

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка та дослідження системи стабілізації натягу
полотна флексографічної машини»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Владислав ПОЧЕНІКІН

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Дмитро Трушаков

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Поченікіна Владислава Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи стабілізації натягу полотна флексографічної машини

2. Керівник роботи Трушаков Дмитро Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити систему автоматичної стабілізації натягу полотна флексографічної машини. 1. Аналіз процесу стабілізації натягу полотна; 2. Визначення характеристик системи автоматичного керування; 3. Синтез регулятора натягу полотна; 4. Розробка схеми системи стабілізації натягу.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		

Анотація

на випускн кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Поченікіна Владислава Олександровича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи стабілізації натягу полотна флексографічної машини».

Випускн кваліфікаційну роботу присвячено проблемі стабілізації натягу полотна у флексографічних друкарських машинах з метою підвищення якості друку та надійності роботи технологічного обладнання. У роботі виконано аналіз процесу транспортування полотна та ідентифікацію системи стабілізації натягу як об'єкта керування з визначенням її математичної моделі та передаточної функції. Розроблено структурну схему автоматизованої системи керування натягом полотна, обґрунтовано вибір типу регулятора та визначено його параметри. Проведено синтез регулятора системи стабілізації натягу з використанням методів теорії автоматичного керування та досліджено динамічні характеристики системи. За допомогою програмних пакетів MATLAB/Simulink виконано моделювання перехідних процесів та аналіз впливу параметрів регулятора на якість регулювання. Розроблено принципову схему системи автоматичного керування натягом полотна та розглянуто можливість її практичної реалізації. Також у роботі розглянуті питання охорони праці.

Ключові слова: флексографічна машина, натяг полотна, система автоматичного керування, регулятор, стабілізація.

Summary

of the graduation qualification thesis of a student of group AK-24M Pochenikin Vladyslav Oleksandrovykh, specialty 174 “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics”, entitled “Development and Research of a Web Tension Stabilization System for a Flexographic Printing Machine”.

The graduation qualification thesis is devoted to the problem of web tension stabilization in flexographic printing machines in order to improve print quality and reliability of technological equipment. The paper analyzes the web transport process and performs identification of the web tension stabilization system as a control object with determination of its mathematical model and transfer function. A structural diagram of the automated web tension control system is developed, the controller type is justified, and its parameters are determined. The synthesis of the controller is carried out using methods of automatic control theory, and the dynamic characteristics of the system are investigated. Simulation of transient processes and analysis of the influence of controller parameters on control quality are performed using MATLAB/Simulink software. A schematic diagram of the automated web tension control system is developed, and the possibility of its practical implementation is considered. Occupational safety issues are also addressed in the thesis.

Key words: flexographic printing machine, web tension, automatic control system, controller, stabilization.

Зміст

Вступ	5
1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	7
1.1 Особливості роботи флексографічних машин	7
1.2. Вплив нестабільності натягу полотна на якість друку	9
1.3. Постановка задачі стабілізації натягу полотна	12
2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАТЯГУ ПОЛОТНА	15
2.1. Механічні системи регулювання натягу полотна	15
2.2. Електромеханічні та електронні системи керування натягом	17
2.3. Аналіз датчиків натягу та виконавчих механізмів.....	20
2.4. Висновки щодо вибору принципу стабілізації натягу.....	22
3. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ	25
3.1. Побудова математичної моделі ділянки полотна.....	25
3.2. Модель електропривода як виконавчого механізму.....	28
3.3. Побудова передатної функції об'єкта регулювання.....	30
3.4. Аналіз динамічних характеристик системи.....	34
4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАТЯГУ	43
4.1. Вибір типу регулятора (П, ПІ або ПІД).....	43
4.2. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора.....	46
4.3. Моделювання процесу стабілізації натягу.....	49
4.4. Аналіз результатів моделювання та вплив параметрів регулятора...53	
5. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	60

5.1. Оптимізація параметрів ПДД-регулятора	60
5.2. Можливість впровадження адаптивного регулювання	64
5.3. Розробка рекомендацій для практичної реалізації системи стабілізації натягу полотна	71
ВИСНОВОК	76
Список використаних джерел.....	79

Вступ

Сучасна поліграфічна промисловість висуває високі вимоги до якості друку. Одним із ключових факторів, що впливає на якість флексографічного друку, є стабільність натягу полотна. Навіть незначні коливання натягу можуть призводити до деформацій зображення.

Флексографічні машини є складними електромеханічними системами, де натяг полотна визначається взаємодією приводів, кінематичних ланок та датчиків. Традиційні системи регулювання не забезпечують необхідної точності. У зв'язку з цим постає актуальність розробки сучасних автоматизованих систем стабілізації натягу з використанням ПІД-регуляторів.

Мета дослідження полягає у розробці та математичному моделюванні системи автоматичного регулювання натягу полотна флексографічної машини із застосуванням ПІД-регулятора та подальшою можливістю адаптивного вдосконалення.

Для реалізації поставленої мети дослідження були визначені та виконані такі завдання:

- провести аналіз існуючих систем регулювання натягу полотна та визначити їхні недоліки;
- обґрунтувати вибір типу регулятора для стабілізації натягу;
- розрахувати параметри ПІД-регулятора та провести його налаштування;
- розробити математичну модель системи стабілізації натягу;
- провести моделювання процесу стабілізації натягу;
- проаналізувати результати та дослідити вплив параметрів регулятора на якість процесу;
- запропонувати рекомендації щодо практичної реалізації системи;

- розглянути можливість впровадження адаптивного регулювання або інтелектуальних алгоритмів.

Об'єкт дослідження є процес стабілізації натягу полотна у флексографічній машині.

Предмет дослідження є система автоматичного регулювання натягу полотна та її математична модель.

Методи дослідження полягає у вдосконаленні алгоритму керування натягом полотна шляхом оптимізації параметрів ПД-регулятора та розгляді можливості адаптивного регулювання для підвищення точності та стійкості процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні основ для реалізації сучасної системи стабілізації натягу полотна, яку можна впровадити на промислових флексографічних машинах.

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Особливості роботи флексографічних машин

Флексографічний друк – одна з найпоширеніших технологій нанесення зображень на рулонні матеріали. Його головний козир – це право друкувати швидко та якісно на дуже різних за природою поверхнях, починаючи від тонких полімерних плівок і далі до щільного картону. Цей спосіб дає змогу виготовляти найрізноманітніші продукти – від етикеток і упаковок до обгорток і поліетиленових пакетів, де вимагаються висока продуктивність і точність кольоропередачі.

Флексографічний друкарський агрегат має модульну конструкцію, де кожна друкарська секція відповідає за свій колір. Зазвичай використовують від чотирьох до восьми секцій, які дають змогу виконати повноколірний друк за системою СМУК або Pantone. У кожній секції є формний циліндр, анілоксовий вал, фарбовий резервуар і притискний циліндр.

Флексографічний процес передбачає використання еластичних форм, які виготовлені з фотополімерного матеріалу, і саме цей матеріал переносить фарбу на поверхню виробу. Головне – фарба має дуже низьку в'язкість, тому її можна наносити дуже тонким шаром, одночасно з високими швидкостями друку.

Однією з головних вимог є синхронізація руху полотна між друкарськими секціями. Оскільки половина безперервно рухається, то навіть дуже мала різниця в натягу може викликати зсув зображення, спотворення контурів або розмиття кольорів. Мета досягнення яких - встановлення машини вбудованих датчиків натягу, які безперервно контролюють силу розтягування матеріалу. Інформація, отримана сигналами, передається в систему, що керує машиною, і вона змінює швидкість обертання приводів так, щоб в усіх зонах друку забезпечувався стабільний натяг.

