. Therefore, in order to do this, during the execution of the master's work, it is necessary to solve the following tasks:

- Form the requirements for the electric drive;
- Justify and choose an electric motor;
- Calculate the elements of the thyristor converter;
- Calculate the time constants of the object of regulation;
- Calculate static mechanical characteristics;
- Calculate the dynamic characteristics of the electric drive;
- Perform simulation:
  - a) technological load;
  - b) rolling cage;
  - c) loop regulation process;
  - d) electric drives of rolling cage and loop.
- Synthesize the management system;
- Calculate the economic efficiency of the given modernization.

### **1.4. Conclusions by section**

Increasing the production of rolled steel, improving its quality and reducing the cost price was one of the most important tasks of the national economy. At the same time, solving this problem by building new production enterprises required significant expenses from the national economic budget and considerable time: for example, the construction of a plant with a capacity of 5 million tons of rolled steel per year was estimated at 650-700 million rubles without the costs of residential and communal construction.

Due to this, measures using internal reserves of production became especially important, since their implementation, at significantly lower costs, would lead to an increase in the volume of production with a simultaneous decrease in the cost of production.

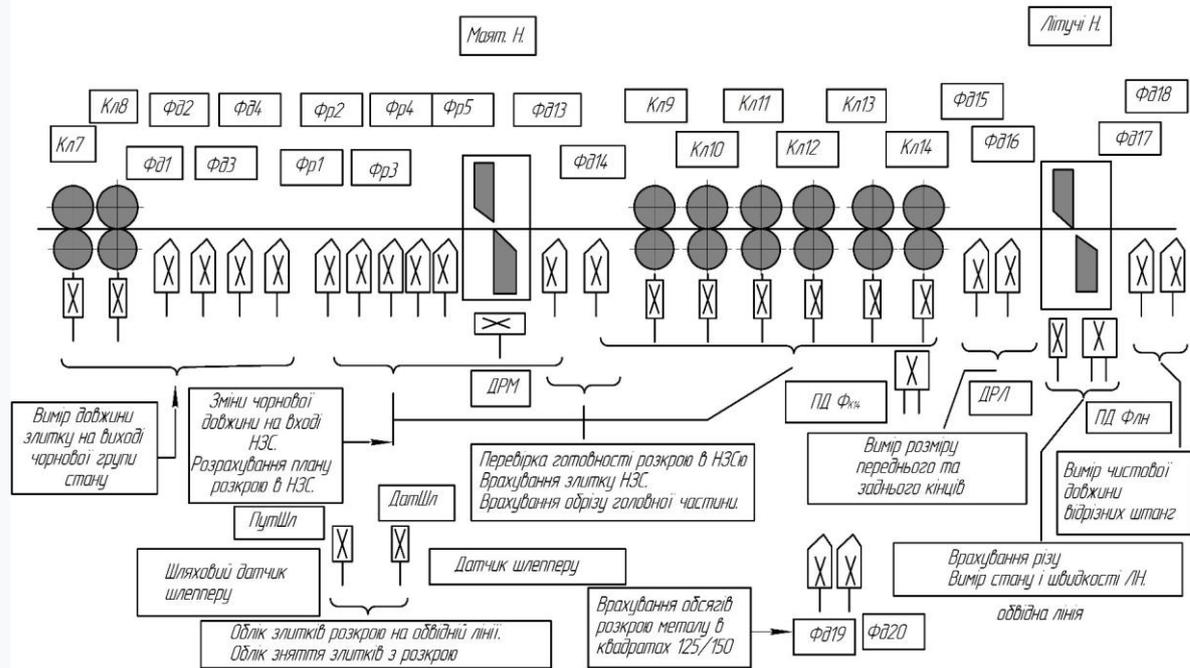
Such measures were the automation of rolling production, carried out in relation to individual units of technological equipment (mills, furnaces, heating wells, etc.), as well as optimization of solving common tasks of operational production management.

The development of KOM in rolling production is carried out to implement the management of technological processes of rolling and cutting of metal rolling in ferrous metallurgy with the aim of reducing metal loss per scrap. In order to obtain the minimal necessary composition of equipment, relatively low cost and sufficient reliability for practical use, these KOMs were developed as specialized machines.

They used a digital way of performing computational and logical operations, which made it possible to obtain the necessary accuracy and stability of solving management tasks, as well as the flexibility of unified structural schemes of KOM, which ensure the possibility of using one type of KOM for the automation of management at different enterprises.

