

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології

та робототехніка

освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Адаптивне керування трактом транспортування паперорізальної

машини ПРМ-10»

Здобувача освіти групи СУ.м-31

Савлукова Б.В.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Богдан Савлуков

Керівник доцент, к.т.н. Кулінченко Г.В.

(підпис)

Консультант _____

(підпис)

Суми – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Савлукову Богдану Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Адаптивне керування трактом транспортування паперорізальної машини ПРМ-10 затверджена наказом ректора СумДУ № 1090-VI від "24" жовтня 2024 р.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи "30" листопада 2024 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові роботи, статті, публікації, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалом про подібні системи.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню): Проведення аналізу тракту транспортування як технологічного об'єкта керування, опис його конструктивних та динамічних характеристик. Формулювання задачі дослідження для забезпечення стабільності процесу транспортування та забезпечення ефективного керування в умовах змінних характеристик системи. Побудова математичної моделі тракту транспортування. Виконання перевірки адекватності побудованої моделі на основі аналізу відповідності результатів реальним умовам роботи системи. Аналіз отриманих результатів моделювання. Аналіз підходів до впровадження адаптивного керування. Математичне моделювання впливу адаптивного підходу на динаміку системи для оцінки його ефективності. Аналіз отриманих результатів моделювання та формулювання

висновків щодо доцільності використання адаптивного керування для підвищення стабільності роботи тракту транспортування.

5. Перелік графічних матеріалів: Блок-схема алгоритму роботи основної програми, Блок-схема алгоритму роботи підпрограми тракту транспортування, 31 рисунок, 2 таблиці.

6. Календарний план виконання роботи:

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір літератури і першоджерел та аналіз подібних існуючих систем.	24.10.2024 – 26.10.2024
2	Функціональний аналіз об'єкту керування. Аналіз контурів керування трактом транспортування. Аналіз задач та методів моделювання.	27.10.2024 – 29.10.2024
3	Створення математичних моделей окремих контурів керування трактом. Перевірка адекватності та відповідності моделі реальним умовам роботи. Створення повноцінної моделі об'єкта керування. Аналіз отриманих результатів моделювання.	30.10.2024 – 14.11.2024
4	Створення адаптивної системи керування та математичне моделювання процесу керування трактом транспортування. Аналіз отриманих результатів моделювання.	15.11.2024 – 27.11.2024
5	Оформлення дипломної роботи та супровідної документації.	28.11.2024 – 30.11.2024

7. Дата видачі завдання "24" жовтня 2024 р.

Керівник роботи:

доцент, к.т.н.
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис)

Георгій Куліченко
(ім'я та прізвище)

Здобувач:

студент гр. СУ.м-31
(шифр групи)

(підпис)

Богдан Савлуков
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Адаптивне керування трактом транспортування паперорізальної машини ПРМ-10.

Автор: Савлуков Богдан Віталійович; Сумський державний університет; 2 курс; Суми, 2024 р.

Керівник: Кулінченко Георгій Васильович; доцент; кандидат технічних наук.

Робота містить вступ, три розділи та висновки в основному тексті, загальним обсягом 46 сторінок, 31 рисунок, 15 джерел інформації.

Дана дипломна робота спрямований на опис і створення адаптивної системи керування трактом транспортування паперорізальної машини з врахуванням змінних умов експлуатації. Актуальність теми обумовлена необхідністю забезпечення стабільності процесу транспортування стрічки, а також підвищення її в умовах впливу збурень і змінних характеристик матеріалу, як от радіус рулону, товщина, щільність та ін.

У роботі досліджено тракт транспортування як об'єкт керування. Перший розділ присвячено функціональному аналізу об'єкта керування, включаючи його опис, як технологічного об'єкту.

У другому розділі розглянуто створення ідеалізованої математичної моделі тракту транспортування для аналізу його динаміки в умовах змінних параметрів без використання механізмів адаптації. Виконано її верифікацію на предмет адекватності та відповідності реальним умовам роботи. Крім того, проведено послідовну корекцію контурів управління по моменту та швидкості для підвищення стабільності системи. Такий підхід дозволить оцінити поведінку системи при базових налаштуваннях регуляторів та виявити обмеження традиційного керування. Запропоновано використання адаптивного коригування параметрів в реальному часі для автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора.

У третьому розділі розроблено адаптивну систему керування, що базується на використанні Look-Up таблиць для автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІ-регуляторів залежно від змін параметрів. Проведено математичне моделювання, яке продемонструвало ефективність адаптивного підходу у забезпеченні стабільності транспортування стрічки та компенсуванні впливу зовнішніх збурень. Результати впливу звичайного та адаптивного ПІ-регулятора та їх порівняння підтвердили доцільність використання адаптивного підходу для підвищення стабільності та ефективності роботи тракту транспортування.

Ключові слова: тракт транспортування, адаптивне керування, математична модель, Look-Up таблиці, ПІ-регулятор, паперорізальна машина.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	5
1.1 Тракт транспортування, як технологічний об’єкт.....	5
1.2 Постановка задачі.....	9
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ІДЕАЛІЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАКТУ ТРАНСПОРТУВАННЯ.....	13
2.1 Розрахунки математичної моделі для ділянки розмотки.....	17
2.2 Розрахунки математичної моделі для ділянки намотки.....	19
2.3 Верифікація моделі на предмет її адекватності.....	20
2.4 Послідовна корекція контурів управління.....	26
2.4.1 Послідовна корекція контуру управління по моменту ділянки розмотки.....	26
2.4.2 Послідовна корекція контуру управління за швидкістю ділянки розмотки.....	29
2.4.3 Послідовна корекція контуру управління по моменту ділянки намотки.....	32
2.4.4 Послідовна корекція контуру управління за швидкістю ділянки намотки.....	34
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТРАКТОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ	38
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕУ – експериментальна установка

ОУ – об'єкт управління

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – пристрій перемикачів

ПРМ – паперорізальна машина

ПЧ – перетворювач частоти

СПТ – стрічкопротяжний тракт

LUT – Look Up Table

ВСТУП

Сучасне виробництво паперової продукції, яке включає процеси різання та транспортування матеріалу, вимагає високої точності, швидкості та надійності для задоволення вимог до якості й продуктивності. Одним з ключових етапів цього процесу є поздовжнє різання паперу в паперорізальних машинах (ПРМ), де від точності роботи залежить якість кінцевого продукту. [1] Неправильне налаштування натягу, швидкості транспортування та точності позиціонування ножів може призвести до значних втрат матеріалу та необхідності корекції, що негативно впливає на ефективність виробництва.

Успішне функціонування ПРМ залежить від правильної організації тракту транспортування та точності різальних елементів. Для забезпечення стабільності процесу необхідна адаптивна система керування, здатна автоматично налаштовувати параметри роботи залежно від змінних умов. Такі системи адаптивного керування дозволяють значно підвищити продуктивність, забезпечити стабільність процесу та знизити рівень виробничих відходів.

Метою даного дослідження є розробка та реалізація алгоритмів адаптивного керування для тракту транспортування в ПРМ, які будуть здатні автоматично коригувати параметри транспортування паперового полотна в режимі реального часу і забезпечувати їх стабільність.

Актуальність даного дослідження визначається постійною необхідністю вдосконалення виробничих процесів для підвищення їх ефективності та зниження витрат. Розробка нових підходів до адаптивного керування трактом транспортування ПРМ матиме значний вплив на ефективність виробництва та конкурентоспроможність підприємств у поліграфічній та пакувальній галузях.

РОЗДІЛ 1

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Тракт транспортування, як технологічний об'єкт.

Тракт транспортування – це система, що забезпечує переміщення полотна паперу через весь процес від розкату до накату у ПРМ. [2] Включає транспортери, вали та ремені, які злагоджено працюють, щоб підтримувати рівномірний натяг і забезпечувати безперервний рух паперу.

Принцип роботи тракту транспортування включає такі етапи:

1. **Подача паперу з розкату** – здійснюється з контролем натягу, який підтримується на постійному рівні для запобігання складкам або нерівномірному натягу.
2. **Переміщення по валиках** – траєкторія транспортування розрахована так, щоб мінімізувати ризик зминання паперу. Система папероведучих валиків організована так, щоб забезпечити плавність руху та уникнути ризику пошкодження матеріалу. За рахунок різниці швидкостей приводів створюється необхідний натяг, який коригується при кожному відхиленні від заданих значень.
3. **Синхронізація з різальним механізмом** – папір транспортується із заданою швидкістю, щоб забезпечити точне і рівне різання без розривів. Швидкість тракту транспортування автоматично узгоджується з роботою ножів, що важливо для уникнення відхилень у розмірах листів.
4. **Подача паперу на накат** – здійснюється з контролем натягу, щоб забезпечити рівномірне намотування матеріалу. Система реагує на відхилення, коригуючи натяг для уникнення складок чи перекосів.

Це дозволяє підтримувати стабільність процесу навіть за змінних умов, таких як зміна радіусу рулону на етапі накату.

Ключовими елементами тракту є датчики натягу, регулятори швидкості, а також механізми зворотного зв'язку, які коригують параметри тракту залежно від властивостей паперу та змін у процесі виробництва.

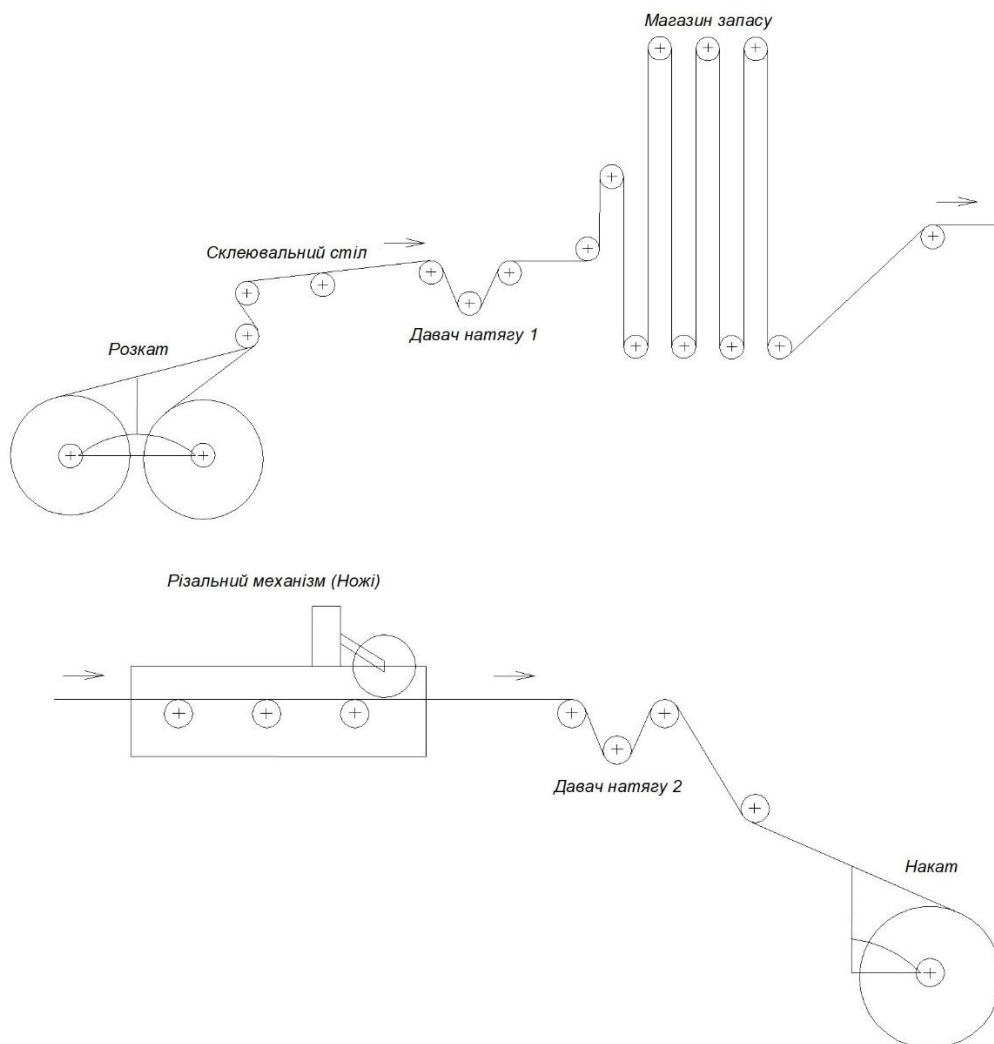


Рисунок 1.1 – Схема тракту транспортування ПРМ

Початок роботи (ПРМ) починається з заправки рулонів паперу згідно з інструкцією. [3] Основа, яка розмотується з рулону, проходить через систему валиків на склеювальному столі, де здійснюється з'єднання кінця одного рулону з початком іншого за допомогою липкої стрічки. Щоб полотно основи трималося стабільно на склеювальному столі, воно підтримується вакуумом.

Для забезпечення безперервного функціонування машини використовується спеціальний магазин запасу. Його основне призначення – підтримувати безперервне подання основи в тракт машини, навіть коли відбувається зміна рулонів на розкаті. Магазин запасу вміщує до 25 метрів матеріалу і встановлюється на головному каркасі у вигляді окремого модуля.

Для підтримки стабільного натягу матеріалу використовується система контролю натягу. Спеціальні давачі натягу фіксують силу натягу основи під час її проходження по машині і передають сигнали до схеми електроприводу для коригування швидкості роботи електродвигунів. Такі давачі розташовані на лівій і правій стійках каркасу, точніше, після склеювального столу і перед зоною, де матеріал поступає на накат.

Кожен давач натягу має два напрямні валики, закріплені на стійках, а також вимірювальний валик, встановлений на пружних шарнірах, і два силувимірювальні давачі типу СА П-10. Завдяки цьому, натяг основи можна регулювати, змінюючи відстань між напрямними валиками. Кут охоплення вимірювального валика може бути налаштований від 120° до 180°, що дозволяє регулювати натяг до 20 кгс, забезпечуючи точний контроль натягу під час руху основи по лінії.

Далі, з магазину запасу, основа переміщується по валикам до різального механізму, де відбувається подальша обробка. Різальний механізм виконує розрізання полотна на полоси необхідної ширини, забезпечуючи високу якість і точність різку.