Також до механічної точності таких складових, як розташування валів і циліндрів, однорідність тиску притискного вала та стан фарбопередавальних елементів, відноситься важливий внесок у якість друку. Сучасні верстати оснащені автоматичними системами вирівнювання і самодіагностики, які істотно знижують вплив людського фактора.

Флексографічні машини системи управління частіше всього базуються на використанні програмованих логічних контролерів (PLC), які збирають інформацію з датчиків, аналізують її та створюють управляючі сигнали для приводів. Це дає можливість, наприклад, досить точно контролювати технологічні параметри, такі як швидкість руху полотна, температура сушіння, тиск фарби і натяг.

Автоматизація виробничого процесу в флексографічному друці звертає сьогодні його в високоефективний і економічний процес, яким можна домагатися стабільної якості продукції як при малих, так і при великих тиражах. Основною проблемою ринку все ще залишається стабільність натягу полотна, від якої і залежить якість готової продукції, ресурс обладнання і кількість браку.

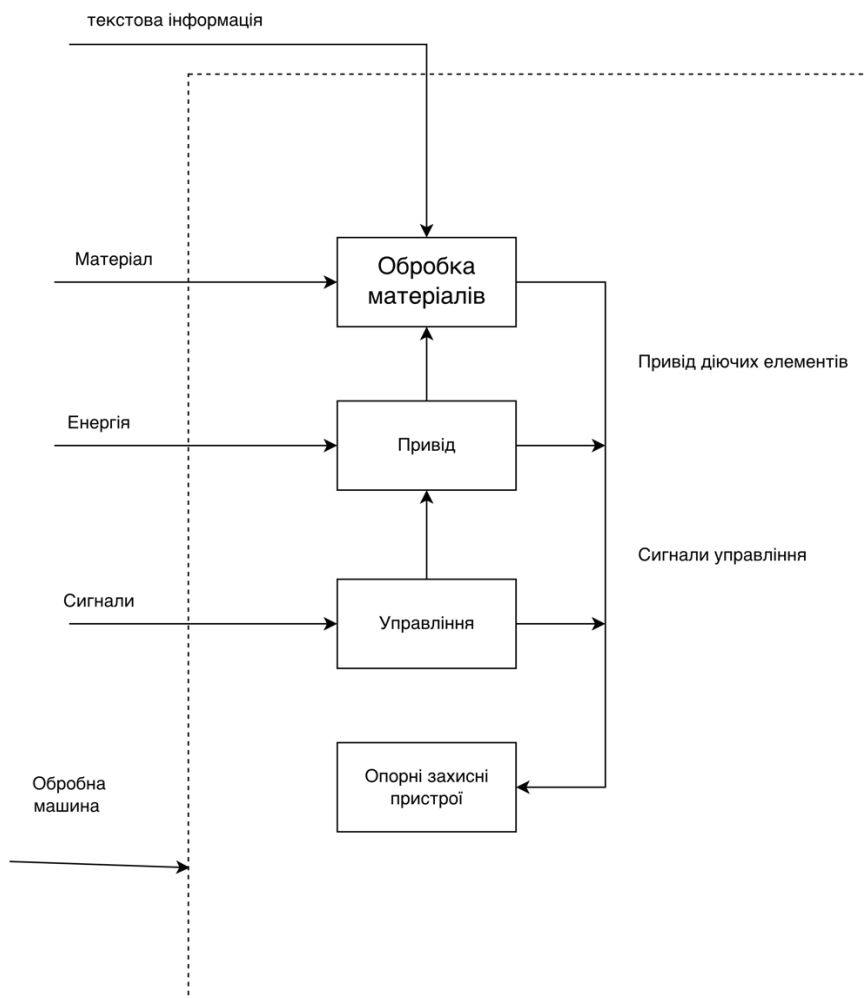


Рисунок 1.1 - Функціональна структура обробляючих машин

На рисунку показано функціональну структуру флексографічної машини в узагальненому вигляді. Вона створена дванадцять послідовно розташованих друкарських секцій, кожна з яких відповідає за нанесення окремого коліру. Основними елементами секції є формний циліндр, аналоговий вал, фарбовий резервуар та притискний циліндр. Полотно безперервно рухається крізь усі секції, а система датчиків натягу та автоматичного керування забезпечує синхронізацію його швидкості й стабільність натягу. Керуючі сигнали формуються програмованим логічним контролером (PLC), який обробляє дані з датчиків і регулює роботу електроприводів. Така структура дозволяє підтримувати високу

якість друку, точність кольоровідтворювання та мінімізувати вплив зовнішніх збурень.

1.2. Вплив нестабільності натягу полотна на якість друку

Одна із визначальних сфер якісного флексографічного друку - це стабільність натягу полотна впродовж усієї технологічної лінії виробництва. Колись полотна в флексографічній машині проходять через декілька секцій друку, сушильний пристрій, направляючі ролики та вузли намотування. Навіть дуже маленькі коливання натягу значною мірою можуть змінити геометрію малюнка, вплинути на точність суміщення кольорів і рівномірність нанесення фарби.

Під час друку дуже важливо, щоб швидкість руху полотна не залежала від часу, а натяг залишався однаковим у всіх секціях. За умови приросту натягу полотно надмірно розтягується, що призводить до спотворення зображення по довжині. При зниженні натягу утворюються хвилі, зморшки й нерівності, через які фарба лягає нерівномірно, і малюнок втрачає чіткість або смак зрушення.

Нестабільність натягу є проблемою полімовного друку, у якому навіть мінімальне зміщення простирадла спричиняє виникнення так званого "зсуву" (misregistration) кольорів. На виході контури стають нечіткими, кольори неправильно накладені, і відбиток втрачає свої властивості.

Крім того, справа у тому, що використані в флексографії матеріали (поліетилен, поліпропілен, лавсан, папір) мають різні пружні властивості. Деякі з них піддаються пластичній деформації або розтягненню під впливом температури в сушильній камері. Через це однаковий натяг, встановлений на початку процесу, може змінюватися під час друку.

Нестабільність натягу також відобразиться на рівномірності шару фарби. Полотно, що рухається нерівномірно, коли анілоксовий вал не

встигає рівномірно передавати фарбу на форму, стане причиною появи плям, смуг або відмінностей у насиченості кольору.

На більш просунутих машинах натяг регулюють за допомогою датчиків сили або обертального моменту, сигнали з яких надходять у систему автоматичного регулювання. Така система забезпечує зворотний зв'язок, завдяки якому натяг стабілізується незалежно від швидкості друку або змін діаметра рулону.