Додаток Б

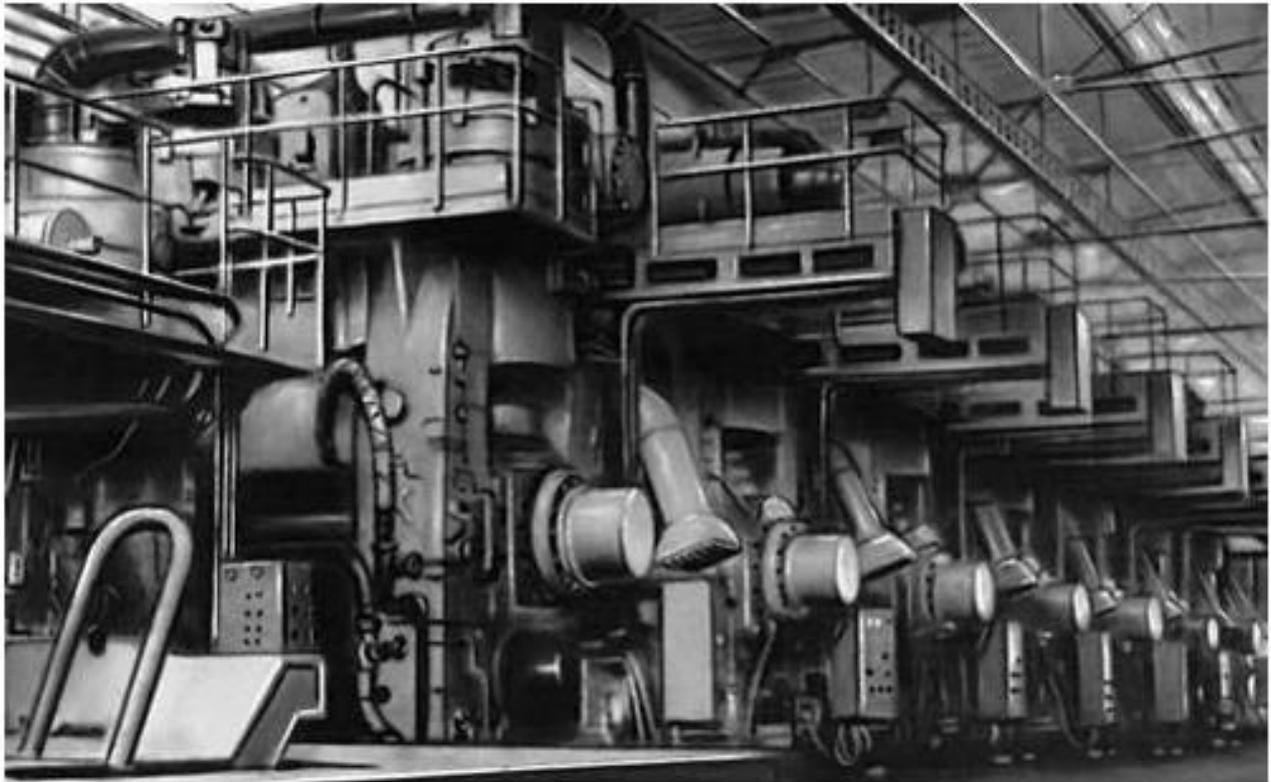
## Розташування та призначення груп датчиків станів.



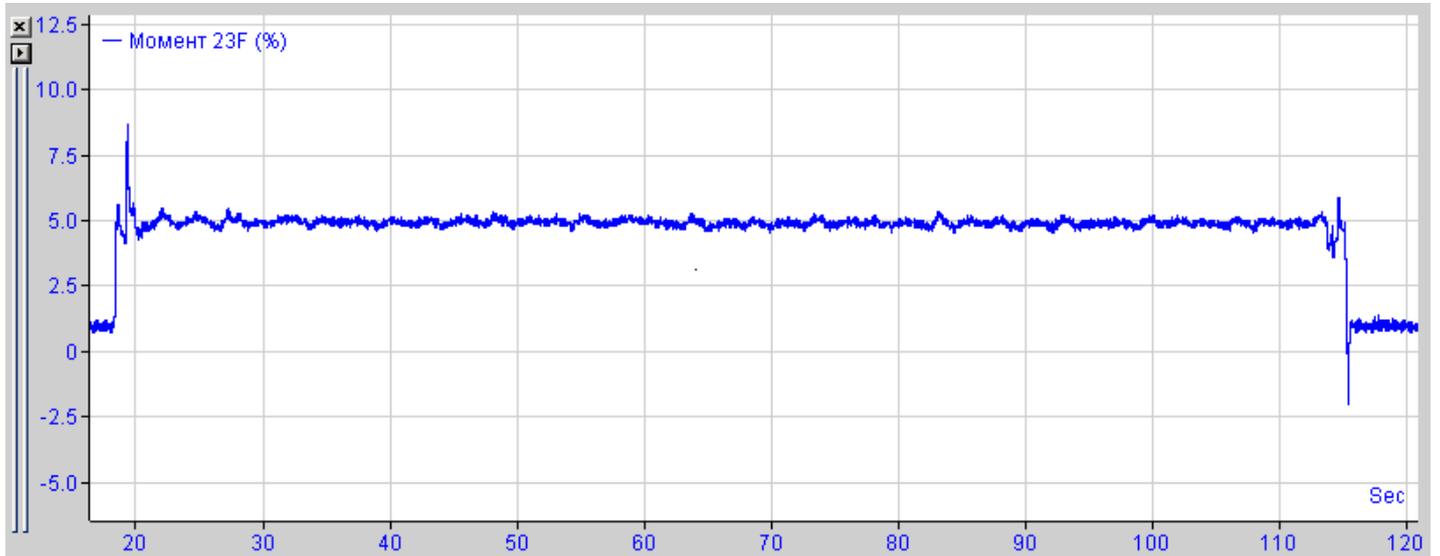
### Скорочення, використані на схемі:

- Кл - кліть
- Фд - фотодатчик
- Фр - фото розпізнавач
- Маят. Н. - маятникові ножиці
- Літуч. Н. - літучі ножиці
- ДРМ - датчик різів маятникових ножиців
- ДРЛ - датчик різів літучих ножиців
- Пут. Шл. - шляховий датчик шлепперу
- Дат. Шл. - датчик шлеппера
- ПДФЛН - шляховий фотодатчик летучих ножиців
- ПДФК14 - шляховий фотодатчик кліти 14

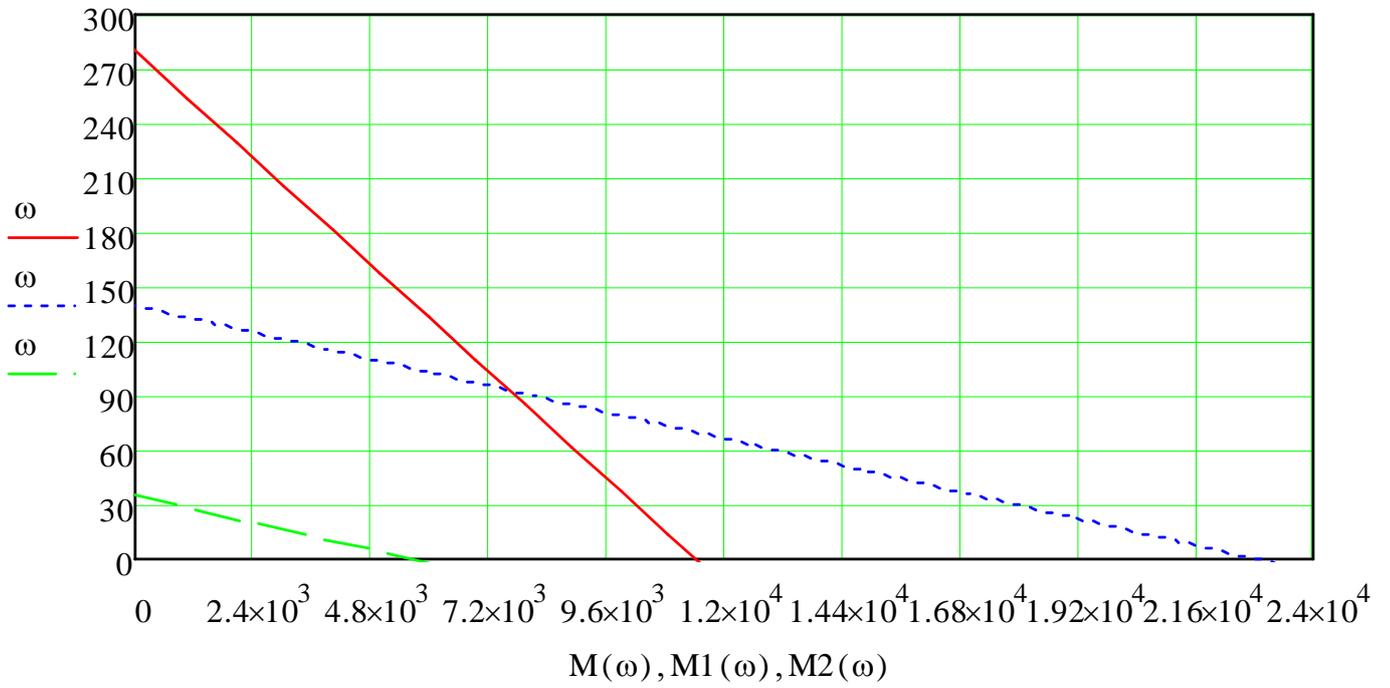
Багатоклітєвий прокатний стан



## Реальна навантажувальна діаграма механізму

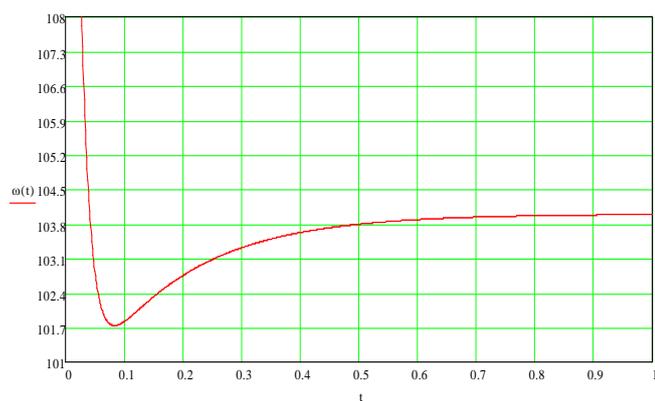


Статичні механічні характеристики

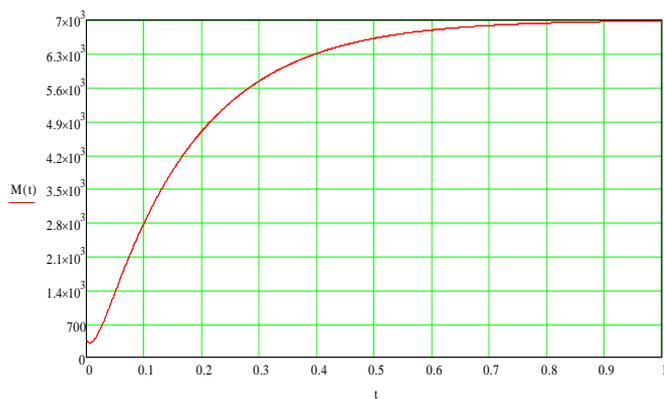


## Графіки зміни моменту та швидкості

### Подача навантаження (захоплення заготовлі)



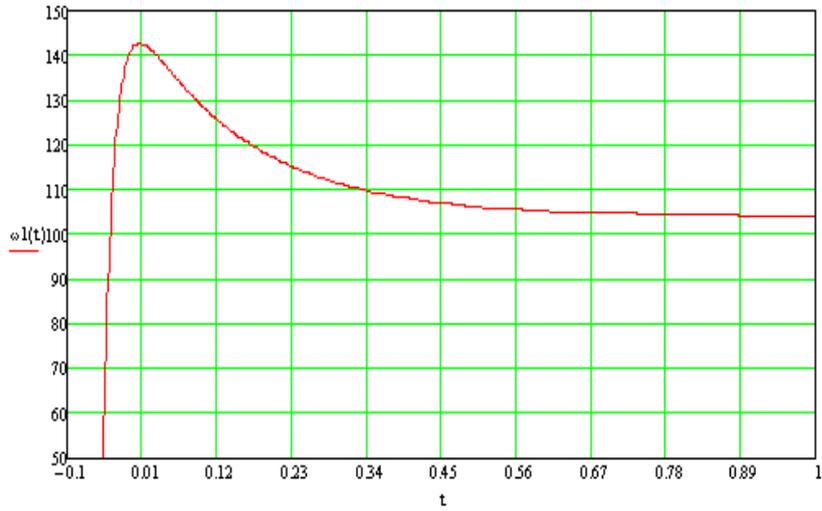