У паперорізальній машині, що розглядається, використовуються тарілчасті ножі, які не мають власного приводу і здійснюють лише вертикальний рух, забезпечуючи необхідний тиск на полотно для створення рівного і точного розрізу. Завдяки тому, що ножі обертаються на осі від руху самого полотна, забезпечується природне узгодження швидкості ножів із швидкістю полотна, що мінімізує деформації і розтягнення матеріалу.

Ножі, чинячи тиск на полотно, створюють додатковий вплив на натяг і швидкість транспортування. Система керування повинна враховувати ці

моменти і коригувати параметри транспортування для уникнення деформацій полотна. Завдяки цьому забезпечується оптимальна підготовка матеріалу для наступного етапу — намотування на накат.

Після проходження через різальний механізм основа надходить на накат. Цей механізм має конструктивні вузли, схожі з розкатом. На накаті проводиться процес намотування порізаної основи в рулон. Накат оснащений приводом, закріпленим на станині, який контролює швидкість і рівномірність намотування матеріалу в рулони.

1.2 Постановка задачі.

Транспортування паперового полотна є ключовим етапом роботи паперорізальної машини (ПРМ), що вимагає підтримання стабільності процесу для забезпечення безперервності та ефективності роботи.

На відміну від інших промислових систем транспортування, наприклад, конвеєрів, де матеріал є однорідним і статичним за основними характеристиками, система транспортування в паперорізальних машинах має справу зі змінними умовами і динамікою процесу.

Враховуючи вище викладене, забезпечення стабільності процесу транспортування полотна потребує адаптивного підходу, що враховує і коригує вплив ключових **параметрів, які визначають якість процесу:**

- Відсутність різких змін у динаміці системи;
- Стабільність натягу на різних ділянках тракту;
- Стабільність швидкості транспортування полотна в умовах дії збурень.

Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати контури керування, що впливають на вище згадані параметри:

- Контур керування швидкістю транспортування (Забезпечення стабільної швидкості руху полотна, що важливо для рівномірного натягу);
- Контур керування робочим моментом (Стабілізація моменту обертання двигунів, який необхідний для забезпечення заданого натягу і швидкості транспортування полотна);
- Контур керування натягом полотна (Забезпечення рівномірного натягу полотна, що вкрай важливо для запобігання його деформації чи пошкодженню).

Критерії реалізації задачі включають в себе:

- Стабільність роботи системи при змінних навантаженнях і зовнішніх збуреннях.
- Відсутність перерегулювання та забезпечення плавного перехідного процесу, завдяки адаптивному налаштуванню параметрів регуляторів.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні кроки:

- 1) Побудувати ідеалізовану математичну модель, яка описує динаміку основних параметрів системи, зокрема швидкість руху стрічки, натяг, момент обертання валу та ін. Модель має враховувати зміну параметрів рулону, таких як радіус, маса, момент інерції та інші чинники, що впливають на роботу системи, а також включати можливості адаптації параметрів у реальному часі.
- 2) Провести чисельне моделювання для перевірки адекватності і достовірності ідеалізованої моделі та її відповідності реальним умовам роботи системи.
- 3) Дослідити динамічні характеристики об'єкта керування при змінних умовах роботи для системи без адаптації та визначити її чутливість до зовнішніх збурень. Після введення адаптивного механізму провести моделювання для оцінки його впливу на стабільність системи та перевірки здатності адаптивного механізму компенсувати вплив змінних умов роботи.

Задачі моделювання:

- 1) Побудувати адаптивну модель за принципом розділення системи на ділянки з окремими механічними та динамічними параметрами, що дозволяє детально аналізувати їхню взаємодію та автоматично коригувати роботу системи при змінних умовах.

- 2) Для кожної ділянки враховувати взаємозв'язки між робочим моментом двигуна, швидкістю транспортування та динамічними характеристиками рулону, забезпечуючи можливість автоматичного коригування параметрів у реальному часі.
- 3) Щоб зменшити складність і зберегти точність, у моделі враховувати лише ключові параметри, які суттєво впливають на стабільність системи (наприклад, момент інерції рулону) і впровадити механізми адаптивного налаштування цих параметрів.
- 4) Вторинні фактори, що мають незначний вплив, не включати, щоб забезпечити простоту налаштування та розрахунків і зосередитися на основних аспектах адаптації.

Методи моделювання:

- 1) *Аналітичне моделювання* - Використання рівнянь для опису фізичних, механічних та електромеханічних процесів і базування досліджуваної моделі на фундаментальних законах динаміки, таких як рівняння руху, момент інерції тощо із врахуванням адаптивних корекцій для зміни робочих умов системи.
- 2) *Імітаційне моделювання* - Реалізація математичної моделі з адаптивними механізмами в спеціалізованому програмному середовищі, як MATLAB Simulink завдяки його широким можливостям у галузі моделювання динамічних систем, математичного аналізу, інтеграції диференціальних рівнянь і візуалізації результатів. Це необхідно для перевірки здатності системи реагувати на змінні умови роботи, зокрема на зміну радіусу рулонів.
- 3) *Емпіричне моделювання* – Чисельна перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера-Снедекора на основі даних отриманих експериментальним і дослідним шляхом.

У підсумку можна сказати, що проведене дослідження має забезпечити поглиблене розуміння динаміки об'єкта керування та виявити причини нестабільності процесу транспортування стрічки з урахуванням змінних умов роботи, таких як зміна радіусу рулонів на розкаті й накаті.

Основна задача дослідження полягає у створенні адаптивної системи керування, зокрема за допомогою LUT таблиць, яка динамічно адаптується до змінних умов роботи та автоматично налаштовує параметри регулятора для підтримання стабільності процесу транспортування стрічки.

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ ІДЕАЛІЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАКТУ ТРАНСПОРТУВАННЯ

Ідеалізованою математичною моделлю є спрощене представлення системи, яке ґрунтується на базових налаштуваннях ПІ-регуляторів, пристосованих до статичних умов роботи. Така модель передбачає, що динамічні характеристики системи залишаються незмінними, а вплив змінних параметрів, таких як радіус рулону, не враховується. Основна мета цієї моделі — дослідити базову динаміку тракту транспортування, а вплив збурень буде враховано лише в кінці розділу при синтезі регулятора, щоб виявити обмеження традиційного підходу до керування.

Якість різання основи визначається низкою чинників, серед яких ключовими є стабільність натягу полотна і швидкість його транспортування. Для досягнення високої точності різання необхідно забезпечити рівномірний рух матеріалу через увесь стрічкопротяжний тракт. Цей тракт складається з взаємозалежних приводів і навантажень, які потребують постійного контролю для забезпечення стабільності та ефективності роботи. [4]

Основними вимогами до системи є забезпечення стабільності швидкості та моменту на всіх ділянках стрічкопротяжного тракту (СПТ), а також мінімізація коливань цих параметрів під час перехідних процесів. Для забезпечення стабільної швидкості транспортування полотна та робочого моменту необхідно врахувати зміну радіусу рулонів розкату та накату, так як нехтування даною динамікою може призвести до пошкодження як матеріалу, так і обладнання через виникнення коливань. Так як виконавчими механізмами є асинхронні двигуни, то для плавної зміни швидкості необхідне використання системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун».

Параметри налаштувань перетворювача частоти (ПЧ) і регулятора будуть визначатися на основі математичного моделювання контуру керування моментом, натягом і швидкістю. Модель враховує численні фактори, що впливають на зміну швидкості, включаючи збурення. Аналіз стрічкопротяжного тракту дозволяє представити модель як систему, що складається з взаємопов'язаних двомасових систем. Це забезпечує спрощення динамічної системи та методики налаштування ПЧ-регулятора для робочих умов.

В тракці транспортування можливо виділити дві ділянки для зведення до двомасової системи, а методика зведення наведена нижче:

Приведений радіус визначається наступним чином:

$$\rho = \frac{V_L}{\omega}, \quad (2.1)$$

де V_L – швидкість лінійного руху полотна;

$$\omega = \frac{V_L}{R_i}, \quad (2.2)$$

де R_i – радіус i -го валика.

Радіус рулону паперу дорівнює $R_p = 600$ мм, а радіус валиків стрічкопротяжного тракту дорівнює $R_b = 100$ мм. Оскільки вали мають форму тонкостінних циліндрів, їх момент інерції можна обчислити за формулою:

$$j = m \frac{r_1^2 - r_2^2}{2}, \quad (2.3)$$

де r_1 – зовнішній радіус вала = 100 мм, r_2 – внутрішній радіус вала = 85 мм.

Приведений момент інерції визначається, як:

$$j' = \frac{j}{i^2}, \quad (2.4)$$

де

$$i = \frac{\omega_{ДВ}}{\omega_B} \quad (2.5)$$

Маса рулону паперу дорівнює $m_p = 108$ кг, а маса валику стрічкопротяжного тракту дорівнює $m_b = 20$ кг.

Резонансна частота двохмасової системи визначається, як:

$$\Omega = \sqrt{\frac{c' \cdot (j_{\Sigma 1} + j_{\Sigma 2})}{j_{\Sigma 1} \cdot j_{\Sigma 2}}}, \quad (2.6)$$

де c – жорсткість відрізка полотна між валами обчислюється за формулою:

$$c = E \cdot S, \quad (2.7)$$

де E - модуль Юнга, який відповідно для паперового полотна складає $0,008 \cdot 10^6$ МПа [3],

S – площа поперечного перерізу плівки:

$$S = B \cdot \tau, \quad (2.8)$$

де B – ширина полотна, м ; τ – товщина полотна, м.

$$S = 1.0 \text{ м} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$c = 0.008 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$$

Приведена жорсткість:

$$c' = c \cdot l \cdot \rho^2, \quad (2.9)$$

де l – відстань між центрами двох валиків.

Момент супротиву на кожному з валів буде дорівнювати:

$$M_c = \frac{F \cdot k \cdot \rho}{\eta}, \quad (2.10)$$

де $F = 100$ Н – натяг полотна за технічним регламентом, $k = 0,15$ - середній коефіцієнт тертя паперового полотна з валиком [4], η - для даного типу систем коефіцієнт ефективності прийнято вибирати $\sim 0,83$. [4]

На тракті транспортування встановлені двигуни АІР-132-М8 [5] з наступними технічними характеристиками: потужність - 5.5 кВт, число полюсів - 4, частота обертання - 750 об/хв, ковзання – 5.3%, номінальна напруга - 220/380 V, номінальний струм - 13.6 А, пусковий струм - 81.6 А,

відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ - 6.0, струм без навантаження: 8.16 А, номінальний момент $M_{\text{ном}}$ - 75,32 Нм, $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ - 180%, $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$ - 220%, інерційний момент - 0.0935 кгм², режим роботи - S1.

Структурна схема узагальненої двохмасової системи, як показано на рис. 2.1, являє собою набір взаємопов'язаних систем привод-навантаження. Вона описує динаміку взаємодії між приводом і навантаженням, де кожна маса реагує на зміну сили і моменту, що передається між ними.

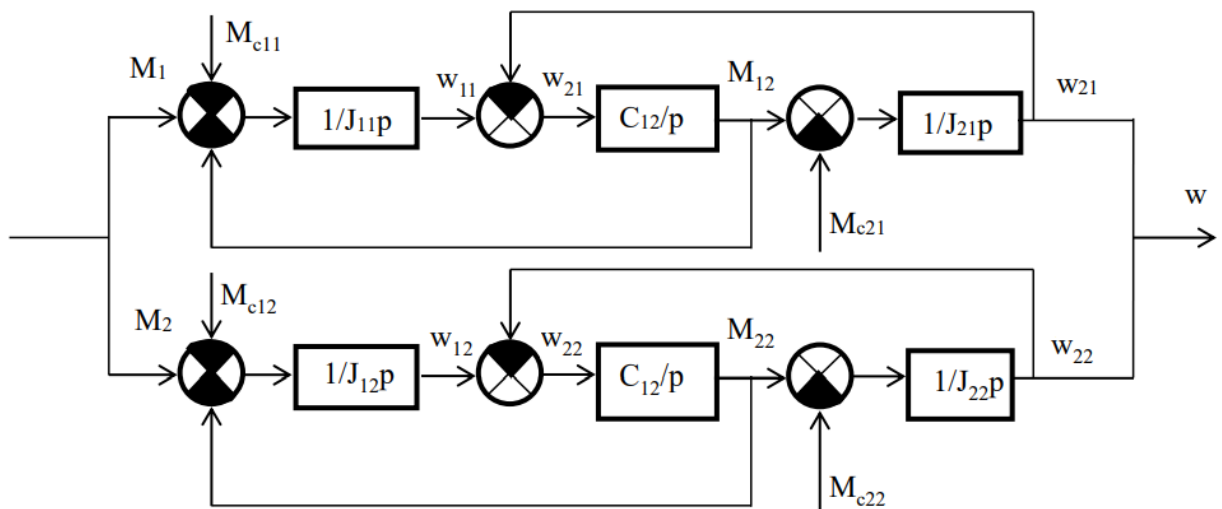


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи управління

2.1 Розрахунки математичної моделі для ділянки розмотки.

Для ділянки розмотки, що проходить від вузла розмотування до тягнучого двигуна, кінематична схема представлена на рис. 2.2.