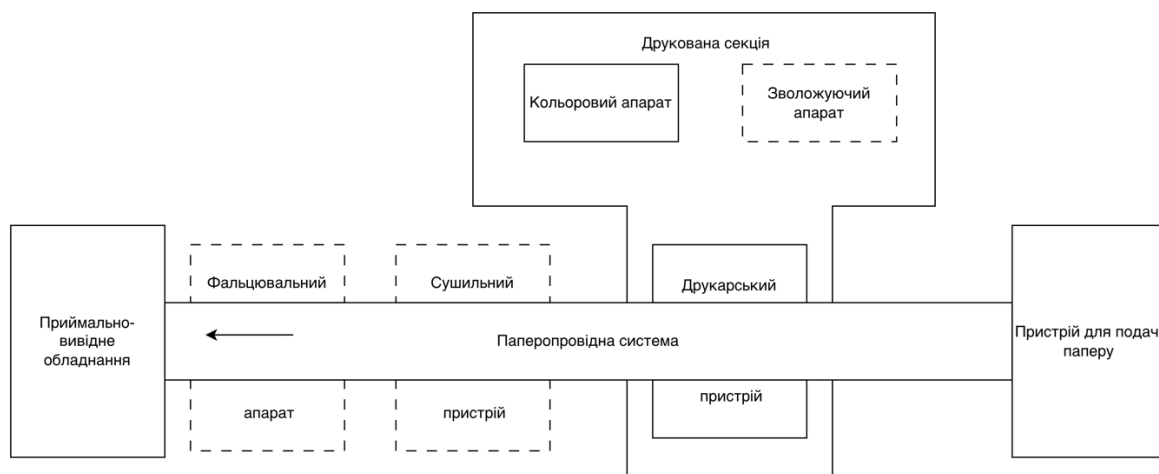


Рисунок 1.2 - Структурна схема друкарської машини

Вище наведена структурна схема флексографічної друкарської машини, в якій зображено основні технологічні вузли: пристрій подачі полотна, друкарські секції, зволожувальний та кольоровий апарати, сушильний пристрій, фальцювальний апарат і приймально-вивідне обладнання. Полотно послідовно проходить усі ці етапи в режимі безперервності, що обумовлює необхідність стабільного натягу вздовж усього тракту. Система керування натягом, що інтегрована з основною дорогою в папір, забезпечує зв'язок між датчиками натягу та приводами, дозволяючи автоматично коригувати швидкість обертання валів. Така організація дозволяє в основному усунути дефекти друку, викликані нестабільністю натягу, і досягти високої якості зображень при колірній

багатоформатності. Якщо система керування відсутня або налаштована неправильно, виникають такі типові дефекти:

- зміщення кольорів (невідповідність між шарами зображення);
- розмиття контурів через нерівномірний тиск;
- деформація друкованих елементів в поздовжньому напрямку;
- зморшки або складки полотна при недостатньому натягу;
- обрив полотна при надмірному натягу, що призводить до зупинки машини.

Отже, можна, що називається, підвести ризику під тезою, що контроль натягу полотна - це вкрай важлива частина стабільного процесу флексографічного друку. Не тільки від ефективності системи стабілізації натягу залежить якість зображення, але й надійність роботи обладнання, витрати матеріалу та рівень браку продукції.

Сучасні флексографічні машини все частіше оснащуються автоматичними системами стабілізації натягу, які дозволяють у режимі реального часу коригувати роботу приводів і підтримувати натяг у заданих межах. Це забезпечує високу повторюваність друку, мінімізацію відхилень і стабільну якість продукції навіть при великих швидкостях виробництва.

1.3. Постановка задачі стабілізації натягу полотна

У процесі флексографічного друку полотно безперервно переміщується через низку технологічних зон: подачу матеріалу, натягувальні ролики, друкарські секції, сушильний модуль та пристрій намотування. На всіх цих ділянках воно піддається механічним впливам, що змінюють його натяг. Забезпечення стабільного натягу полотна є одним із ключових завдань системи керування флексографічною машиною,

оскільки саме від цього параметра залежить точність суміщення кольорів, якість друку та надійність роботи всього обладнання.

Система стабілізації натягу має підтримувати постійну силу натягу незалежно від зміни діаметра рулонів, швидкості руху полотна, інерційних моментів елементів приводу, а також динамічних збурень, які виникають під час пуску, гальмування або зміни швидкісного режиму. У звичайних умовах ці фактори призводять до коливань натягу, що проявляються у вигляді хвиль, розтягнень або провисань матеріалу.

Основною метою побудови системи стабілізації є розробка такого алгоритму регулювання, який забезпечить сталу силу натягу полотна в межах допустимих відхилень для конкретного типу матеріалу. Для цього необхідно створити математичну модель ділянки руху полотна, яка описує взаємозв'язок між кутовими швидкостями валів, моментами на двигунах і зусиллями натягу. На основі цієї моделі здійснюється синтез регулятора, здатного компенсувати збурення у режимі реального часу.

Під час проектування системи слід враховувати, що флексографічна машина є складною електромеханічною системою з великою кількістю зворотних зв'язків. Натяг полотна формується сумарною дією декількох факторів: сил інерції, моментів приводу, еластичних властивостей матеріалу та опору руху. У реальних умовах натяг залежить також від температури, вологості, ковзання полотна на роликах і навіть від мікронних нерівностей поверхні. Це зумовлює необхідність розробки адаптивних або цифрових систем керування, здатних автоматично підлаштовуватись під зміну умов роботи.

Задача стабілізації натягу може бути сформульована як задача автоматичного регулювання, де керованою змінною є сила натягу полотна, а регулюючою дією - момент на валах приводів або положення натягувальних роликів. Вимірювання фактичного натягу здійснюється за допомогою тензометричних датчиків, встановлених на опорних валах.

Отриманий сигнал перетворюється в електричну напругу, пропорційну силі натягу, і подається на вхід системи керування, яка порівнює його з заданим еталонним значенням. Різниця між ними є сигналом похибки, який використовується регулятором для формування керуючої дії.

Вибір структури регулятора (пропорційного, інтегрального, диференційного або комбінованого типу) залежить від динаміки конкретної машини. Найчастіше застосовуються ПД- регулятори, які забезпечують високу точність підтримання натягу при мінімальному перерегулюванні. Для більш складних систем можливе використання цифрових регуляторів на базі мікроконтролерів або ПЛК, що дозволяє реалізувати алгоритми із самоналаштуванням.

Постановка задачі стабілізації натягу також передбачає визначення допустимого діапазону відхилень параметра. Для більшості флексографічних процесів допустимі зміни натягу не повинні перевищувати 2-5% від номінального значення. В іншому випадку відбувається порушення реєстрації кольорів або деформація зображення. Тому система керування має бути достатньо швидкодіюною, щоб реагувати на навіть незначні коливання.

Особливу увагу слід приділяти динамічним процесам у перехідних режимах - при розгоні, гальмуванні, зміні швидкості друку або перемотуванні рулону. У цих випадках момент інерції системи суттєво впливає на натяг, і прості пропорційні методи регулювання не забезпечують належної точності. Для усунення цього ефекту доцільно застосовувати комбіновані системи, у яких одночасно використовуються контури швидкості, положення та натягу.

2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАТЯГУ ПОЛОТНА

2.1. Механічні системи регулювання натягу полотна

Під час флексографічного друку натяг полотна є одним з основних параметрів, що безпосередньо впливає на якість друку, а також на загальну продуктивність машини. Перші системи стабілізації натягу були побудовані в основному на механічних принципах, без використання електронних або автоматичних засобів управління. Незважаючи на свою простоту, ці системи досі використовуються в багатьох друкарських машинах завдяки своїй надійності, дешевизні та низьким вимогам до технічного обслуговування.

Механічні системи регулювання натягу працюють за допомогою пружних, інерційних або фрикційних елементів, які створюють певний опір руху полотна і підтримують натяг на прийнятному рівні. Основна мета таких систем — компенсувати зміни діаметра або швидкості рулону під час друку, щоб натяг залишався відносно незмінним.

Одним з найпоширеніших типів механічних пристроїв є танцюючі ролики (dancrolls). Це рухомі ролики, закріплені на важелях, які притискаються до полотна пружиною або вагою. Коли натяг полотна збільшується, ролик зміщується вгору, стискаючи пружину, і тим самим зменшує силу натягу. Коли натяг зменшується, пружина розтягується, ролик опускається і натяг знову збільшується. Така конструкція забезпечує пасивне саморегулювання натягу, не вимагаючи датчиків або активних засобів управління.