### Графік зміни швидкості



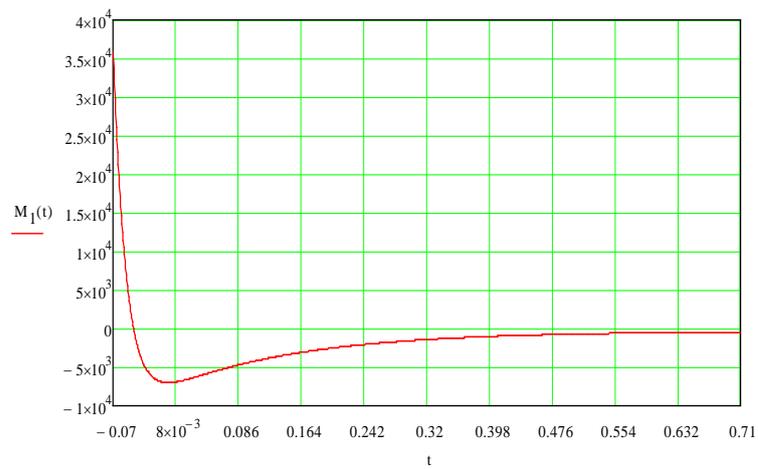
### Графік зміни моменту

### Графіки зміни моменту та швидкості

#### Скидання навантаження (викид заготівлі)

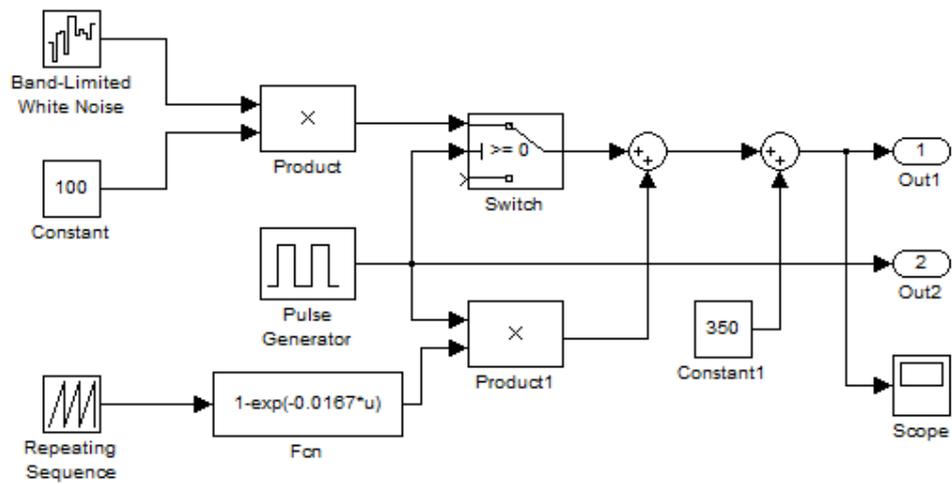


#### Графік зміни швидкості

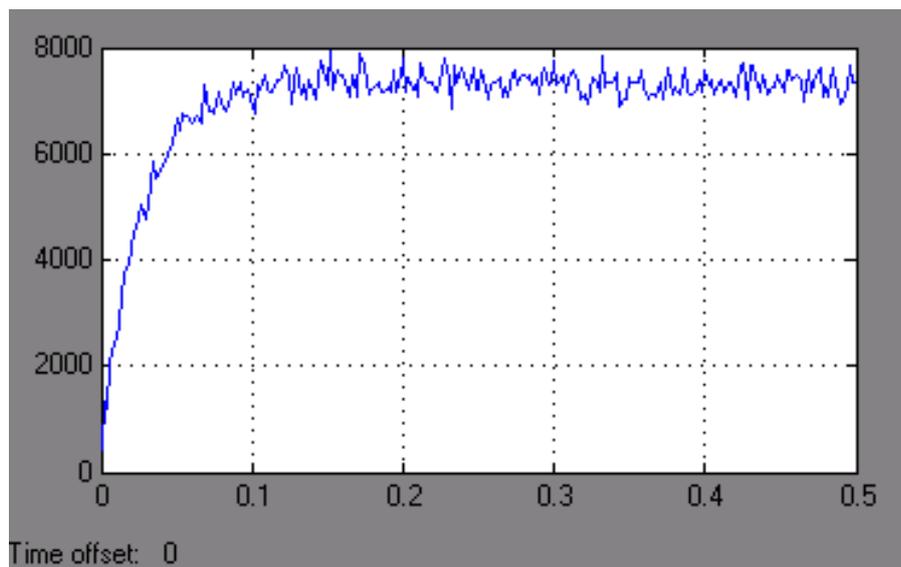


#### Графік зміни моменту

Дослідження технологічного навантаження