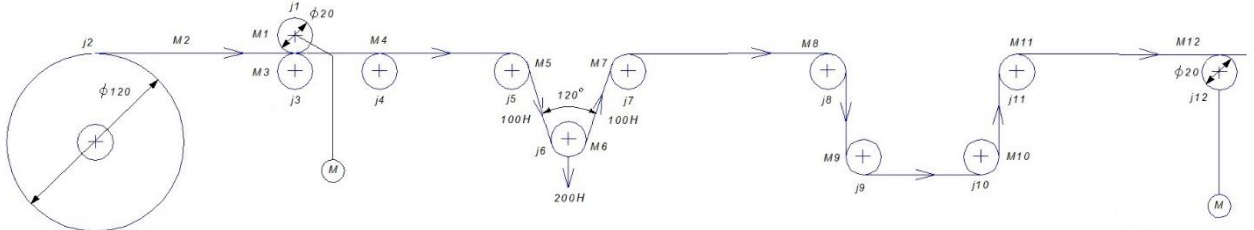


Рисунок 2.2 – Кінематична схема ділянки розмотки

Згідно з технічним регламентом, максимальна лінійна швидкість полотна становить: $V_L = 30 \text{ м/хв} = 0,5 \text{ м/с}$. [6] Оскільки валик тракту транспортування жорстко з'єднаний із валом двигуна, частота його обертання визначається залежно від лінійної швидкості полотна та радіуса валика:

$$\omega_{ДВ} = \omega_B = \frac{0.5}{0.1} = 5 \text{ с}^{-1} \quad (2.11)$$

Радіус приведення валу:

$$\rho_B = \frac{0.5}{5} = 0.1 \text{ м} \quad (2.12)$$

Частота обертання рулону:

$$\omega_p = \frac{0.5}{0.6} = 0.84 \text{ с}^{-1} \quad (2.13)$$

Радіус приведення рулону:

$$\rho_p = \frac{0.5}{1} = 0.595 \text{ м} \quad (2.14)$$

Моменти інерції:

$$j_B = m \frac{r_1^2 - r_2^2}{2} = 20 \cdot \frac{0.1^2 - 0.085^2}{2} = 20 \cdot \frac{0.002775}{2} = 0.02775 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.15)$$

$$j_B' = \frac{17j_B}{\left(\frac{\omega_{ДВ}}{\omega_B}\right)^2} = \frac{0.04718}{\left(\frac{5}{5}\right)^2} = 0.4718 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.16)$$

$$j_p = m_p \cdot \frac{R_p^2 - r_2^2}{2} + m_B \frac{r_1^2 - r_2^2}{2} = 108 \cdot \frac{0.6^2 - 0.085^2}{2} + 20 \cdot \frac{0.1^2 - 0.085^2}{2} = 19.05 + 0.02775 = 19.078 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.17)$$

$$j_p' = \frac{j_B}{\left(\frac{\omega_{ДВ}}{\omega_p}\right)^2} = \frac{19.078}{\left(\frac{5}{0.84}\right)^2} = 0.539 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.18)$$

Сумарний момент інерції:

$$j_{\Sigma} = j_B' + j_p' = 0.4718 + 0.539 = 1.011 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.19)$$

Момент супротиву:

$$M_{C1} = \frac{100 \cdot 0.15 \cdot 0.1}{0.83} = 1.81 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{C2} = \frac{100 \cdot 0.15 \cdot 0.595}{0.83} = 10.76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведена жорсткість:

$$c' = c \cdot l \cdot \rho^2 = 800000 \cdot 1 \cdot 0.5^2 = 200000 \quad (2.20)$$

$$\text{Резонансна частота: } \Omega = \sqrt{\frac{200000 \cdot (2 \cdot 0.0935 + 1.011)}{2 \cdot 0.0935 \cdot 1.011}} = 1125.77 \text{ с}^{-1}$$

Оскільки резонансна частота значно перевищує частоту обертання валу двигуна, цю систему можна спростити до одномасової, як показано на рис. 2.3, з відповідними параметрами: [7]

$$j = j_{ДВ} + j_{\Sigma} = 2 \cdot 0.0935 + 1.011 = 1.198 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

$$M_C = M_{C1} + M_{C2} = 17 \cdot 1.81 + 10.76 = 41.53 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.22)$$

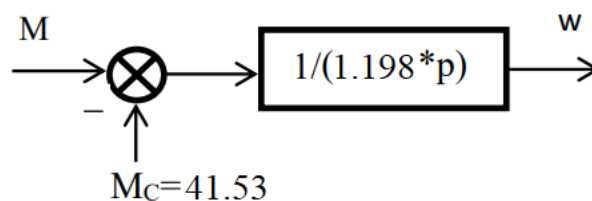


Рисунок 2.3 – Структурна схема одномасової системи для ділянки розмотки

2.2 Розрахунки математичної моделі для ділянки намотки.

Ділянка намотки (рис. 2.4), від різального механізму до намоту:

Ідентично з попереднім етапом обчислюються моменти супротиву, моменти інерції системи та визначається резонансна частота для ділянки намотки.

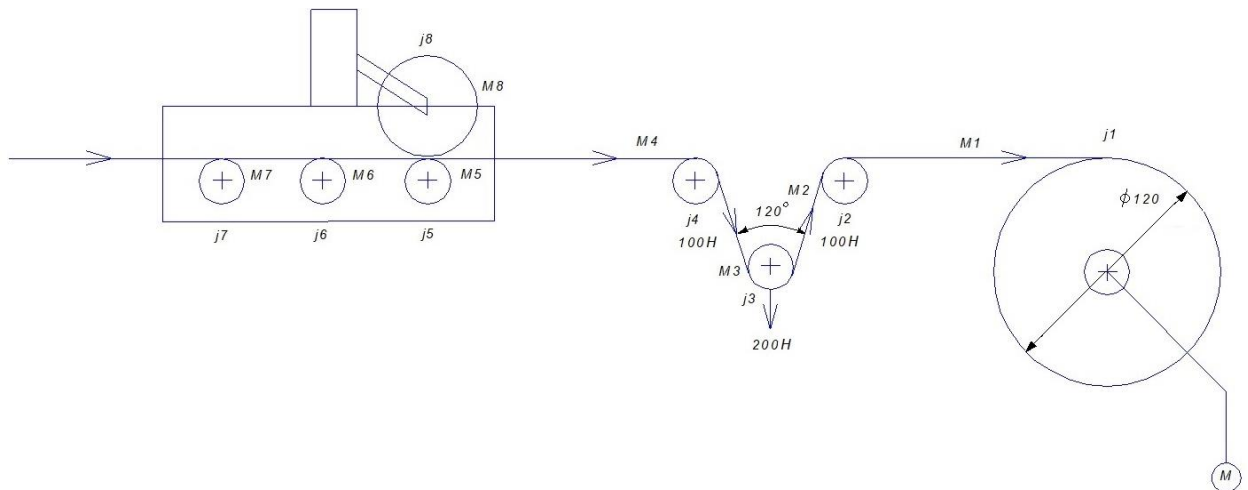


Рисунок 2.4 – Кінематична схема ділянки намотки

Приведена жорсткість:

$$c' = c \cdot l \cdot \rho^2 = 800000 \cdot 2 \cdot 0.5^2 = 400000 \quad (2.23)$$

$$\text{Резонансна частота: } \Omega = \sqrt{\frac{400000 \cdot (2 \cdot 0.0935 + 1.011)}{2 \cdot 0.0935 \cdot 1.011}} = 1592.07 \text{ c}^{-1}$$

Оскільки резонансна частота значно перевищує частоту обертання валу двигуна, цю систему можна спростити до одномасової, як показано на рис. 2.5, з відповідними параметрами.

Вплив тарілчастих ножів на динаміку транспортного тракту не є суттєвим, проте для повноти моделі їх момент інерції та момент спротиву враховані в загальних моментах системи. Це дозволяє врахувати їхню участь у загальному навантаженні без необхідності детального моделювання різального механізму. [7]

$$j = j_{\text{дв}} + j_{\Sigma} + j_{\text{різ}} = 0.0935 + 7 \cdot 0.02775 + 5 \cdot 0.01 = 0.338 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.24)$$

$$M_C = M_{C1} + M_{C2} + M_{C\text{пріз}} = 7 \cdot 1.81 + 10.76 + 5 \cdot 0.28 = 24.83 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.25)$$

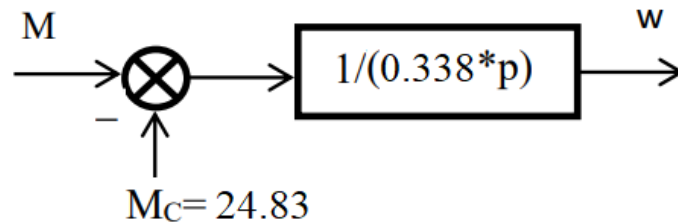


Рисунок 2.4 – Структурна схема одномасової системи для ділянки намотки

2.3 Верифікація моделі на предмет її адекватності.

Об'єктом управління є тракт транспортування (рис. 1.1) паперорізальної машини ПРМ-10. Під час запуску системи виконувались вимірювання моменту двигуна. Модель вважається адекватною за умови, якщо час перехідного процесу відповідає вимозі $5.0T_m$, а перерегулювання не перевищує 4.5%. Перехідна характеристика ОУ отримана експериментально та представлена на рис. 2.5, а дані наведені в табл. 2.1.

Ця характеристика є ключовим інструментом для оцінки динамічної поведінки двигуна, адже вона відображає його здатність досягати потрібного моменту або адаптуватися до змін навантаження. В системах з високими вимогами до стабільності та швидкодії, таких як регулювання швидкості або приводи з частими пусками і зупинками, аналіз перехідної характеристики дозволяє визначити, чи відповідає двигун заданим технічним вимогам, та оцінити ефективність системи керування. [8]

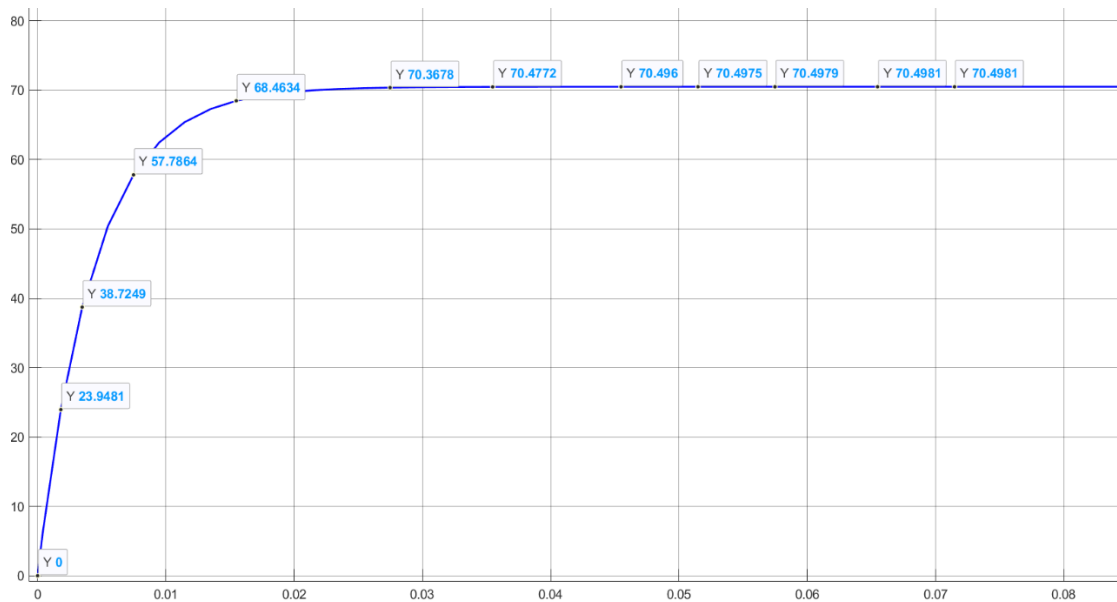


Рисунок 2.5 – Перехідна характеристика по моменту отримана експериментально

Момент на графіку близький до номінального (75,32 Нм), але не перевищує його, це вказує на те, що система працює в межах безпечного робочого діапазону, з максимальним використанням доступних можливостей двигуна без ризику його перевантаження. Це є позитивним сигналом, оскільки система оптимізовано працює, не створюючи умов для тривалих перевантажень, що можуть призвести до зносу або пошкодження обладнання. Це також свідчить про ефективне управління навантаженням у нашій системі.

Таблиця 2.1 – Масив даних перехідної характеристики отриманий експериментальним шляхом

Час, с	Момент, Нм	Час, с	Момент, Нм
0	0	0.035	70.48
0.0018	23.95	0.045	70.496
0.0035	38.73	0.052	70.497
0.0075	57.79	0.058	70.498
0.0155	68.47	0.063	70.50
0.028	70.37	0.072	70.50

Представимо модель об'єкта управління (рис. 2.6) з наступними параметрами:

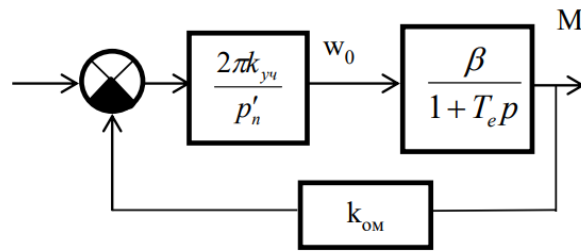


Рисунок 2.6 – Структурна схема ОУ

Параметри механічної частини:

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{75.32}{78.5 - 73.3} = 14.49 \quad (2.26)$$

де,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = 78.5 \quad (2.27)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = 73.3 \quad (2.28)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_k}, \quad (2.29)$$

де,

$$S_k = S_H \left(\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1} \right) = 0.0935 \cdot \left(2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1} \right) = 0.184 \quad (2.30)$$

$$T_e = \frac{1}{78.5 \cdot 0.184} = 0.070$$

Параметри перетворювача частоти:

$$k_{yc} = \frac{f}{U_{yc}} \quad (2.31)$$

При $f = 50$ Гц (частота мережі) та $U_{yn} = 10$ В.

$$k_{yc} = \frac{50}{10} = 5$$

$$p_n' = \frac{60f}{n_0} = \frac{3000}{750} = 4 \quad (2.32)$$

$$k_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{осм}}}{M_H} \quad (2.33)$$

при $U_{\text{осм}} = 10$, отримаємо

$$k_{\text{ом}} = \frac{10}{75.32} = 0.133$$

Перехідна характеристика, отримана в процесі моделювання за допомогою математичного пакета MatLab, зображена на рис. 2.7. Всі дані цієї характеристики наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Масив даних перехідної характеристики отриманий шляхом моделювання

Час, с	Момент, Нм	Час, с	Момент, Нм
0	0	0.035	70.50
0.0018	24.05	0.045	70.52
0.0035	38.87	0.052	70.525
0.0075	57.93	0.058	70.526
0.0155	68.53	0.063	70.53
0.028	70.40	0.072	70.53