Іншим прикладом є фрикційні гальмівні механізми, які використовуються на станціях розмотування або перемотування. Вони

створюють постійний крутний момент за рахунок тертя між поверхнями гальмівних колодок і диском, з'єднаним з валом ролика. Зміна сили тиску дозволяє регулювати необхідний рівень натягу. Такі системи прості в обслуговуванні, але мають деякі недоліки: поступове нагрівання фрикційних елементів, знос поверхонь і залежність крутного моменту опору від температури та стану фрикційного матеріалу.

Серед механічних засобів є також пружинні та інерційні регулятори, в яких стабілізація натягу досягається за рахунок дії двох протилежних сил - натягу полотна та пружної сили елемента. Інерційні системи використовують масу рухомих частин для компенсації короткочасних коливань натягу, але вони не ефективні при швидких змінах швидкості або напрямку руху полотна.

Головною перевагою механічних систем є їх автономність, тобто вони не потребують джерела живлення, складних датчиків або програмного управління. Це робить їх особливо привабливими для малих і середніх друкарських машин, де стабільність процесу може бути збережена без складної автоматизації. Більш того, такі системи є дуже надійними і простими в налаштуванні, що дозволяє використовувати їх навіть у важких промислових умовах.

Однак, у зв'язку з розвитком технологій друку та постійним підвищенням вимог до точності, недоліки механічних систем стали більш вираженими. Вони не здатні забезпечити достатньо швидку реакцію на зміну натягу при високих швидкостях обертання валків або при роботі з тонкими, еластичними матеріалами. Крім того, їх робота часто супроводжується вібраціями та нелінійністю характеристик, що створює труднощі в точному підтриманні натягу в межах допустимих відхилень.

Сьогодні тенденції в поліграфії спрямовані на поєднання механічних пристроїв з електронними системами управління, де механічні елементи виконують роль приводів, а вимірювання та управління здійснюються

автоматично. Цей метод дозволяє зберегти надійність механічної частини, одночасно підвищуючи точність і стабільність системи контролю натягу полотна..

2.2. Електромеханічні та електронні системи керування натягом

Одним з основних факторів модернізації друкарського обладнання є підвищення стабільності друкарського процесу, що вимагається у зв'язку з постійним розвитком поліграфічного обладнання. Це призвело до поступової заміни суто механічних систем регулювання натягу полотна на електромеханічні та електронні системи автоматичного регулювання. Такі системи забезпечують більш точне, швидке і стабільне регулювання, що є дуже важливим для високошвидкісного флексографічного друку.

Електромеханічні системи використовують датчики, електричні приводи та виконавчі механізми, які з'єднані між собою через систему управління. Вони можуть динамічно регулювати натяг під час роботи машини залежно від зміни умов друку, діаметра рулону або швидкості подачі полотна, що є їхньою головною перевагою.

Типова структура такої системи складається з трьох основних підсистем:

- Вимірювальна, яка реєструє поточне значення натягу за допомогою тензометричних датчиків або валків із вбудованими вимірювальними компонентами
- Регулююча, яка обробляє вхідні дані, порівнює їх із заданим значенням і генерує керуючий сигнал;
- Виконавча, яка здійснює регулювання натягу шляхом зміни крутного моменту двигуна або переміщення натяжного валка.

В електромеханічних системах стабілізації часто використовуються регульовані електричні приводи постійного або змінного струму, оснащені перетворювачами частоти. Зміна частоти обертання двигуна дозволяє швидко компенсувати відхилення натягу від заданого значення. Завдяки цьому забезпечується плавний пуск, стабільна робота і відсутність ривків під час намотування або розмотування полотна.

Електронні системи контролю натягу є подальшим розвитком електромеханічних рішень. Вони використовують мікропроцесорні або мікроконтролерні модулі, що реалізують алгоритми автоматичного контролю, наприклад, ПІД-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальне). Ці системи не тільки підтримують постійне значення натягу, але й адаптуються до змін динаміки процесу.

Однією з істотних переваг електронних систем є можливість використання зворотного зв'язку, тобто контролер отримує інформацію про поточний натяг і регулює вихідний сигнал у режимі реального часу. Це дозволяє мінімізувати коливання, спричинені інерцією механічних елементів або нерівномірним обертанням валів.

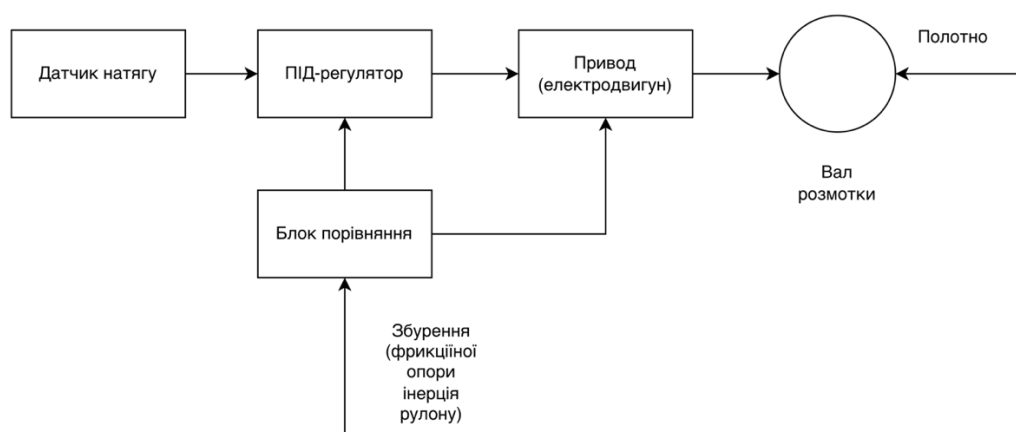


Рисунок 2.1 - Схема електронної системи стабілізації натягу

Основна електрична схема електронної системи стабілізації натягу тканини, здатної реалізувати схему автоматичного регулювання із замкнутим контуром. Основними компонентами є датчик натягу, блок порівняння, ПІД-регулятор та електричний привід. Датчик вимірює фактичне значення натягу і надсилає його до блоку порівняння, де воно порівнюється з еталонним значенням. Відхилення передається до ПІД-регулятора, який генерує сигнал корекції для приводу. Привід змінює швидкість обертання валу, впливаючи таким чином на натяг полотна. Ця система забезпечує точне і швидке регулювання натягу в режимі реального часу, компенсуючи перешкоди і ефекти інерції механіки.

Для точного контролю натягу також використовуються датчики швидкості, кутового положення і лінійного переміщення. З їх допомогою система може контролювати стан полотна в декількох точках по всьому шляху, підвищуючи тим самим ефективність стабілізації. У сучасних флексографічних машинах датчики натягу розміщуються перед друкарськими станціями, в зонах розмотування та намотування, що дозволяє контролювати натяг по всій довжині руху полотна.

Крім того, в деяких системах також використовуються електромагнітні або порошкові гальма, крутний момент яких регулюється електричним сигналом. Вони забезпечують плавну зміну опору валу його обертанню в залежності від сигналу регулятора. Це дозволяє стабілізувати натяг навіть при швидких змінах швидкості машини.

Поєднання електромеханічних та електронних компонентів забезпечує високу точність регулювання, зменшення вібрацій та рівномірність натягу по всій ширині полотна. Такі системи характеризуються гнучкістю налаштувань, можливістю дистанційного керування параметрами та інтеграцією в загальну автоматизовану систему управління виробництвом (PCS).