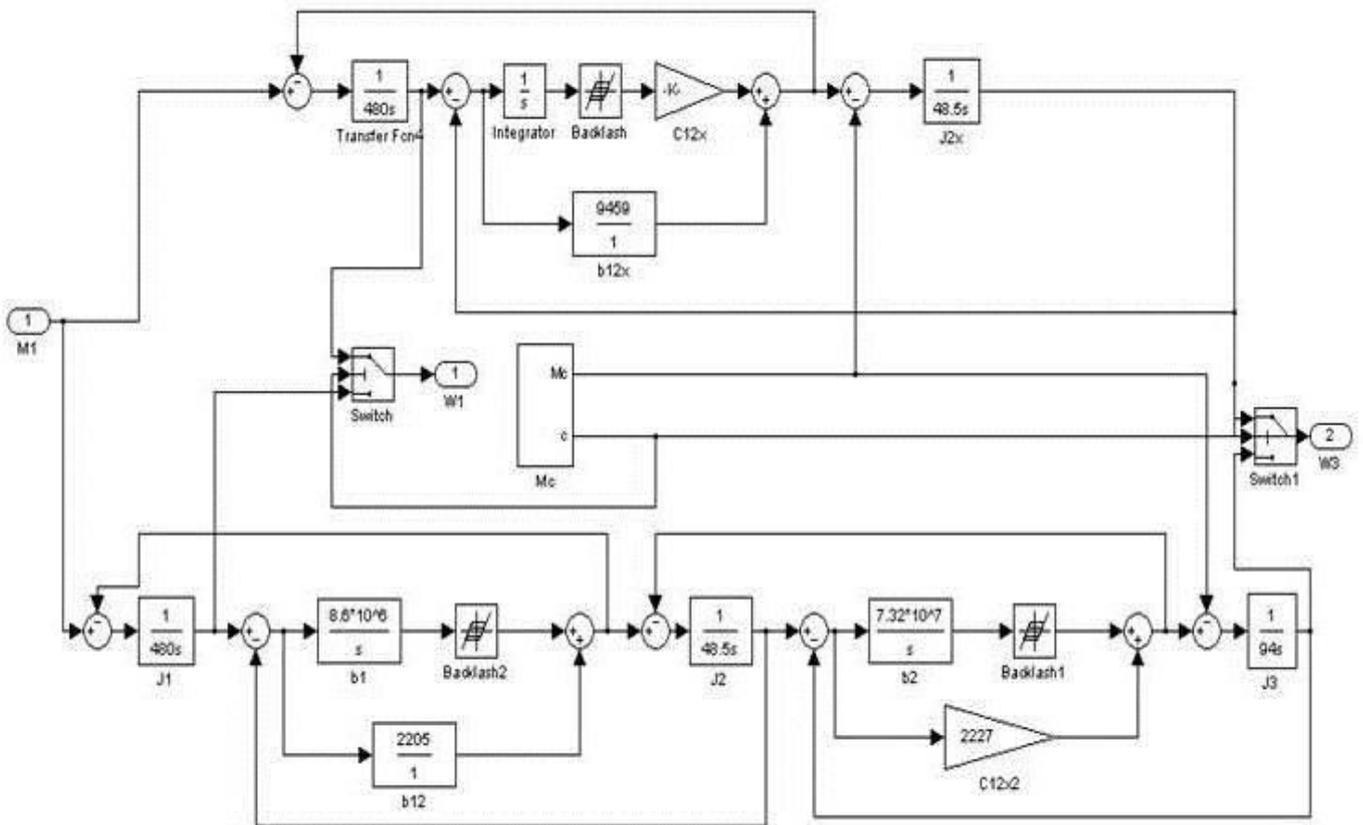
Модель технологічного навантаження



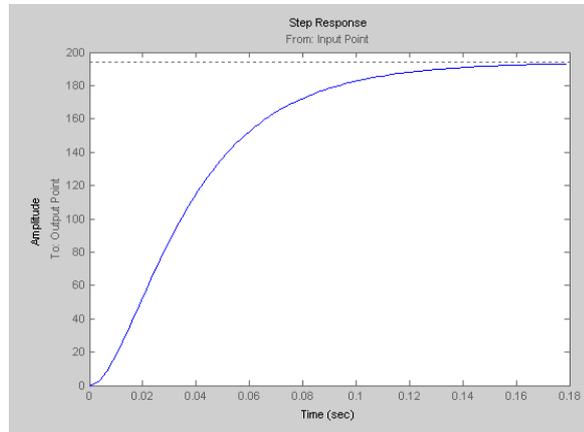
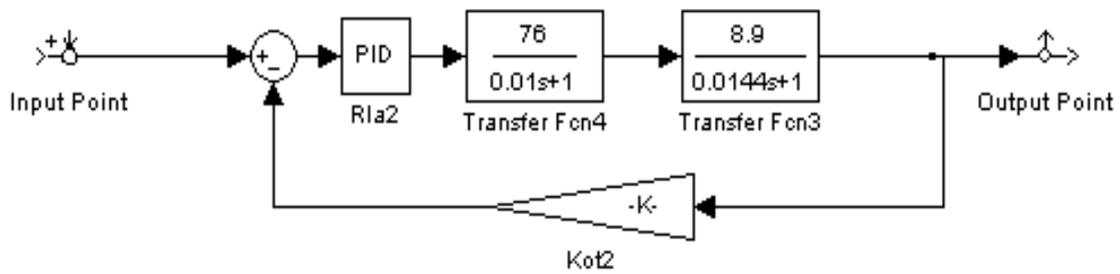
# Зміна моменту прокатки в часі

Додаток 3

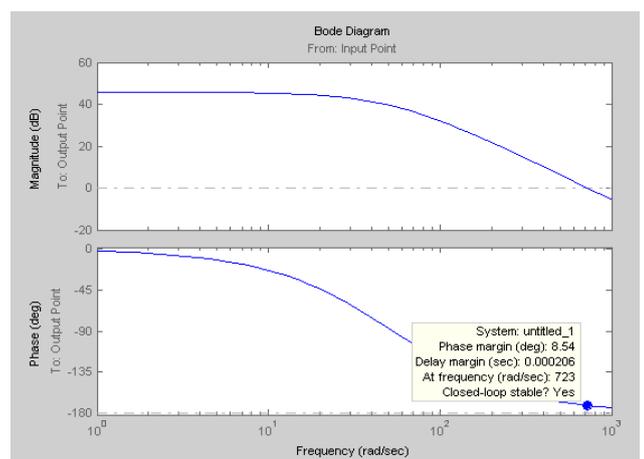
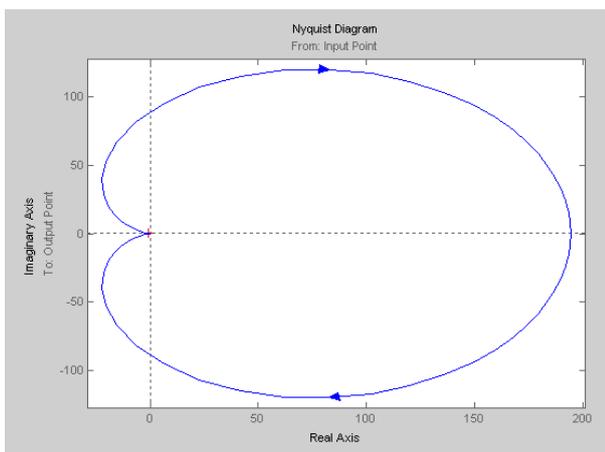
## Модель прокатної кліти