Рисунок 2.7 – Перехідна характеристика по моменту моделі ОУ отримана шляхом моделювання

Перехідна характеристика моделі ОУ, яка отримана шляхом моделювання майже не відрізняється від перехідної характеристики отриманої експериментально, що свідчить про адекватність розрахованої моделі та можливість використання даної моделі для синтезу регуляторів. Для кількісної оцінки адекватності моделі використовується критерій Фішера-Снедекора, за яким знаходиться відношення дисперсії перехідної характеристики отриманої експериментально до перехідної характеристики отриманої в результаті моделювання. [9]

Розрахунок математичного очікування перехідної характеристики, яку отримано експериментальним шляхом:

$$\bar{y}_p = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{0 + 23.95 + 38.73 + 57.79 + 68.47 + 70.37 + 70.48 + 70.496 + 70.497 + 70.498 + 70.50 + 70.50 + 70.50}{12} = 56.86 \quad (2.34)$$

Розрахунок дисперсії перехідної характеристики, отриманої експериментальним шляхом:

$$S_p = \frac{\sum (\bar{y}_p - y_i)^2}{n - 1} = \frac{(56.86 - 0)^2 + (56.86 - 23.95)^2 + (56.86 - 38.73)^2 + (56.86 - 57.79)^2 + (56.86 - 68.47)^2 + (56.86 - 70.37)^2 + (56.86 - 70.48)^2 + (56.86 - 70.496)^2 + (56.86 - 70.497)^2 + (56.86 - 70.498)^2 + (56.86 - 70.50)^2 + (56.86 - 70.50)^2}{11} = 552.59 \quad (2.35)$$

Розрахунок математичного очікування перехідної характеристики, яку отримано шляхом моделювання:

$$\bar{y}_n = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{0 + 24.05 + 38.87 + 57.93 + 68.53 + 70.40 + 70.50 + 70.52 + 70.525 + 70.526 + 70.53 + 70.53}{12} = 56.91 \quad (2.36)$$

Розрахунок дисперсії перехідної характеристики, отриманої шляхом моделювання:

$$S_n = \frac{\sum(\bar{y}_n - y_i)^2}{n - 1} =$$

$$\frac{(56.91-0)^2+(56.91-24.05)^2+(56.91-38.87)^2+(56.91-57.93)^2+(56.91-68.53)^2+}{11}$$

$$\frac{+(56.91-70.40)^2+(56.91-70.50)^2+(56.91-70.52)^2+(56.91-70.525)^2+(56.91-70.526)^2+}{11}$$

$$\frac{+(56.91 - 70.53)^2 + (56.91 - 70.53)^2}{11} = 552.15 \quad (2.37)$$

Визначимо критерій Фішера-Снедекора:

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_n}{S_p} = \frac{552.15}{552.59} = 0.999 \quad (2.38)$$

Табличний критерій Фішера-Снедекора для $n - 1$: $F_{\text{табл}_{11,11,0.01}} = 2.82$.

Оскільки $F_{\text{розр}}$ менше $F_{\text{табл}}$, то модель є адекватною з ймовірністю 99%. [9]

2.4 Послідовна корекція контурів управління.

Оскільки розрахована модель є адекватною, то наступним етапом є налаштування параметрів регулятора контурів керування. Як правило в даних системах використовується каскадна схема керування. Каскадна система керування будується за принципом «Швидкі динамічні параметри – внутрішній контур, а повільні – зовнішні». Виходячи з того, що швидкість зміни моменту інерції значно перевищує інші динамічні змінні, його було прийнято як внутрішній контур.

2.4.1 Послідовна корекція контуру управління по моменту ділянки розмотки.

Для виконання послідовної корекції контуру регулювання моменту на вхід розімкнутого контуру вводиться регулятор моменту з передатною функцією W_{PM} , як це показано на рис. 2.8.

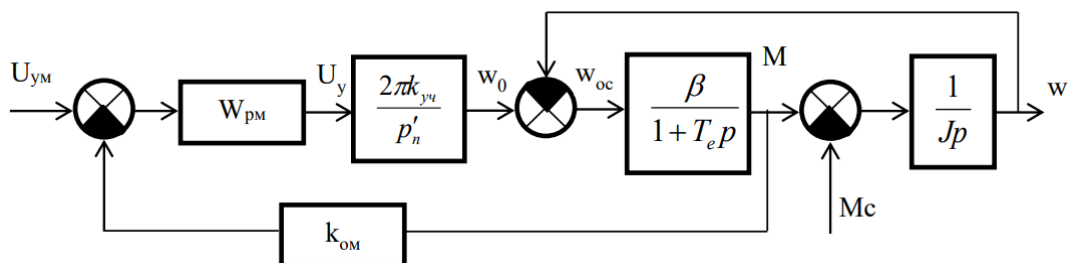


Рисунок 2.8 – Структурна схема контуру регулювання моменту

При розробці контуру регулювання моменту зворотний зв'язок по швидкості тимчасово розмикається, оскільки його вплив на динаміку приводу вважається незначним. Для оцінки його впливу на точність регулювання припускають, що зміни швидкості є незалежним збурюючим впливом. Спрощену структуру такого контуру можна побачити на рис. 2.9.

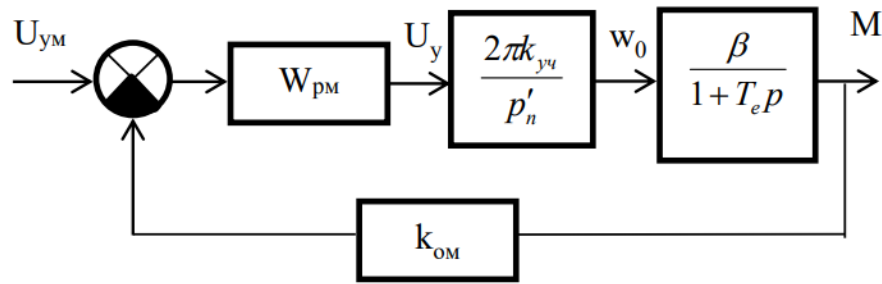


Рисунок 2.9 – Спрощена структурна схема контуру регулювання моменту

Для запису бажаної передатної функції розімкненого контуру з урахуванням неединичного зворотного зв'язку, використовується вираз:

Коефіцієнт k_{yc} визначається за такою формулою:

$$k_{yc} = \frac{f}{U_{ym}} \quad (2.39)$$

При даних параметрах $f = 50 \text{ Гц}$ та $U_{ym} = 10 \text{ В}$, коефіцієнт становить:

$$k_{yc} = \frac{50}{10} = 5 \text{ Гц/В}$$

k_0 визначається за наступною формулою:

$$k_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{yc}}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 5}{4} = 7.85 \quad (2.40)$$

де p_n' – число пар полюсів = 4.

k_{oc} визначимо за формулою:

$$k_{oc} = \frac{U_{ocm}}{M_H} = \frac{10}{75.32} = 0.133 \quad (2.41)$$

Стала часу T_e :

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_k} = \frac{1}{78.5 \cdot 0.184} = 0.070 \text{ с} \quad (2.42)$$

Жорсткість β :

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{75.32}{78.5 - 73.3} = 14.49 \quad (2.43)$$

Стала часу T_M :

$$T_M = \frac{\Sigma j}{\beta} = \frac{1.198}{14.49} = 0.083 \text{ с} \quad (2.44)$$

Виведемо передатну функцію регулятора.

Передатна функція розімкнутої системи визначається за формулою:

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{k_0 \cdot \beta}{T_e \cdot p + 1} \quad (2.45)$$

Передатна функція бажаної системи:

$$W_{\text{баж}}(p) = \frac{\frac{1}{k_{0c}}}{2 \cdot T_M \cdot p \cdot (T_M \cdot p + 1)} \quad (2.46)$$

Визначимо передатну функцію ПІ-регулятора як співвідношення:

$$W_{\text{рм}}(p) = \frac{W_{\text{баж}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{\left(\frac{1}{k_{0c}}\right) \cdot (T_e \cdot p + 1)}{2 \cdot k_0 \cdot \beta \cdot T_M \cdot p \cdot (T_M \cdot p + 1)} \quad (2.47)$$

Підставивши значення отримуємо передатну функцію:

$$W_p(s) = \frac{7.518 \cdot (0.070s + 1)}{2 \cdot 7.85 \cdot 14.49 \cdot 0.083 \cdot s \cdot (0.083s + 1)} = \frac{0.52s + 7.518}{1.57s^2 + 18.89s}$$

Структурна схема в MATLAB Simulink представлена на рис 2.10.

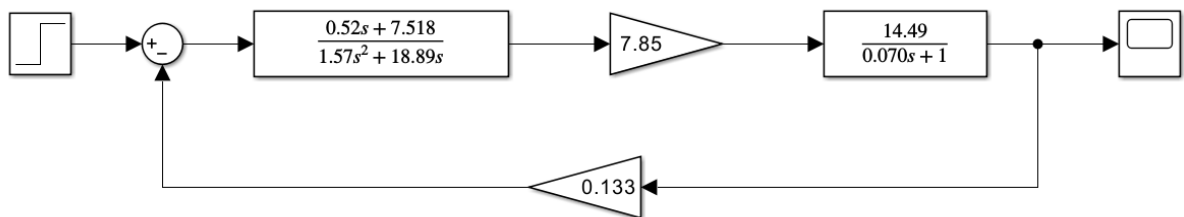


Рисунок 2.10 – Структурна схема налаштування на технологічний оптимум по моменту в MATLAB Simulink

Графік перехідного процесу представлений рис 2.11.

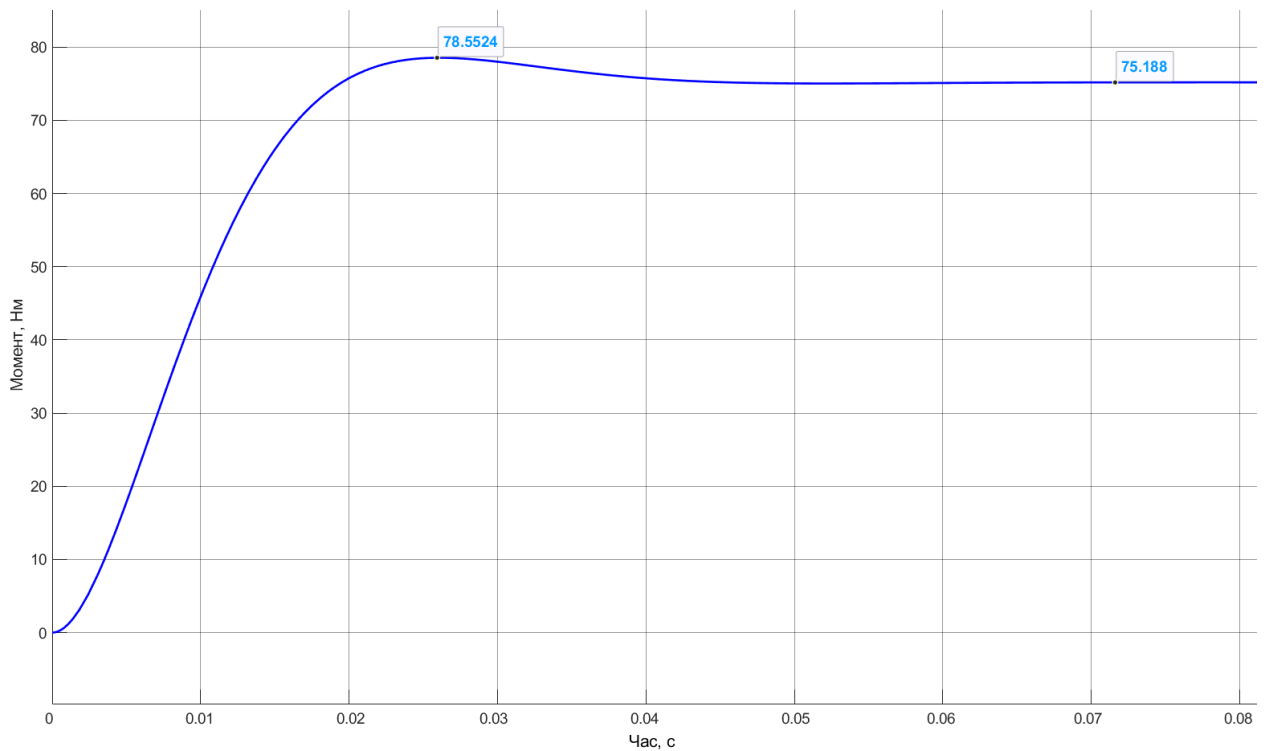


Рисунок 2.11 – Перехідний процес під час налаштування на технологічний оптимум по моменту

Час перехідного процесу $T_{pc} = 0.07$ с, що задовольняє вимогу $5.0T_m$.

Перерегулювання складає: $\sigma = \frac{78.55 - 75.18}{75.18} \cdot 100\% = 4.2\%$

Перерегулювання також задовольняє вимогу 4.5%.

2.4.2 Послідовна корекція контуру управління за швидкістю ділянки розмотки.