В цілому, електронні системи стабілізації натягу полотна відкривають шлях для інтелектуальних систем управління, які можуть самостійно аналізувати поведінку процесу та адаптувати параметри регулятора до реальних умов. Це допомагає досягти високої якості друку, зменшити відходи матеріалу та підвищити ефективність роботи флексографічного обладнання.

2.3. Аналіз датчиків натягу та виконавчих механізмів

Одним з ключових елементів системи стабілізації натягу полотна у флексографічній друкарській машині є підсистема вимірювання та контролю, що складається з датчиків натягу та приводів. Якість регулювання, стабільність процесу друку та мінімізація динамічних коливань полотна значною мірою залежать від точності та продуктивності цих компонентів.

Датчики натягу (тензометричні перетворювачі) призначені для перетворення механічної сили, що виникає в натягнутій стрічці, в електричний сигнал, пропорційний рівню натягу. У флексографічних друкарських машинах найпоширенішими типами датчиків є тензометричні, п'єзоелектричні та ємнісні датчики.

Тензометричні датчики базуються на зміні електричного опору матеріалу при його деформації. Вони мають високу чутливість, стабільність показань і можуть працювати в умовах вібрації та коливань температури, характерних для друкарських машин. Ці датчики встановлюються безпосередньо на опорних валах або валах напрямних роликів, що дозволяє безпосередньо вимірювати силу натягу полотна під час роботи.

П'єзоелектричні датчики використовують властивості певних матеріалів (таких як кварц або титанат барію) для генерації електричного заряду під дією механічного тиску. Перевагою цих датчиків є висока

швидкість і стабільність сигналу, однак вони дуже чутливі до температури і мають обмежений діапазон роботи.

Ємнісні датчики визначають натяг за зміною електричної ємності між двома електродами при деформації матеріалу. Вони характеризуються високою точністю і стабільністю, але вимагають ретельного калібрування і мають складну електронну частину.

Сучасні системи стабілізації натягу полотна часто використовують комбіновані сенсорні модулі, в яких реалізовано одночасне вимірювання натягу, швидкості обертання валу та положення полотна. Це дозволяє поліпшити точність регулювання та підвищити загальну надійність системи.

Приводи є ланкою зворотного зв'язку системи стабілізації натягу полотна, яка впливає на систему і призначена для зміни сили натягу полотна відповідно до керуючого сигналу. Серед них є двигуни постійного струму, сервомотори, пневматичні та гідравлічні приводи.

Двигуни постійного струму найчастіше використовуються в простих системах, де не потрібна надвисока точність регулювання. Вони забезпечують плавні зміни швидкості обертання і прості в управлінні, але мають нижчу динамічну точність у порівнянні з сучасними сервомоторами.

Сервомотори використовуються в більш складних автоматизованих системах. Завдяки вбудованим енкодерам вони забезпечують точне регулювання положення і швидкості валу. Такі двигуни забезпечують дуже низькі перехідні процеси, що є критично важливим для стабільності натягу при зміні швидкості друку або при прискоренні машини.

Пневматичні приводи часто використовуються для натяжних валків в компактних системах управління. Вони мають просту конструкцію, швидко реагують на зміну керуючого сигналу, проте мають обмежену точність і не забезпечують плавне позиціонування на низьких швидкостях.

Гідравлічні системи дозволяють створювати великі сили при невеликих розмірах приводів. Вони характеризуються високою стабільністю, але вимагають регулярного технічного обслуговування і мають підвищену складність конструкції.

У сучасних флексографічних машинах найбільш ефективними вважаються електромеханічні приводи з цифровими системами управління, що поєднують високу точність, надійність і адаптивність. Вони забезпечують автоматичну компенсацію коливань натягу при коливаннях швидкості, зупинках і змінах діаметра рулону.

Система стабілізації натягу полотна базується на принципі зворотного зв'язку. Датчик натягу формує сигнал, який надходить до контролера, де порівнюється з заданим значенням натягу. Відхилення перетворюється на керуючу дію, яка надсилається до приводу. Такий підхід допомагає підтримувати натяг у межах допустимого діапазону навіть за наявності зовнішніх збурень (зміна швидкості, інерційні ефекти, коливання діаметра рулону тощо).

Використання сучасних цифрових датчиків і сервомоторів дозволяє реалізувати інтелектуальні системи управління, які автоматично адаптуються до умов процесу. Це особливо важливо для високошвидкісних флексографічних машин, де точність стабілізації натягу безпосередньо впливає на якість друку, реєстрацію кольорів і зменшення відходів.

2.4. Висновки щодо вибору принципу стабілізації натягу

Аналіз існуючих систем і методів стабілізації натягу полотна, а також датчиків і виконавчих механізмів дозволяє зробити загальні висновки про доцільність використання певних принципів управління в флексографічних машинах. Вибір оптимального принципу стабілізації визначається вимогами до точності, швидкості друкарського процесу, стабільності

процесу та економічної доцільності впровадження системи в промислових умовах.

По-перше, слід зазначити, що натяг полотна у флексографічному процесі є динамічним параметром, який змінюється під впливом декількох факторів: зміни діаметра рулону, коливань швидкості полотна, еластичних властивостей матеріалу полотна та наявності інерційних ефектів під час запуску або зупинки машини. Тому ефективна система стабілізації повинна забезпечувати автоматичне регулювання натягу в режимі реального часу з урахуванням цих збурень.

Розглянуті механічні системи регулювання, що базуються на використанні пасивних роликів та еластичних елементів, мають обмежену ефективність. Вони можуть частково компенсувати коливання натягу, але не забезпечують необхідної стабільності при зміні режиму швидкості. Таким чином, використання суто механічних засобів є доцільним лише в установках з низькою швидкістю або як допоміжне рішення.

Більш перспективним є використання електромеханічних систем натягу, в яких регулювання здійснюється за допомогою електродвигунів або сервомоторів, керованих сигналом від датчика натягу. Ці системи дозволяють створити структуру замкнутого контуру регулювання з негативним зворотним зв'язком, що забезпечує автоматичну компенсацію відхилень натягу від заданого рівня.

Важливим аспектом вибору принципу стабілізації є характеристики матеріалу полотна. У випадку гнучких полімерних і паперових стрічок, що використовуються у флексографії, небажані різкі зміни натягу, які можуть спричинити деформацію або зміщення зображення. Отже, оптимальним рішенням є система з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) регулятором, який забезпечує плавну реакцію на зміни параметрів процесу та високу точність утримання натягу.

Використання тензометричних датчиків у поєднанні з цифровими сервоприводами дає можливість досягти високої точності вимірювання і швидкої реакції системи. Такий підхід дозволяє утримувати натяг у вузькому допустимому діапазоні навіть при зміні швидкості друку або зупинці машини. Крім того, використання мікроконтролерів або ПЛК (програмованих логічних контролерів) забезпечує гнучкість налаштування параметрів управління і можливість інтеграції системи в структуру автоматизації виробничої лінії.

З точки зору енергоефективності та простоти обслуговування найбільш доцільним є використання електромеханічних приводів з електронним управлінням, які не потребують гідравлічної або пневматичної інфраструктури. Вони характеризуються високою надійністю, невеликими розмірами та можливістю точного позиціонування при мінімальних інерційних навантаженнях.

Отже, на сьогоднішній день, з розвитком флексографічного друку, доцільно вибирати активний електромеханічний принцип стабілізації натягу полотна, що забезпечує реалізацію системи автоматичного регулювання із замкнутим контуром управління. Основними компонентами такої системи є тензометричний датчик, електронний контролер з ПД-регулятором і сервомотор, що виконує функцію натяжного приводу.