Структурна схема контуру струму



Перехідний процес струму

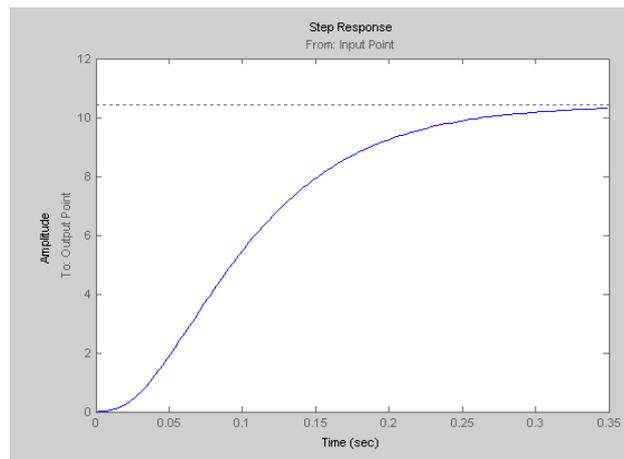
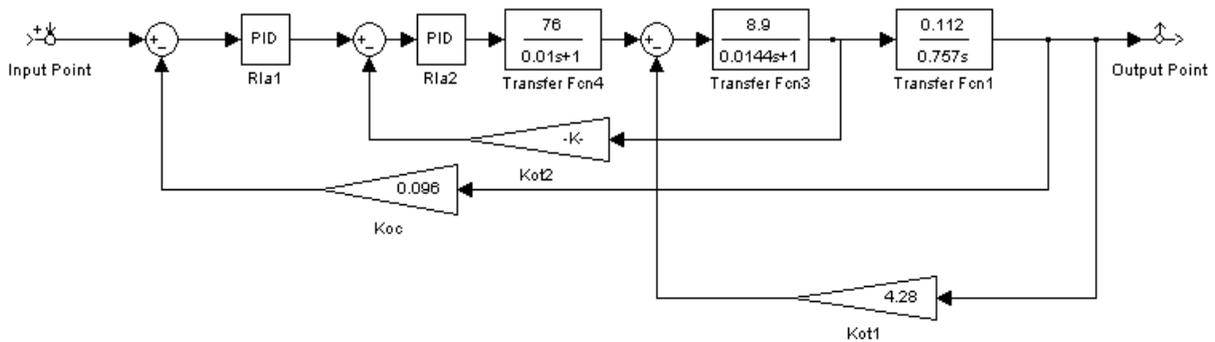


Перевірена на стійкість діаграма Найквіста

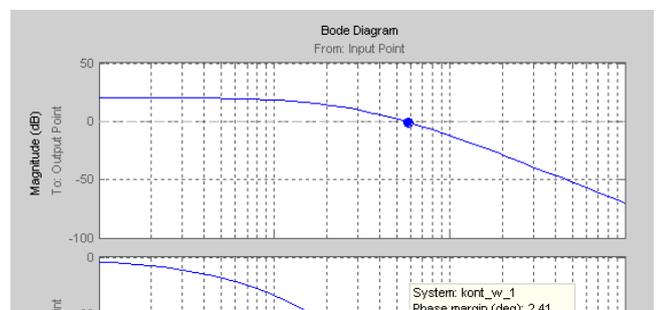
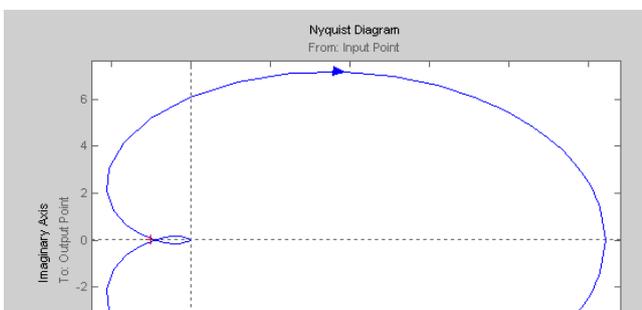
Діаграма Бодє

Додаток I

### Структурна схема контуру швидкості



### Перехідний процес швидкості



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ  
КОНДРАТЮКА»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:  
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**

04 листопада 2022 року

**Полтава 2022**

**УДК 004.89 + 681.51**

Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науковопрактичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 4 листопада, 2022 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. – 100 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машин і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

**Редакційна колегія:**

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

**© Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»**

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРОКАТНОГО СТАНУ

Подолання кризових явищ в економіці України супроводжуються обмеженням енергетичних і матеріальних ресурсів, збільшенням кількості споживання енергії, ускладненням вимог технологічних процесів, у зв'язку з цим виникла необхідність більш повного врахування взаємодії електроприводу з приводними механізмами, які містять пружні зв'язку.

На сьогодні, найбільш перспективним і раціональним способом придушення пружних коливань є електротехнічний, так як він простий у здійсненні, легко може використовуватися для автоматизації будь електромеханічної системи.

Постановка завдання дослідження. Метою роботи є дослідження електромеханічної взаємодії парціальних електричної (ЕП) і механічної підсистем (МП) у складі двох-масової електромеханічної системи (ЕМС) прокатного стану за допомогою пакетів прикладних програм.