Наступним контуром є контур керування швидкістю, який каскадно з'єднаний з контуром керування моментом. Це дозволить досягти кращої точності в регулюванні та стабільності роботи системи, так як вимоги до швидкості руху стрічки є критичними. Спочатку коригується момент для стабільної роботи, а потім налаштовується швидкість, щоб система могла адаптуватися до змінних умов експлуатації і забезпечити ефективну роботу

без перевантажень чи збоїв. Розрахунки параметрів регулятора наведені нижче:

При налаштуванні на технологічний оптимум за швидкістю застосовується наступна структурна схема (рис. 2.12): [10]

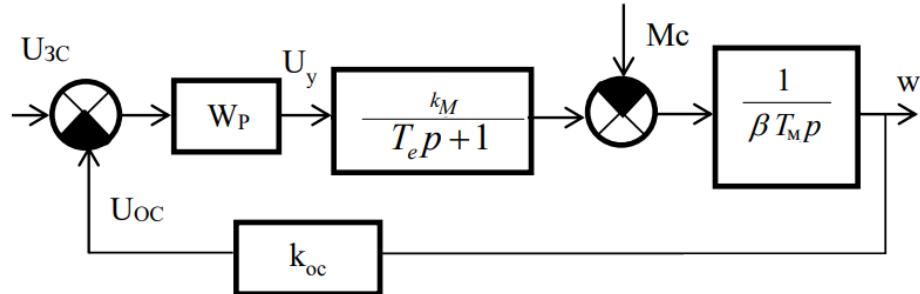


Рисунок 2.12 – Структурна схема для налаштування на технологічний оптимум по швидкості

Коефіцієнт зворотного зв'язку K_{occ} розраховується за формулою:

$$K_{occ} = \frac{U_{oc}}{\omega_H} = \frac{10}{73.3} = 0.137$$

Коефіцієнт K_{pc} :

$$K_{pc} = \frac{K_{occ} \cdot 2 \cdot 5}{\beta} = \frac{0.137 \cdot 2 \cdot 5}{14.49} = 0.095$$

Виведемо передатну функцію регулятора:

$$W_{pc}(s) = \frac{\frac{1}{K_{pc}}}{2 \cdot K_{pc} \cdot \beta \cdot T_{pc} \cdot s} = \frac{10.53}{0.192s} \quad (2.48)$$

Далі з рівняння:

$$W(s) = W_p(s) \cdot W_{pc}(s) = \frac{5.4756s + 79.1756}{0.139s^3 + 1.663s^2} \quad (2.49)$$

Структурна схема в MATLAB Simulink представлена на рис. 2.13.

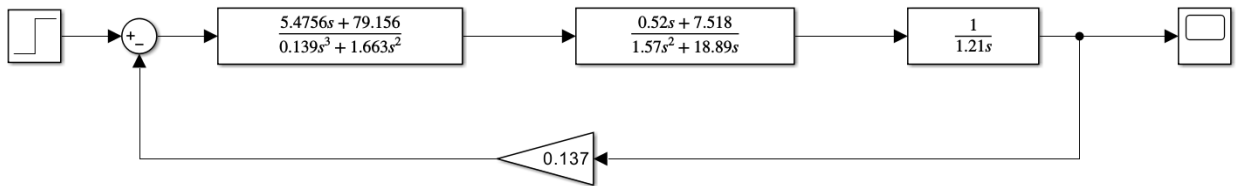


Рисунок 2.13 – Структурна схема для налаштування на технологічний оптимум за швидкістю в MATLAB Simulink

Графік перехідного процесу представлений рис. 2.14.

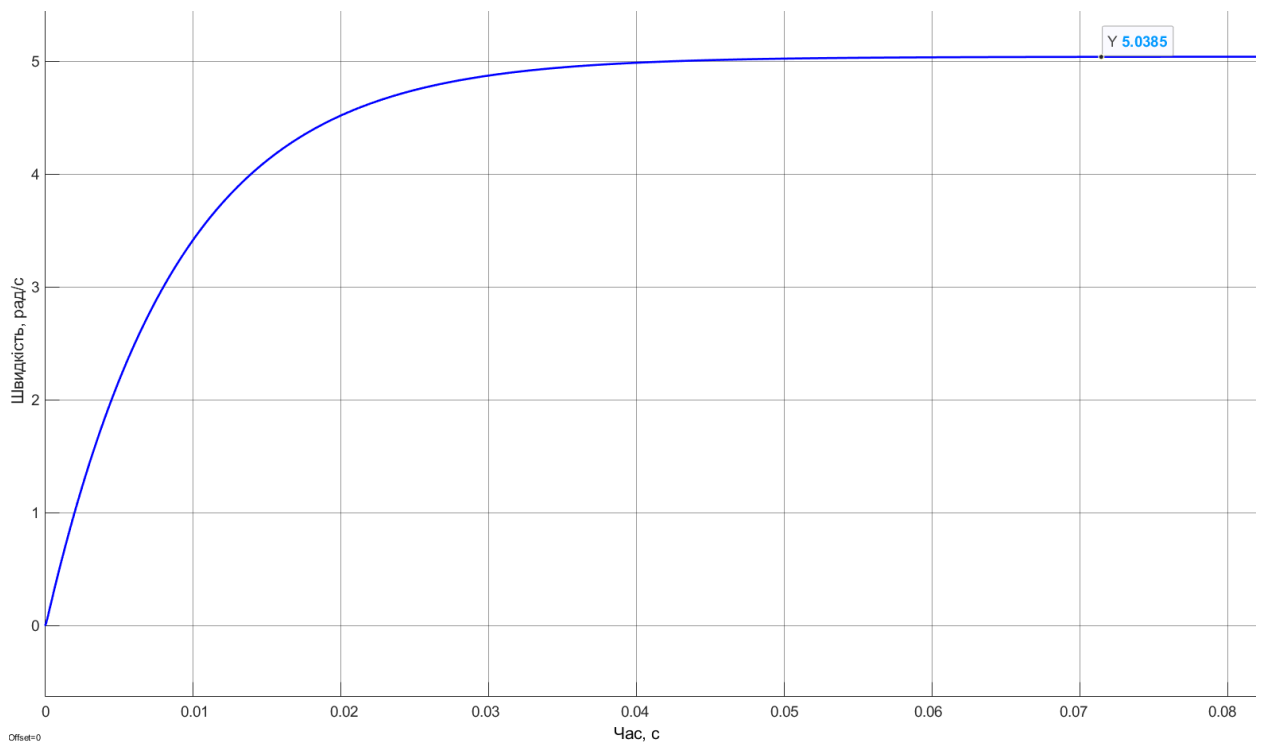


Рисунок 2.14 – Перехідний процес під час налаштування на технологічний оптимум за швидкістю

Час перехідного процесу $T_{pc} = 0.072\text{с}$, що задовольняє вимогу $5.0T_m$.

Перерегулювання складає: $\sigma = \frac{5.04 - 5.04}{5.04} \cdot 100\% = 0.0\%$

Перерегулювання також задовольняє вимогу 4.5%.

Після перевірки робимо висновок, що модель відповідає реальним даним і є адекватною для подальшого використання.

2.4.3 Послідовна корекція контуру управління по моменту ділянки намотки.

Для ділянки намотки проведемо аналогічні дії, що описані вище для ділянки розмотки, з використанням відповідних налаштувань контуру регулювання моменту та схеми, подібної до наведеної на рис. 2.9 та рис. 2.10.

Запишемо бажану передатну функцію розімкнутого контуру з урахуванням неединичного зворотного зв'язку у вигляді:

$$k_{yч} = \frac{50}{10} = 5 \text{ Гц/В}$$
$$k_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{yч}}{p_{п}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 5}{4} = 7.85$$
$$k_{oc} = \frac{U_{ocм}}{M_H} = \frac{10}{75.32} = 0.133$$
$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_k} = \frac{1}{78.5 \cdot 0.184} = 0.070 \text{ с}$$
$$\beta = \frac{M_H}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{75.32}{78.5 - 73.3} = 14.49$$
$$T_M = \frac{\Sigma j}{\beta} = \frac{0.338}{14.49} = 0.024 \text{ с}$$

Визначимо передатну функцію ПІ-регулятора як співвідношення:

$$W_{pм}(p) = \frac{W_{бaj}(p)}{W_{pоз}(p)} = \frac{(1/k_{oc}) \cdot (T_e \cdot p + 1)}{2 \cdot k_0 \cdot \beta \cdot T_M \cdot p \cdot (T_M \cdot p + 1)}$$

Підставивши значення отримуємо передатну функцію:

$$W_p(s) = \frac{7.518 \cdot (0.070s + 1)}{2 \cdot 7.85 \cdot 14.49 \cdot 0.024 \cdot s \cdot (0.024s + 1)} = \frac{0.52s + 7.518}{0.13s^2 + 5.46s}$$

Структурна схема в MATLAB Simulink представлена на рис 2.15.

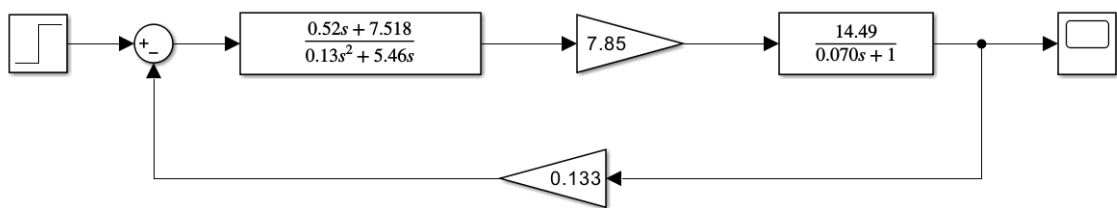


Рисунок 2.15 – Структурна схема налаштування на технологічний оптимум по моменту.

Графік перехідного процесу представлений рис 2.16.

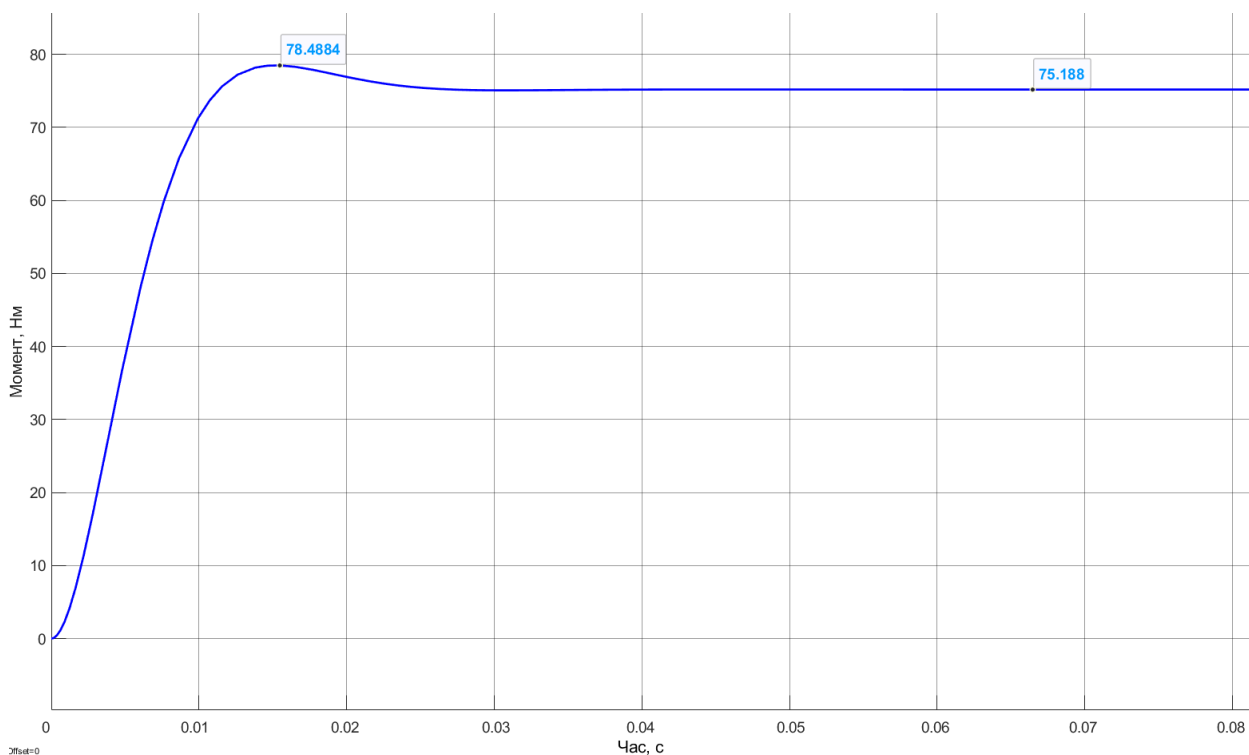


Рисунок 2.16 – Перехідний процес під час налаштування на технологічний оптимум по моменту

Час перехідного процесу $T_{pc} = 0.067\text{с}$, що задовольняє вимогу $5.0T_m$.

Перерегулювання складає: $\sigma = \frac{78.49 - 75.19}{75.19} \cdot 100\% = 4.4\%$

Перерегулювання також задовольняє вимогу 4.5%.

2.4.4 Послідовна корекція контуру управління за швидкістю ділянки намотки.

При налаштуванні на технологічний оптимум за швидкістю застосовується аналогічна структурна схема, яка зображена на рис. 2.12 та рис. 2.13.

Коефіцієнт зворотного зв'язку K_{occ} розраховується за формулою:

$$K_{occ} = \frac{U_{oc}}{\omega_H} = \frac{10}{73.3} = 0.137$$

Коефіцієнт K_{pc} :

$$K_{pc} = \frac{K_{occ} \cdot 2 \cdot 5}{\beta} = \frac{0.137 \cdot 2 \cdot 5}{14.49} = 0.095$$

Виведемо передатну функцію регулятора:

$$W_{pc}(s) = \frac{1/K_{pc}}{2 \cdot K_{pc} \cdot \beta \cdot T_{pc} \cdot s} = \frac{10.53}{0.192s}$$

Далі з рівняння:

$$W(s) = W_p(s) \cdot W_{pc}(s) = \frac{5.4756s + 79.202}{0.025s^3 + 1.049s^2}$$

Структурна схема в MATLAB Simulink представлена на рис. 2.17.

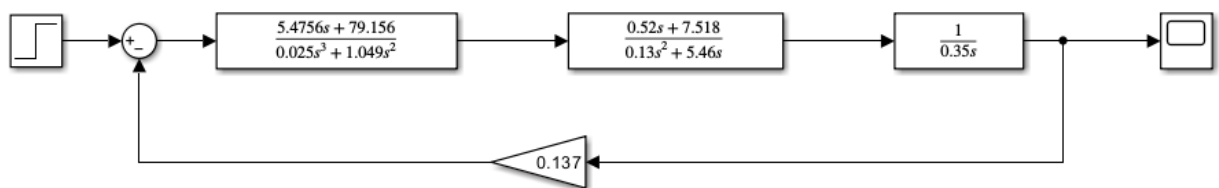


Рисунок 2.17 – Структурна схема для налаштування на технологічний оптимум за швидкістю

Графік перехідного процесу представлений рис. 2.18.