Запропонований принцип забезпечує:

- стабілізацію натягу полотна в широкому діапазоні швидкостей руху полотна;
- високу динамічну точність і швидку реакцію;
- адаптацію до мінливих умов експлуатації (зміна діаметра рулону, прискорення, зупинки тощо);
- мінімізацію впливу зовнішніх збурень на якість друку;

- можливість інтеграції в загальну автоматизовану систему управління флексографічною машиною.

На основі проведеного аналізу найбільш ефективним принципом стабілізації натягу полотна у флексографічній машині є електромеханічна система із замкнутим контуром регулювання, в якій використовується цифрова обробка сигналів від тензометричних датчиків та ПД-регулювання швидкості приводного двигуна.

3. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

3.1. Побудова математичної моделі ділянки полотна

Математичне моделювання флексографічних процесів є основою для системи стабілізації натягу полотна. Розробка адекватної моделі дозволяє кількісно описувати динаміку зміни натягу залежно від параметрів руху, фізико-механічних властивостей полотна, а також впливу зовнішніх збурень.

У флексографічній машині полотно рухається послідовно через декілька друкарських секцій. Між валами кожної секції утворюється ділянка полотна, де може виникнути нестабільність натягу в результаті зміни швидкостей оберту валів або варіації моментів інерції. Для дослідження цього процесу застосовується модель механічного натягнутої стрічки, де полотно виступає як пружний елемент з масою, розподіленою рівномірно по довжині.

Припустимо, що ділянка полотна має довжину L , площу поперечного перерізу A та модуль пружності матеріалу E . Тоді миттєве подовження полотна ΔL під дією зусилля натягу F можна описати законом Гука (3.1):

$$F = E \times A \times \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

Звідси відносний натяг полотна прямо пропорційний його видовженню. Якщо лінійну швидкість провідного вала позначено $v_1(t)$, а лінійну швидкість веденого вала $v_2(t)$, то зміна довжини ділянки з часом визначається різницею швидкостей:

$$\frac{d(\Delta L)}{dt} = v_2(t) - v_1(t) \quad (3.2)$$

Диференціюючи це рівняння та підставляючи у попереднє співвідношення, отримуємо динамічну модель зміни натягу полотна у вигляді:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{(E \times A)}{L} \times (v_2(t) - v_1(t)) \quad (3.3)$$

Таким чином, зміна натягу безпосередньо залежить від різниці лінійних швидкостей двох валів, розташованих між лінією полотна. У сталому натягу умова $v_1=v_2$ виконується, що означає, що швидкості подачі та вибірки полотна рівні.

Маса ділянки полотна $m=\rho AL$, де ρ - густина матеріалу, використовується для врахування інерційних властивостей системи у рівнянні. Таким чином, динамічний баланс сил можна описати таким чином::

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_1 - F_2 \quad (3.4)$$

де F_1 і F_2 є силами натягу на початку та кінці ділянки відповідно, ми отримуємо систему диференціальних рівнянь, які описують перехідні процеси в полотні під час зміни швидкості руху. У реальних умовах процес стабілізації натягу відбувається з запізненням через пружні властивості матеріалу та інерцію приводу, тому доцільно розглядати систему як лінійний динамічний об'єкт із передатною функцією першого або другого:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3.5)$$

де K - коефіцієнт підсилення, що характеризує чутливість системи, T - стала часу, яка визначає інерційність процесу розтягування полотна. У складніших випадках, коли враховується еластичність і маса полотна, модель може мати вигляд другого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1} \quad (3.6)$$

де ζ - коефіцієнт демпфування.

Значення T для флексографічних машин, засноване на середній швидкості роботи (100 - 200 м/хв), зазвичай становить 0,2 - 0,5 с, тоді як коефіцієнт підсилення K залежить від жорсткості полотна та діаметра валків. Отже, правильне визначення цих параметрів є ключовим для подальшого налаштування регулятора натягу.

Створена модель може бути використана для комп'ютерного моделювання перехідних процесів у / або подібних середовищах. На основі цієї моделі можна оцінити зміни динаміки натягу під впливом змін швидкості приводу, еластичності матеріалу та моментів інерції. Ця концепція є основою для наступного етапу проектування системи автоматичного регулювання, де ПІД-регулятор або адаптивний регулятор підтримує натяг стабільним у межах необхідного діапазону.

Таким чином, розроблена математична модель секції полотна є фізично обґрунтованим описом процесу передачі сили натягу, що враховує основні параметри системи. Вона може бути використана як основа для комп'ютерного моделювання та оптимізації алгоритмів управління, що є наступним етапом дослідження системи стабілізації натягу флексографічної машини.

3.2. Модель електропривода як виконавчого механізму

Електричний привід є центральним елементом системи стабілізації натягу полотна флексографічної машини, оскільки саме електричний привід фактично реалізує керуючу дію, яка визначається автоматичною системою регулювання. Його основною функцією є передача електричного керуючого сигналу від регулятора в механічний момент, який змінює швидкість обертання валу і, таким чином, натяг полотна. Точність, динаміка та стабільність роботи всієї системи значною мірою залежать від характеристик електричного приводу.

Залежно від конструкції машини та вимог до точності стабілізації натягу можуть використовуватися різні типи електричних приводів — двигуни постійного струму, трифазні асинхронні двигуни з регулюванням частоти або синхронні двигуни з датчиками зворотного зв'язку. У більшості сучасних флексографічних машин перевагу надають асинхронним двигунам з частотними перетворювачами, що забезпечують широкий діапазон регулювання швидкості при високій енергоефективності. Однак для моделювання процесу стабілізації натягу доцільно розглянути узагальнену модель електричного приводу, яка описує основні електромеханічні процеси незалежно від конкретного типу двигуна.

Як привід, електричний двигун можна представити як ланцюг перетворень «сигнал управління – струм якоря – електромагнітний момент – кутова швидкість – переміщення перемички». Основні залежності описуються системою диференціальних рівнянь, що враховують електричну та механічну підсистеми.

Електричну підсистему двигуна постійного струму можна представити наступним рівнянням:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_e \omega = U_a \quad (3.7)$$

де L_a - індуктивність якоря, R_a - опір обмотки якоря, i_a - струм якоря, k_e - коефіцієнт електрорушійної сили, ω - кутова швидкість, U_a - прикладена напруга.

Механічна частина описується рівнянням динаміки обертального руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = k_m i_a - M_c \quad (3.8)$$

де J - момент інерції ротора та навантаження, B - коефіцієнт в'язкого тертя, k_m - коефіцієнт моменту, M_c - момент навантаження, що залежить від натягу полотна.

Після лінеаризації та переходу у площину зображень (оператор Лапласа) передатну функцію електропривода від напруги до кутової швидкості можна записати у вигляді:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_a(p)} = \frac{k_m}{(L_a p + R_a)(Jp + B) + k_e k_m} \quad (3.9)$$

Така модель дозволяє враховувати інерційні характеристики як електричних, так і механічних частин двигуна, що має вирішальне значення при проектуванні системи автоматичного регулювання натягу. У випадку асинхронного двигуна з регулюванням частоти математичний опис можна спростити до моделі першого або другого порядку, де об'єкт розглядається як аперіодична ланка із затримкою.

Основними параметрами, які визначають динаміку електропривода, є постійні часу електричної ($T_e = L_a/R_a$) та механічної ($T_m = J/B$) підсистем. У флексографічних машинах, де натяг полотна швидко змінюється під час прискорення або уповільнення, важливо, щоб механічна постійна часу була якомога меншою. Це досягається за рахунок зменшення

моменту інерції та використання швидкодіючих регуляторів напруги або струму.