Матеріали дослідження. Об'єктом дослідження є прокатний стан з двигуном постійного струму (ДПС) і системою підпорядкованого регулювання (СПР) з паспортними даними:  $P_n = 85\text{кВт}$ ;  $U_n = 220\text{В}$ ;  $I_n = 440\text{А}$ ;  $n_n = 540\text{об / хв}$ ;  $I_i = 8,25\text{кг-м}^2$ ;  $T_E = 0,084\text{с}$ ;  $i_{<i} = 460\text{В}$ ;  $T^{\wedge} = 0,005\text{с}$ . Структурна схема СПР приведена на рис. 1.

На рисунку прийняті наступні позначення:  $\omega_1$ ,  $R_{\text{я}}$  - швидкість двигуна і механізму;  $z$  - напруги завдання;  $I_{\text{я}}$  - струм якоря двигуна;  $M_{\text{д}}$  - момент розвивається двигуном;  $M_{\text{с}}$  - момент статичного опору на валу двигуна;  $M_{\text{у}}$  - момент пружних коливань;  $T_{\text{е}}$  - електромагнітна стала часу;  $K_{\text{т}}$ ,  $K_{\text{с}}$  - коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом та швидкістю;  $K_{\text{п}}$  - коефіцієнт передачі перетворювача;  $K_{\text{фн}}$  - коефіцієнт пропорційності ЕРС швидкості  $\omega_1$ ,  $R_{\text{я}}$  - опір якорного ланцюга двигуна.

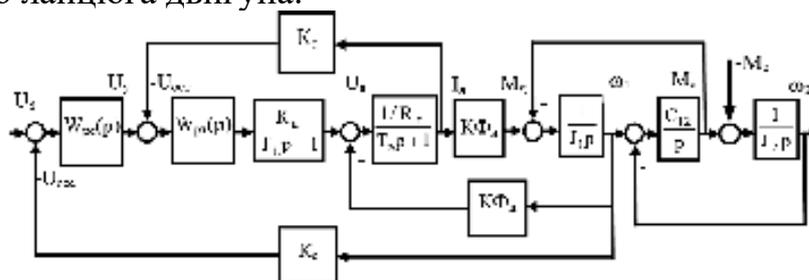


Рисунок 1. – Структурна схема системи управління узгодженням швидкостей головних електроприводів універсальної кліті.

На підставі структурної схеми, дослідження динаміки перехідних процесів виробляємо на основі передавальної функції по керуючому впливу, знаменник якої, характеристичний поліном, визначає демпфуючі властивості електропривода:

$$Q(p) = \frac{T_e T_m}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma + T_e T_m \Omega_{12}^2}{\Omega_{12}^2} p^2 + T_c p + 1. \quad (1)$$

Вид коренів характеристичного рівняння визначає характер перехідних процесів, який залежить від параметрів:  $\gamma, \Omega_{12}, T_c, T_m$ .

Для виявлення закономірностей електро-механічного демпфірування більш зручно користуватися нормованим записом характеристичного рівняння (1), що дає можливість визначити найкращі параметри ЕМС з граничним демпфуванням [3; 4]:

$$Q(p) = K_e T_y^4 p^4 + 2\sqrt{K_e} \xi_\delta T_y^3 p^3 + (K_e + \gamma) T_y^2 p^2 + 2\sqrt{K_e} \xi_\delta T_y p + 1 = 0. \quad (2)$$

$$K_e^{onm} = 1, \xi_\delta^{onm} = \sqrt{\gamma - 1}, \quad (3)$$

де  $K_e^{onm}, \xi_\delta^{onm}$  – оптимальні коефіцієнти електромеханічної взаємодії і демпфування відповідно.

Досліджувати динамічні режими найбільш доцільним на математичній моделі з використанням такого пакета моделювання, яким є MATLAB. Найбільш відомі області його застосування є: математика і обчислення; розробка алгоритмів; обчислювальний експеримент, імітаційне моделювання, макетування; аналіз даних, дослідження і візуалізація результатів; наукова та інженерна графіка; розробка додатків, включаючи графічний інтерфейс користувача.

Додаток Simulink, як складова частина MATLAB для обробки сигналів, дозволяє швидко проектувати, моделювати і тестувати системи електроприводу, використовуючи інтерактивно-візуальне моделювання. Це дозволяє аналізувати роботу вже на самих ранніх стадіях розробки проекту.

На основі пакетів прикладних програм MathCAD і MATLAB Simulink досліджені електромеханічні процеси в двомасовій ЕМС прокатного стану з пружними механічними ланками, встановлені важливі динамічні показники якості роботи системи.

#### Література:

Полухін П.І. Прокатне виробництво / П.І. Полухін, М.М. Федосов, А.А. Корольов, Ю.М. Матвеев // М., 1982.

Бурдаков Д.Д. Загальна металургія / Д.Д. Бурдаков, Ю.Д. Бурдаков, С.А. Володін, М.К. Жилкин // М., 1971.