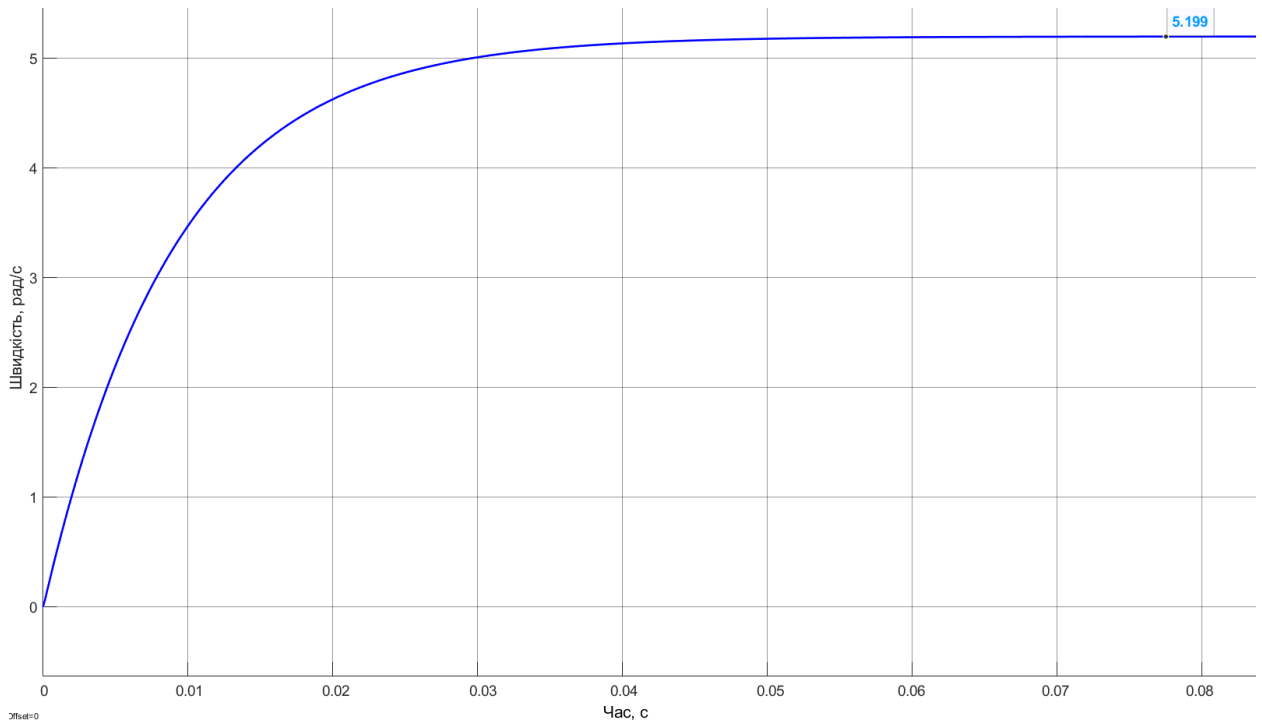


Рисунок 2.18 – Перехідний процес під час налаштування на технологічний оптимум за швидкістю

Час перехідного процесу $T_{pc} = 0.078\text{с}$, що задовольняє вимогу $5.0T_m$.

Перерегулювання складає: $\sigma = \frac{5.199-5.199}{5.199} \cdot 100\% = 0.0\%$

Перерегулювання також задовольняє вимогу 4.5%.

Після перевірки робимо висновок, що аналогічно до ділянки розмотки модель відповідає реальним даним і є адекватною для подальшого використання.

На основі попереднього аналізу збираємо повну модель системи, яка враховує динаміку зміни радіуса рулону та його вплив на робочий момент. Це дозволяє врахувати ключові фактори, які викликають коливання і нестабільність, зокрема зменшення моменту інерції зі зменшенням радіусу рулону.

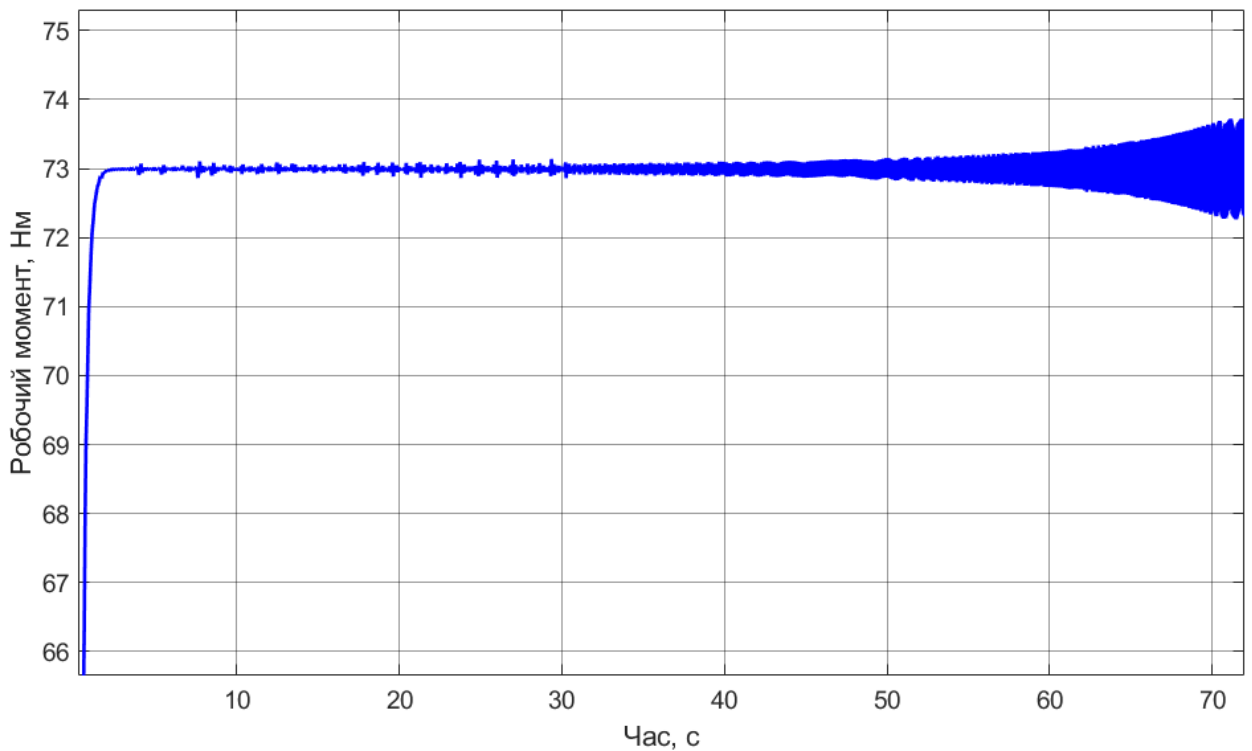


Рисунок 2.19 – Коливання робочого моменту з врахуванням зміни радіусу рулону

На представленому графіку проаналізовано вплив використання звичайного ПІ-регулятора на динаміку робочого моменту двигуна в системі.

Після швидкого встановлення моменту спостерігаються наростаючі коливання. Це свідчить про недостатнє пристосування до змін умов системи. Звичайний ПІ-регулятор, налаштований на статичні умови, не здатен забезпечити стабільність за змінних параметрів. Ці збурення є внутрішніми, оскільки вони виникають внаслідок зміни радіусу рулонів під час розмотування і намотування, що безпосередньо впливає на момент інерції системи. Вони є детермінованими, так як їх можна передбачити або промодельовати, використовуючи залежності між радіусом рулону, моментом інерції, натягом стрічки та робочим моментом двигуна.

Окрім того, ці збурення характеризуються динамічним характером, оскільки їхній вплив змінюється з часом у процесі роботи системи. Наприклад, при зменшенні радіусу рулону момент інерції системи знижується, що впливає на стабільність натягу, робочий момент та швидкість

транспортування полотна. Таким чином, характер цих збурень потребує особливої уваги для розробки системи керування, яка може динамічно адаптуватися до змінних умов.

Виходячи з цього, необхідно створити адаптивний механізм, який у реальному часі враховує зміну радіуса рулону, забезпечуючи стабільний робочий момент. Ключовим параметром адаптації є радіус рулону, який безпосередньо впливає на робочий момент та інші величини. Адаптація параметрів базується на його зміні.

Розроблена модель дозволить оцінити вплив цих змін та налаштувати регулятор для компенсації таких впливів, що є ключовим для якісної роботи обладнання.

Але виникають питання, Чому саме робочий момент? Або чому ж все таки так важливо підтримувати стабільним робочий момент у системах намотування рулонів і як пояснити його вплив на інші величини? [11]

Все дуже просто:

- **Натяг стрічки:** Робочий момент визначає силу, що прикладається до стрічки. Неправильний момент може спричинити обрив стрічки (надмірний натяг) або її провисання (недостатній натяг).
- **Лінійна швидкість:** Вона залежить від робочого моменту через силу тертя між стрічкою і роликками. Нестабільний момент може спричинити нерівномірну швидкість.
- **Момент інерції:** Зі зменшенням радіуса рулону момент інерції знижується, що вимагає корекції робочого моменту для підтримання стабільного натягу.
- **Енергоефективність:** Підтримка робочого моменту дозволяє зменшити споживання енергії шляхом оптимізації зусиль двигуна.

У загальному вигляді система працює за алгоритмом, представленим у додатку А. Блок-схема підпрограми керування трактом транспортування наведена у додатку Б.

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТРАКТОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ

У процесі розробки системи керування для тракту транспортування паперорізальної машини основною задачею є забезпечення стабільного натягу та швидкості стрічки паперу під час її руху. Це особливо важливо, коли рулон поступово зменшується у радіусі, що змінює його момент інерції. Подібні зміни можуть негативно вплинути на стабільність приводу та якість обробки матеріалу, якщо система керування не адаптується до таких динамічних змін.

Мета цієї системи полягає у створенні адаптивного механізму, який у реальному часі враховує зміну радіуса рулону, забезпечуючи стабільний натяг та швидкість. Розроблена модель дозволяє оцінити вплив цих змін та налаштувати регулятор для компенсації таких впливів, що є ключовим для якісної роботи обладнання.

Підготовлена структурна схема системи ілюструє два незалежні контури регулювання швидкості, кожен із яких враховує натяг стрічки. Також у схемі реалізовано алгоритм автоматичної адаптації параметрів регулятора для компенсації зміни радіусу рулону, а відповідно і моменту інерції.

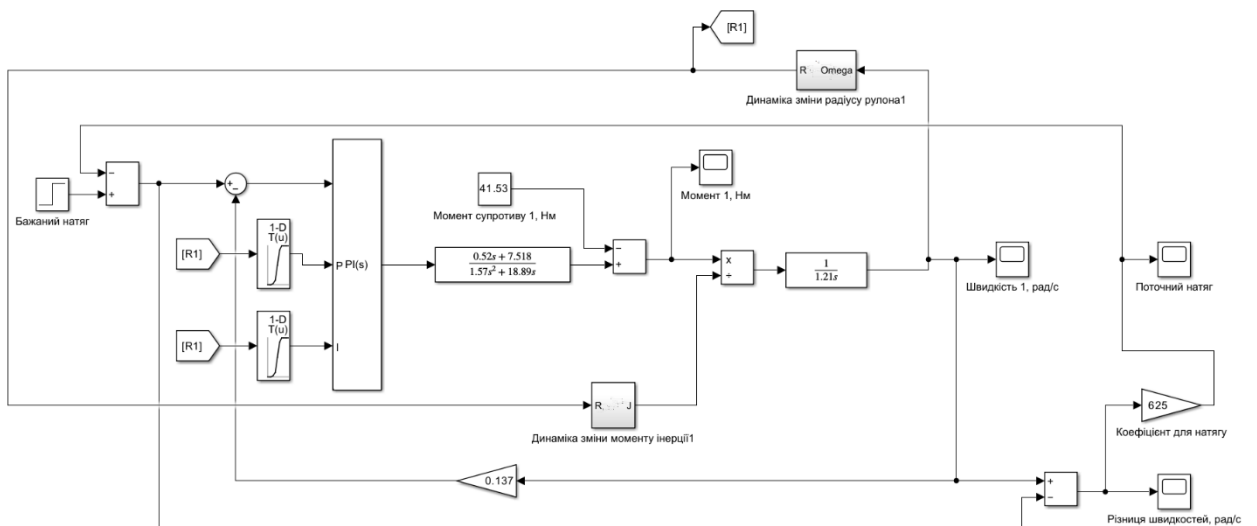


Рисунок 3.1 – Математична модель ділянка розмотки в MATLAB Simulink

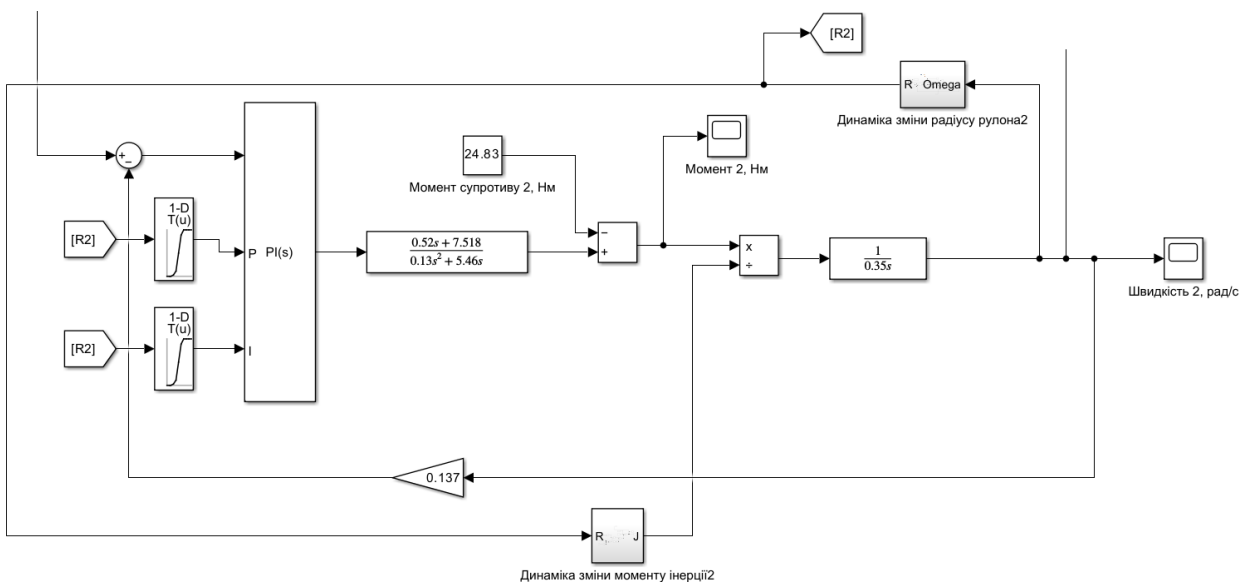


Рисунок 3.2 – Математична модель ділянка намотки в MATLAB Simulink

Процес адаптації налаштувань регулятора до змін режиму може виконуватися безперервно, що потребує додаткових обчислювальних ресурсів або за допомогою табличного керування. Для цього формується масив параметрів регуляторів, відповідних робочим точкам, і зберігається в пам'яті ПЛК. Алгоритм роботи базується на методах регуляторів зі змінною структурою. Вибір регулятора R_i здійснюється серед n -варіантів, залежно від стану робочої точки та аналізу вхідного/вихідного сигналів контуру регулювання. Основним критерієм адаптації регулятора є поточний стан