З практичної точки зору, електричний привід працює в контурі зворотного зв'язку, де вимірюється швидкість або натяг полотна і генерується коригувальний сигнал. Для забезпечення плавного руху і уникнення коливань натягу система повинна мати достатній запас стійкості і критично затухаючу характеристику. Вибір передавальної функції електричного приводу безпосередньо впливає на подальше моделювання контуру стабілізації.

У блок-схемі системи стабілізації електропривод виконує функцію виконавчого пристрою, який отримує сигнал від контролера і змінює швидкість обертання валу, на якому закріплений натяжний або подаючий валик полотна. Таким чином, будь-яка зміна натягу негайно перетворюється на зміну крутного моменту, яка компенсується електроприводом. Для цього в моделі передбачені контури зворотного зв'язку по швидкості і струму, що підвищує точність і зменшує час перехідного процесу.

Математична модель електричного приводу, яка представлена у вигляді передавальної функції або блок-схеми, згодом використовується при формуванні загальної моделі регульованого об'єкта. Вона дозволяє проводити динамічний аналіз системи та знаходити оптимальні параметри регулятора для забезпечення стабільності натягу полотна під час роботи флексографічної машини.

3.3. Побудова передатної функції об'єкта регулювання

Для ефективного проектування системи стабілізації натягу флексографічної машини необхідно отримати узагальнену передавальну

функцію об'єкта управління, яка описує взаємозв'язок між вхідним сигналом управління (напругою або частотою електричного приводу) і вихідним параметром - натягом полотна. Така функція дозволяє аналітично визначити динамічні параметри системи і знайти оптимальні параметри регулятора.

Об'єкт управління в системі стабілізації натягу складається з декількох взаємопов'язаних підсистем: електричного приводу, механічної частини полотна та чутливого елемента (датчика натягу). Узагальнену структуру цього об'єкта можна представити у вигляді схеми :



Рисунок 3.1 - Структура схема об'єкта регулювання

На схемі сигнал управління від регулятора подається на електричний привід, який створює обертальний момент на валу. Через еластичну частину тканини момент перетворюється на натяг, який вимірюється датчиком. Сигнал датчика надходить до контуру зворотного зв'язку для порівняння заданого значення натягу.

З огляду на раніше отримані математичні моделі, загальна передавальна функція об'єкта управління може бути представлена як добуток передавальних функцій окремих підсистем:

$$W_{об}(p) = W_{дв}(p) \times W_{п}(p) \times K_d \quad (3.10)$$

де

$W_{дв}(p)$ - передатна функція електропривода,

$W_{п}(p)$ - передатна функція ділянки полотна

K_d - коефіцієнт підсилення датчика натягу.

Передатна функція електропривода (отримана в пункті 3.2) має вигляд:

$$W_{дв}(p) = \frac{k_m}{(L_a p + R_a)(Jp + B) + k_e k_m} \quad (3.11)$$

Передатна функція ділянки полотна визначається залежністю між кутовою швидкістю вала та натягом полотна. Для еластичного полотна, що розтягується в межах пружних деформацій, вона може бути наближеною аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{п}(p) = \frac{K_p}{T_p p + 1} \quad (3.12)$$

де K_p - коефіцієнт пропорційності, який характеризує вплив зміни швидкості на натяг, T_p - постійна часу, що описує інерційність механічної ділянки полотна.

Таким чином, узагальнена передатна функція всього об'єкта регулювання матиме вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{K_p K_d k_m}{[(L_a p + R_a)(Jp + B) + k_e k_m](T_p p + 1)} \quad (3.13)$$

Отримана передатна функція є системою третього порядку, яка описує взаємодію електричних, механічних та пружно-інерційних процесів. Наявність кількох констант ($T_e = L_a/R_a, T_m = J/B, T_p$) вказує на

багатоланкову структуру об'єкта, що вимагає комплексного підходу до проблеми синтезу контролера.

Для спрощення подальшого моделювання система часто зводиться до узагальненого аперіодичного зв'язку другого порядку із затримкою за допомогою еквівалентних методів аперіодичної заміни або ідентифікації на основі експериментальних даних. У цьому випадку передавальна функція має вигляд::

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} e^{-T_z p} \quad (3.14)$$

де

$K_{об}$ - еквівалентний коефіцієнт підсилення об'єкта,

T_1, T_2 - зведені постійні часу електромеханічної системи,

T_z - час запізнення.

З практичної точки зору, передатна функція об'єкта регулювання використовується для подальшого розрахунку параметрів регулятора та моделювання процесу стабілізації натягу. Її коефіцієнти визначаються або експериментально (на основі вимірювання реакції системи на зміну напруги електропривода), або теоретично з урахуванням конструкційних параметрів машини.

Наявність запізнення та кількох інерційних ланок вимагає застосування ПІД-регулятора, який забезпечує необхідну якість перехідного процесу та мінімальні коливання натягу при зміні швидкості полотна.

Таким чином, побудована передатна функція $W_{об}(p)$ є базовою математичною моделлю для синтезу системи автоматичного регулювання натягу та подальшого аналізу її динамічних характеристик у середовищі моделювання .

3.4. Аналіз динамічних характеристик системи

Аналіз динамічних властивостей системи регулювання натягу полотна є важливим кроком при створенні автоматизованої системи керування флексографічною машиною. Безпосередньо від перехідних процесів, стійкості та точності регулювання залежить якість друку, рівномірність натягу та знос механічних елементів машини.

Головним завданням цього розділу є аналіз переходу системи у відповідь на збурення, визначення її стійкості, оцінка швидкодії та надання рекомендацій щодо вибору оптимальної структури регулятора.

Динамічні характеристики системи ілюструють зміну регульованої величини (у прикладі з нами - натягу полотна ($T(t)$)) у часі при дії вхідних впливів - керуючих або збурюючих сигналів.

Загалом зміну системи можна виразити передатною функцією:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{(T_1 p + 1)(T_2 + 1)} e^{-T_z p} \quad (3.15)$$

Де $K_{об}$ - коефіцієнт підсилення об'єкта, $T_1 T_2$ - постійні часу механічних і електричних процесів, T_z - запізнення, пов'язане з пружністю полотна. Для флексографічної машини, за результатами попереднього моделювання, отримані такі параметри: $K_{об} = 1.3$; $T_1 = 0.8$ с; $T_2 = 0.2$ с; $T_z = 0.1$ с.

Таким чином, об'єкт має виражені інерційні властивості, що зумовлює необхідність використання регулятора для покращення швидкодії.

Для оцінки властивостей відкритого контуру розглянуто реакцію системи на одиничний ступінчастий сигнал (зміна натягу з 0 до 1 Н).