робочої точки, а логіка коригування коефіцієнтів регулятора визначає, чи відповідають параметри регулятора його поточному стану. Якщо параметри не відповідають, то продовжується пошук відповідної точки. [12]

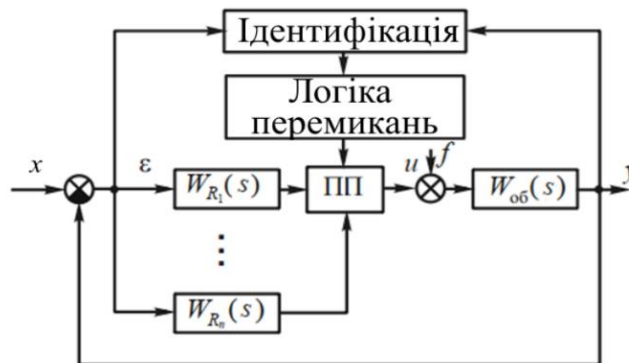


Рисунок 3.3 - Принцип побудови структурно-адаптивної системи: ПП – пристрій перемикачів

Пошук відповідних значень коефіцієнтів регулятора можна ефективно реалізувати за допомогою нелінійних таблиць Look Up Table 1D в MATLAB Simulink.

Внесення значень коефіцієнтів ПІ-регулятора K_p та K_i , які відповідають певному радіусу рулону в таблиці 1D проводиться на основі результатів експериментів, виконаних за допомогою ЕУ. [13]

Для значень радіусу, які знаходяться між встановленими межами в таблиці Look Up Table, виконується лінійна інтерполяція, що дозволяє уникнути різких змін у розрахунках коефіцієнтів ПІ-регулятора. [12]

Як показано на рис. 3.3, при зміні робочої точки, що залежить від поточного значення радіусу рулону, значення коефіцієнтів K_p та K_i надходять до порту налаштувань ПІ-регулятора. Перехід від етапу адаптації до етапу стабілізації робочого моменту двигуна (а відповідно швидкості та натягу стрічки) відбувається після визначення коефіцієнтів регулятора R_i .

Моделювання в середовищі MATLAB дозволило провести параметричний синтез сімейства ПІ-регуляторів для управління ЕУ. У процесі адаптації система враховує зміну радіуса рулону, яка впливає на момент інерції, натяг стрічки та швидкість руху. У ході моделювання

аналізувалися динамічні характеристики системи, зокрема її реакція на зміну умов роботи. На наступних графіках представлено результати моделювання, що ілюструють поведінку системи в різних режимах і її здатність до стабілізації.

Так як момент інерції пов'язаний із моментом двигуна через залежність динаміки руху системи від маси та геометричних характеристик обертальних компонентів. Наша система працює з рулонним матеріалом, тому момент інерції змінюється залежно від радіуса рулону. Це впливає на зусилля, необхідне двигуну для підтримання стабільної швидкості та натягу стрічки.

Формула для моменту інерції рулону:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 \quad (3.1)$$

де m — маса рулону, R — поточний радіус рулону.

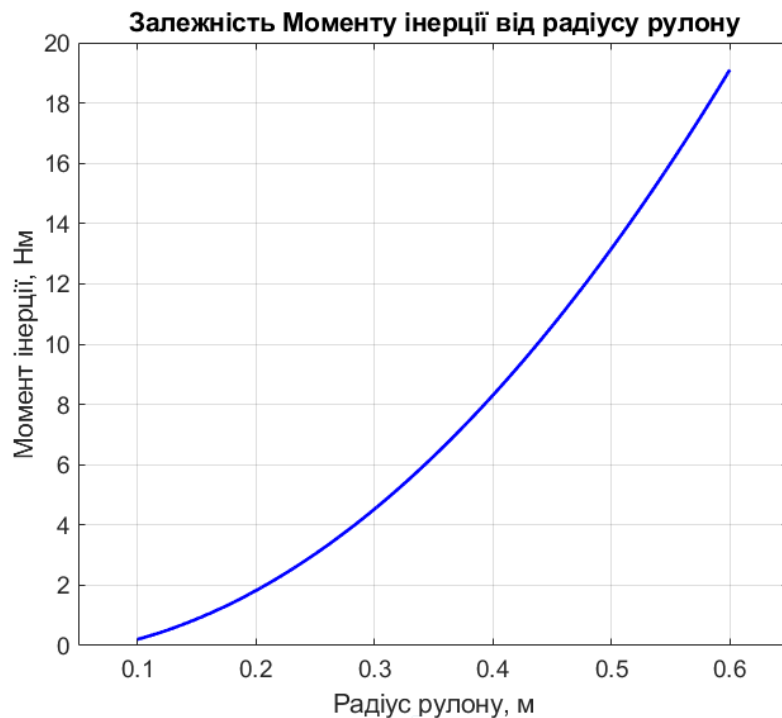


Рисунок 3.4 – Залежність моменту інерції від радіусу рулону

Графік, який показує залежність моменту інерції від радіусу рулону, демонструє, що момент інерції збільшується квадратично зі збільшенням радіусу. З цього випливає, що чим менший радіус рулону, тим менший

момент інерції, отже, менше навантаження на двигун. Адаптація параметрів ПІ-регулятора враховує ці зміни для забезпечення стабільного управління.

Натяг стрічки є залежною змінною від швидкості обертання рулону. В системах такого типу задаючий сигнал натягу використовується для непрямого керування швидкістю, оскільки натяг напряму залежить від швидкості розмотування і намотування стрічки. ПІ-регулятор фактично керує швидкістю, але цільовою метою є стабілізація натягу через управління цими параметрами. [14]

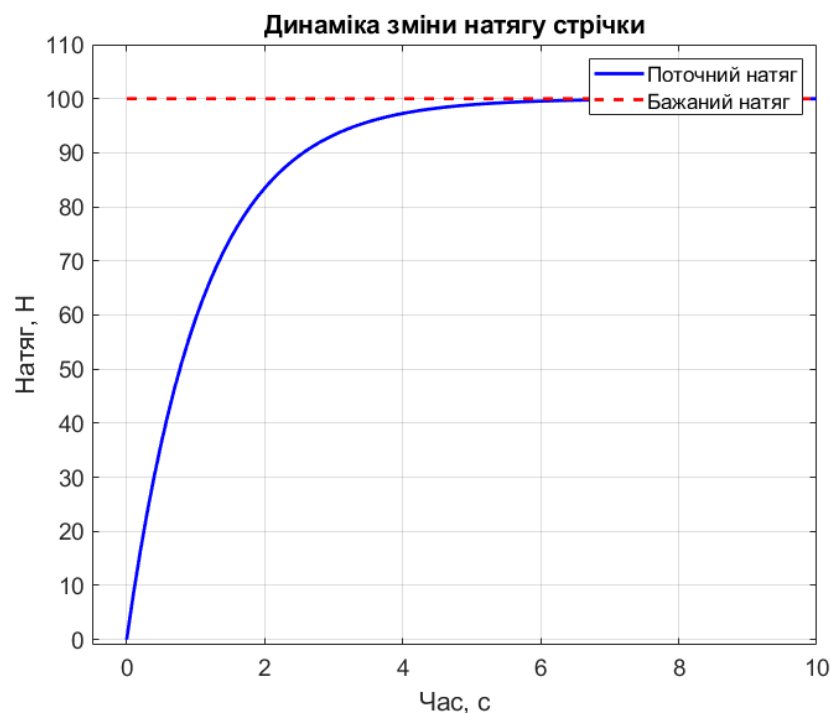


Рисунок 3.5 – Динаміка зміни натягу стрічки

Графік демонструє динаміку зміни натягу стрічки в системі. Спостерігається, що система досягає стабільності за приблизно 5 секунд, із плавним переходом без значних коливань. Це свідчить про адекватність регулятора для підтримки заданого натягу.

Різниця швидкостей у нашій та подібних системах виникає через необхідність підтримувати належний натяг стрічки між двома ділянками. ПІ-регулятори працюють автономно, але взаємопов'язано через передавальний

сигнал натягу, який є задаючим параметром. У разі зміни параметрів стрічки чи умов роботи кожен регулятор адаптує свою швидкість, враховуючи зміну моменту інерції рулону та динаміки процесу. Це дозволяє уникнути обриву стрічки або її провисання, що могло б вплинути на якість різання чи цілісність рулону.

Для забезпечення необхідного натягу швидкість 1 (Розкату) трохи менша, ніж швидкість 2 (Накату). Ця різниця (~3-5%) враховується в керуванні для компенсації втрат і досягнення стабільності натягу. Отже, щоб зберігати сталий натяг, швидкість рулону на розкаті збільшується зі зменшенням радіуса, тоді як на накаті вона зменшується зі збільшенням радіуса. [15]

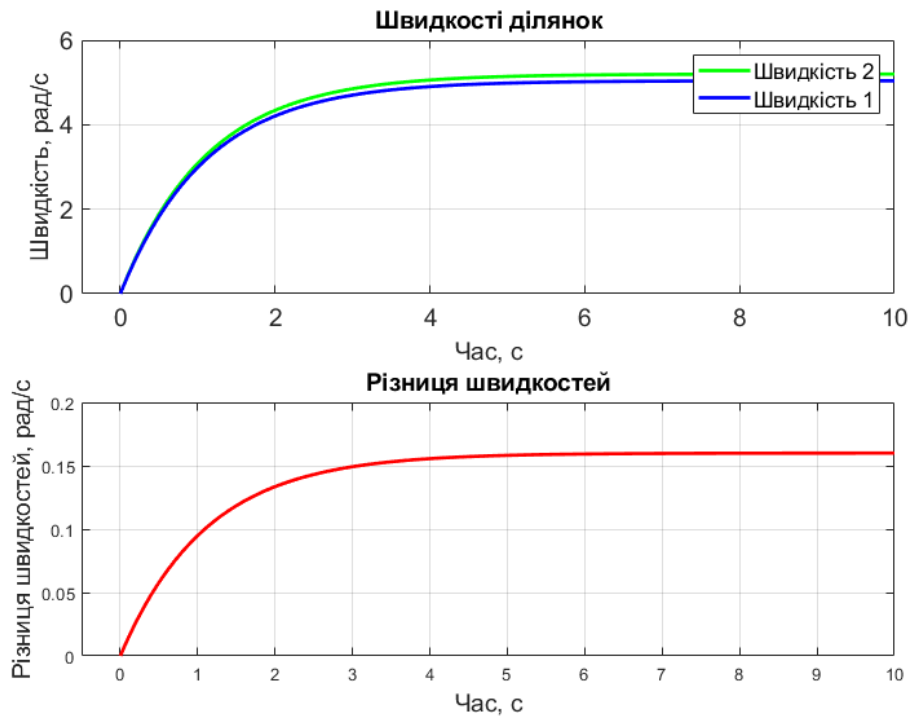


Рисунок 3.6 – Швидкості ділянок та їх різниця

У процесі моделювання системи було передбачено використання давача вимірювання радіуса рулону. Його дані є ключовими для адаптації параметрів регулятора.

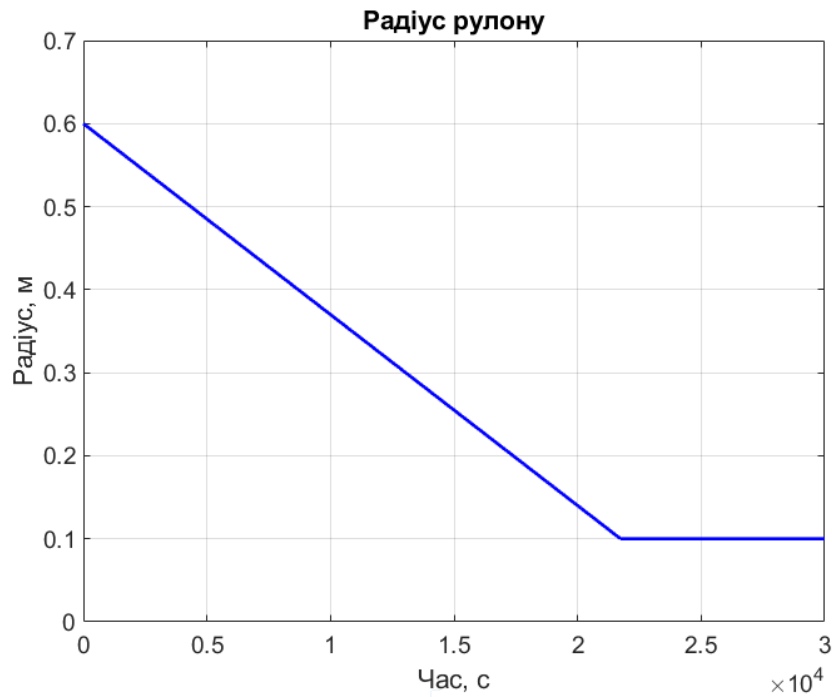


Рисунок 3.7 – Динаміка зміни радіусу рулону

Графік змін радіуса рулону демонструє, як радіус поступово зменшується в процесі розмотування стрічки. Для процесу намотування графік буде ідентично зворотній. При зменшенні радіуса виникають нестабільності через зміну динаміки системи.

У нашій системі, де процеси намоту і розкату обумовлені зміною радіусу рулону, адаптація коефіцієнтів ПІ-регулятора стає необхідною для забезпечення стабільності й ефективності керованої системи.

1. **Пропорційний коефіцієнт (K_p):** Коли зменшується радіус рулону, момент інерції стає меншим. Це означає, що необхідно коригувати коефіцієнт K_p , щоб уникнути занадто агресивної реакції регулятора на зміни.
2. **Інтегральний коефіцієнт (K_i):** Оскільки система може мати більші коливання на початкових етапах зменшення радіусу, коефіцієнт K_i необхідно коригувати для зменшення ефекту перерегулювання і забезпечення стабільності.

Ця адаптація здійснюється у реальному часі, при цьому враховується, що зміни радіусу є прогнозованими (зміна радіусу є лінійною і поступовою), що дозволяє налаштовувати регулятори відповідно до зменшення інерції.

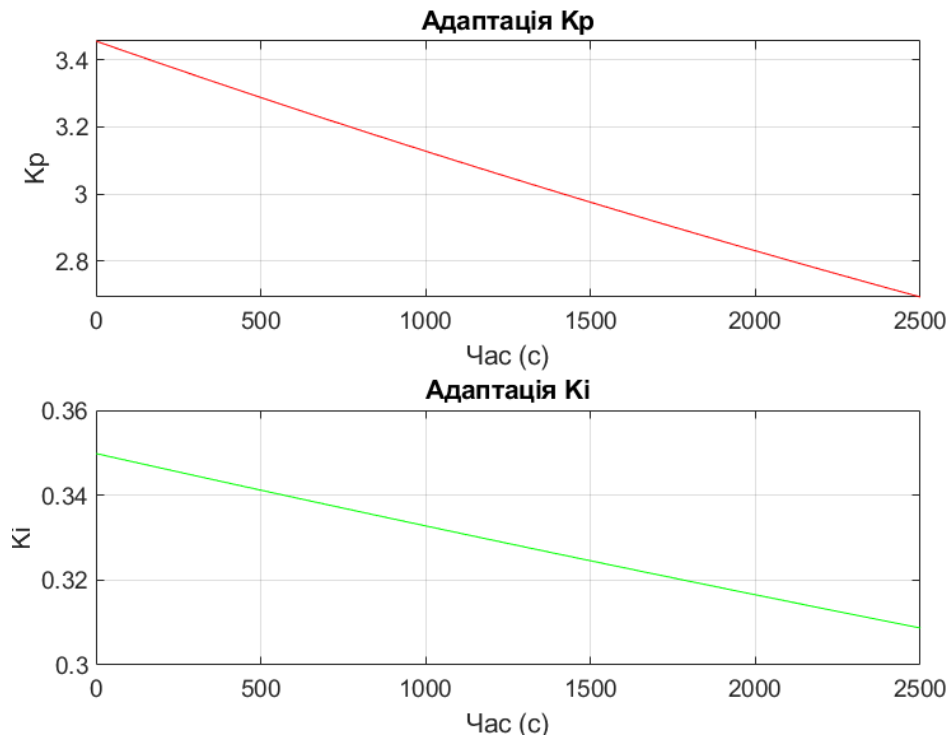


Рисунок 3.8 – Адаптація коефіцієнтів ПІ-регулятора для процесу розмотування рулону

На основі графіка можна зробити наступні висновки :

1. Пропорційний коефіцієнт (K_p):

- Зменшується зі зменшенням радіуса. Оскільки менший момент інерції робить систему чутливішою, і занадто великий K_p викликає коливання або перерегулювання.

2. Інтегральний коефіцієнт (K_i):

- Також зменшується, щоб уникнути накопичення інтегральної складової, особливо коли система стає менш інерційною. Але так, як нам потрібна плавна компенсація, K_i залишається майже стабільним.

Для процесу намотування рулону адаптація коефіцієнтів регулятора K_p та K_i є також ж важливою як і для розмотування.

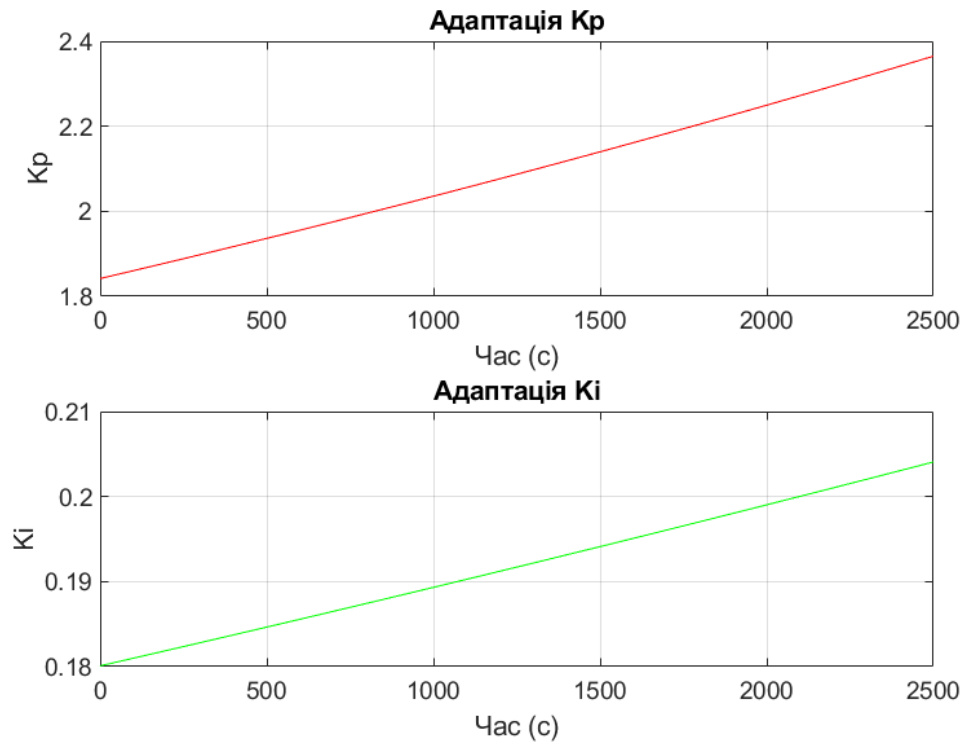


Рисунок 3.9 – Адаптація коефіцієнтів ПІ-регулятора для процесу намотування рулону

Графік адаптації коефіцієнтів K_p та K_i при намотуванні рулону ілюструє поступове збільшення значень цих параметрів у процесі.

- 1. Пропорційний коефіцієнт K_p :** Збільшується експоненціально, оскільки зі зростанням радіуса рулону збільшується момент інерції. Це дозволяє регулятору краще компенсувати зміну динаміки системи.
- 2. Інтегральний коефіцієнт K_i :** Також зростає, але зі зниженою швидкістю, щоб уникнути накопичення інтегральної складової, що могло б спричинити перерегулювання.

Зміна радіуса рулону безпосередньо впливає на стабільність робочого моменту двигуна, оскільки момент обертання залежить від радіуса рулону і натягу стрічки за формулою:

$$M = T \cdot R \quad (3.2)$$

де M — момент двигуна, T — натяг стрічки, R — радіус рулону.

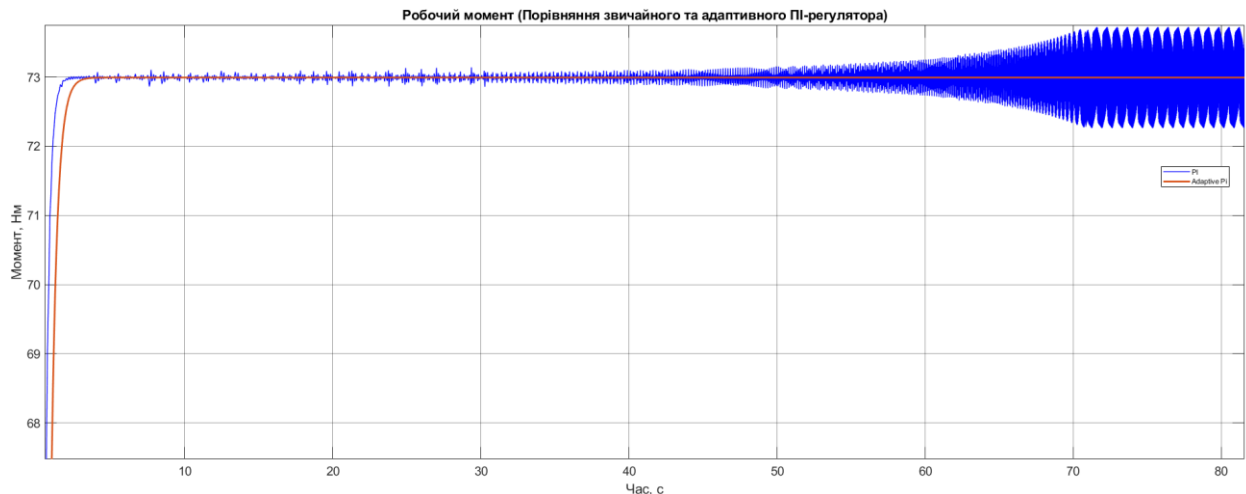


Рисунок 3.10 – Порівняння впливу звичайного та адаптивного ПІ-регулятора

На представленому графіку проаналізовано вплив використання звичайного ПІ-регулятора та адаптивного ПІ-регулятора на динаміку робочого моменту двигуна в системі:

Характеристики звичайного ПІ-регулятора (синя лінія):

- Після швидкого встановлення моменту спостерігаються наростаючі коливання. Це свідчить про недостатнє пристосування до змін умов системи.

Адаптивний ПІ-регулятор (помаранчева лінія):

- Забезпечує швидке встановлення моменту із меншими початковими коливаннями.
- Відсутність наростання амплітуди свідчить про ефективне адаптування до змін моменту інерції та інших параметрів системи.

Адаптивний регулятор показує значно кращу стабільність у порівнянні зі звичайним, забезпечуючи більш точне управління робочим моментом.

Наш адаптивний підхід усуває осциляції, які могли б знижувати ефективність і стабільність роботи і демонструє, як динамічне регулювання параметрів дозволяє системі стабільно працювати навіть у складних умовах зміни радіуса рулону.

ВИСНОВКИ

У ході аналізу було встановлено, що стабільність натягу стрічки, швидкості транспортування та робочого моменту двигунів значною мірою залежить від змінних параметрів системи, зокрема таких, як радіус рулону розкату та накату, а також момент інерції, який безпосередньо з ними пов'язаний.

Для опису роботи тракту транспортування була розроблена математична модель, яка враховує динамічні характеристики двох ділянок між розкатом і накатом. Верифікація цієї моделі підтвердила її відповідність реальним умовам роботи, що дозволило застосувати її для подальшого аналізу та оптимізації параметрів системи.

На основі цієї моделі були налаштовані контури управління моментом і швидкістю для кожної ділянки тракту. Послідовна корекція цих контурів дозволила стабілізувати параметри роботи системи. Проте при об'єднанні ділянок у загальну систему і врахувавши, що при зміні радіусу рулонів розкату та накату, динамічні характеристики, зокрема момент інерції, змінюються, було встановлено, що звичайний ПІ-регулятор, налаштований на початкові параметри об'єкта, не справляється зі стабілізацією, що викликає коливання в роботі системи.

З метою вирішення цієї проблеми було прийнято рішення реалізувати адаптивну систему керування, здатну автоматично налаштовувати параметри регуляторів відповідно до змін параметрів системи. Для цього була розроблена адаптивна система, що базується на ПІ-регуляторах із автоматичним налаштуванням коефіцієнтів за допомогою Look-Up таблиць. Такий адаптивний підхід дозволив системі динамічно реагувати на зміни радіусу рулону, забезпечуючи стабільну роботу механізму та ефективне керування в умовах варіативності параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карпенко М.І. Сучасні технології автоматизації в поліграфії. – Одеса: Технологія, 2020. – 220 с.
2. Технологія транспортувальних механізмів у поліграфії. – Журнал "Механіка поліграфії", вип. №12. – 2023. – С. 35–50.
3. Runqing Liu, Tao Tao, Xuesong Mei, Xinping Xu, Xiaochao Sheng, Motion mechanism of rotating transverse paper cutting machine and its parameter optimization, *Procedia CIRP*, Volume 67, 2019, Pages 344-349.
4. Correia, M. H., Oliveira, J. F., Ferreira, J. S., "Lot Sizing and Cutting Stock Problems in a Paper Production Process," *Computers & Operations Research*, vol. 31, 2004.
5. Електропривод АИР132М8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://slemz.com.ua/elektroprivodi/zagalnopromyslovi/elektroprivod-air-132m8-5-5kvt-750obhv>
6. Григоренко О.В., Петров С.О. Сучасні системи транспортування в поліграфії. – Харків: Наука і техніка, 2021. – 180 с.
7. H. Gürocak, "Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications," John Wiley & Sons, Hoboken, 2016.
8. Chen, G. (2020). "Model Adequacy Checking and Diagnostic Methods." *Mathematics & Statistics, San José State University*.
9. F. Avram, N.N. Leonenko, N. Šuvak, Hypothesis testing for Fisher Snedecor diffusion, *J. Stat. Plan. Inference*, 142 (8) (2012), pp. 2308-2321.
10. Автоматизований електропривод ч.2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряев. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
11. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві. ОС Бешта, ОВ Балахонцев, ВА Бородай - Дніпро: НГУ, 2010.

12. Rugh W. J., Shamma, J. S. Research on gain scheduling. Automatica. 2020. no. 36(10). P. 1401–1425.
13. Wang, C., Gao, J., Liang, M. "Identification of Look-Up Tables Using Gradient Algorithm." – 2020.
14. Конспект лекцій автоматизація металургійного виробництва. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/537068/mod_resource/content/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B3%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0.pdf
15. Bebić, M., Ristić, L. "Speed Controlled Belt Conveyors: Drives and Mechanical Considerations." Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 51-60, January 2018, DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.