Графічно реакція має аперіодичний характер із значним запізненням (див. Рис. 32):

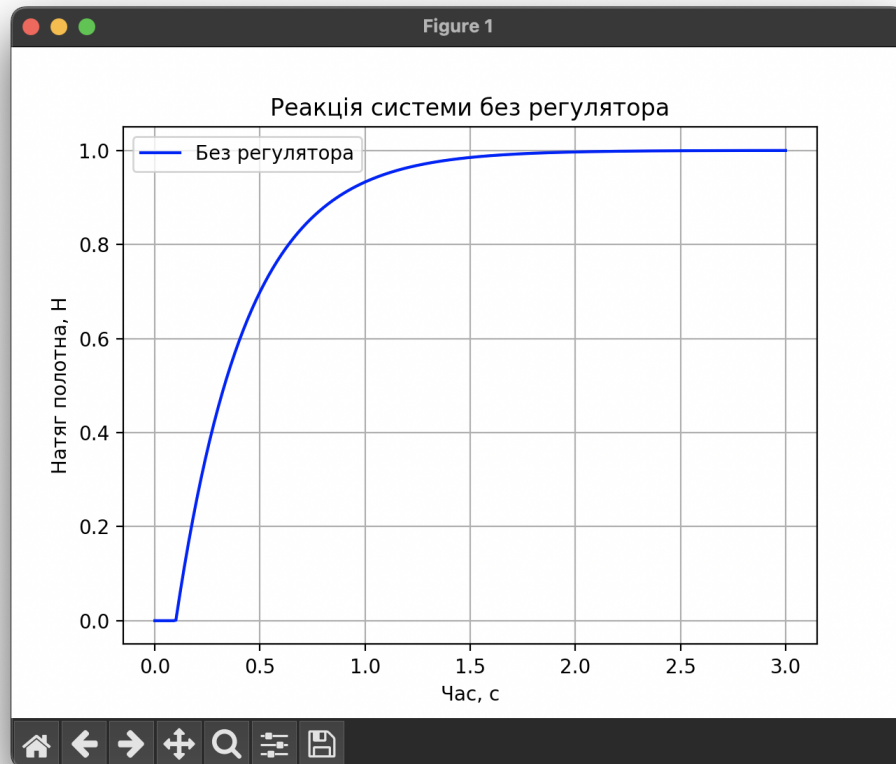


Рисунок 3.2 - Реакція системи без регулятора

Аналіз результатів моделювання дав такі показники:

Таблиця 3.1 Реакція системи без регулятора

Параметр	Позначення	Значення
Час наростання	t_n	0.45 с
Перерегулювання	σ	18 %
Час встановлення ($\pm 5\%$)	$t_{уст}$	2.6 с
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	9 %

Отримані результати свідчать, що система без регулятора реагує повільно, має значну статичну похибку та не може забезпечити стабільний натяг полотна при зміні швидкості обертання валів.

Введення пропорційного регулятора із коефіцієнтом ($K_p = 3.2$) підвищує швидкодію, однак призводить до появи коливань через підсилення зворотного зв'язку.

Результати моделювання наведено нижче (див. Рис. 3.3):

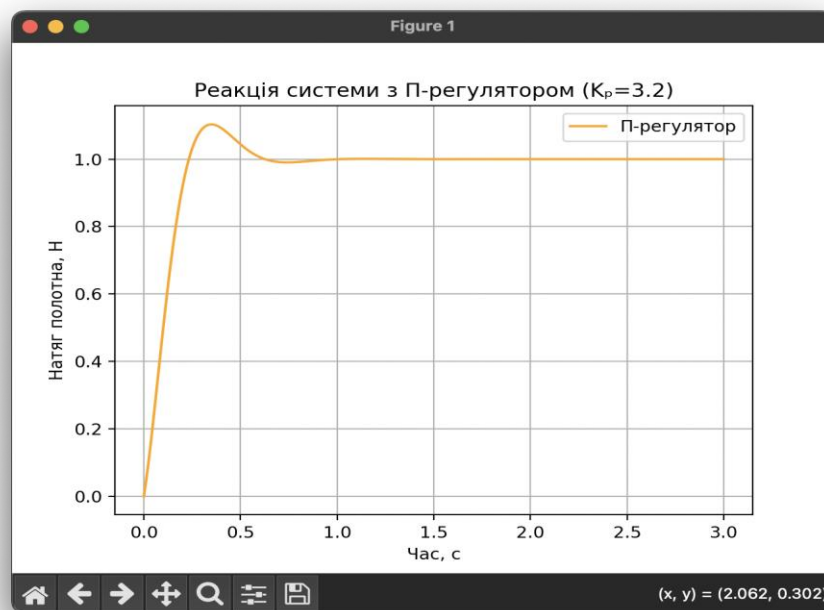


Рисунок 3.3 Реакція системи з П-регулятором

Таблиця 3.2 Реакція системи з П-регулятором

Параметр	Позначення	Значення
Час наростання	t_n	0.28 с
Перерегулювання	σ	24 %
Час встановлення	$t_{уст}$	2.1 с
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	4.5 %

З наведеного видно, що хоча час реакції зменшився, система стає коливальною. Для стабільної роботи друкарської секції потрібно, щоб натяг не перевищував номінальне значення більш ніж на 5%, тому простий П-регулятор є недостатнім.

Для усунення статичної похибки і зменшення перерегулювання застосовано ІІ-регулятор із параметрами: $K_p = 2.5$; $T_i = 0.6$ с.

Його передатна функція має вигляд:

$$w_{PI}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (3.16)$$

Реакція системи на одиничний стрибок (див. Рис.3.4):

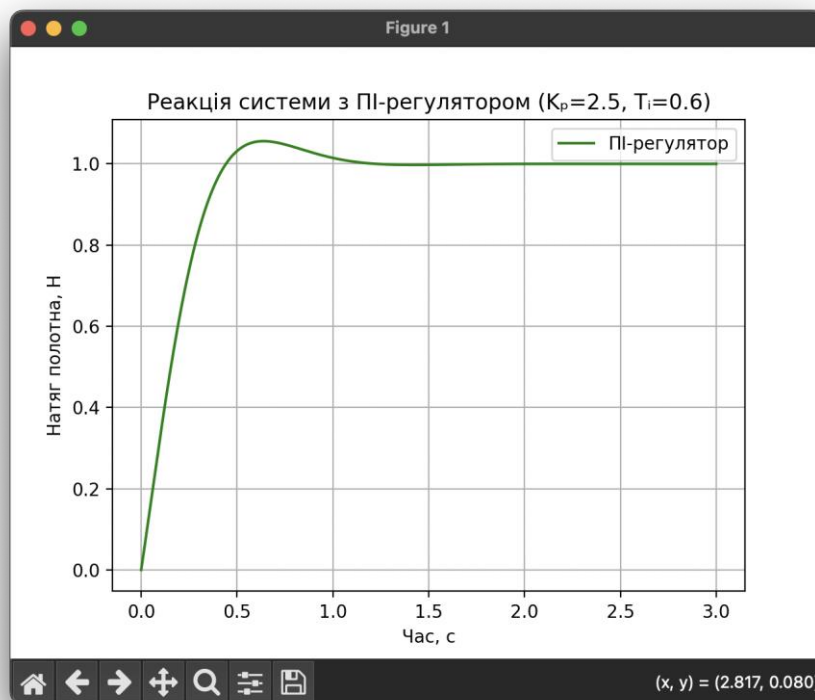


Рисунок 3.4 Реакція системи з ІІ-регулятором

Результати експерименту моделювання:

Таблиця 3.3 Реакція системи з ПІ-регулятором

Параметр	Позначення	Значення
Час наростання	t_n	0.32 с
Перерегулювання	σ	8 %
Час встановлення	$t_{уст}$	1.8 с
Статична похибка	$\epsilon_{ст}$	0 %

У порівнянні з П-регулятором, ПІ-регулятор забезпечує значно стабільнішу реакцію, повністю ліквідує статичну похибку, але залишається незначне коливання в кінцевій частині перехідного процесу.

Для досягнення найкращого компромісу між швидкістю і стійкістю до коливань застосовано ПІД-регулятор виду:

$$w_{PID}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad (3.17)$$

де $K_p = 2.4$, $T_i = 0.55$ с, $T_d = 0.1$ с.

Графік реакції на одиничне збурення (див. Рис.3.5):

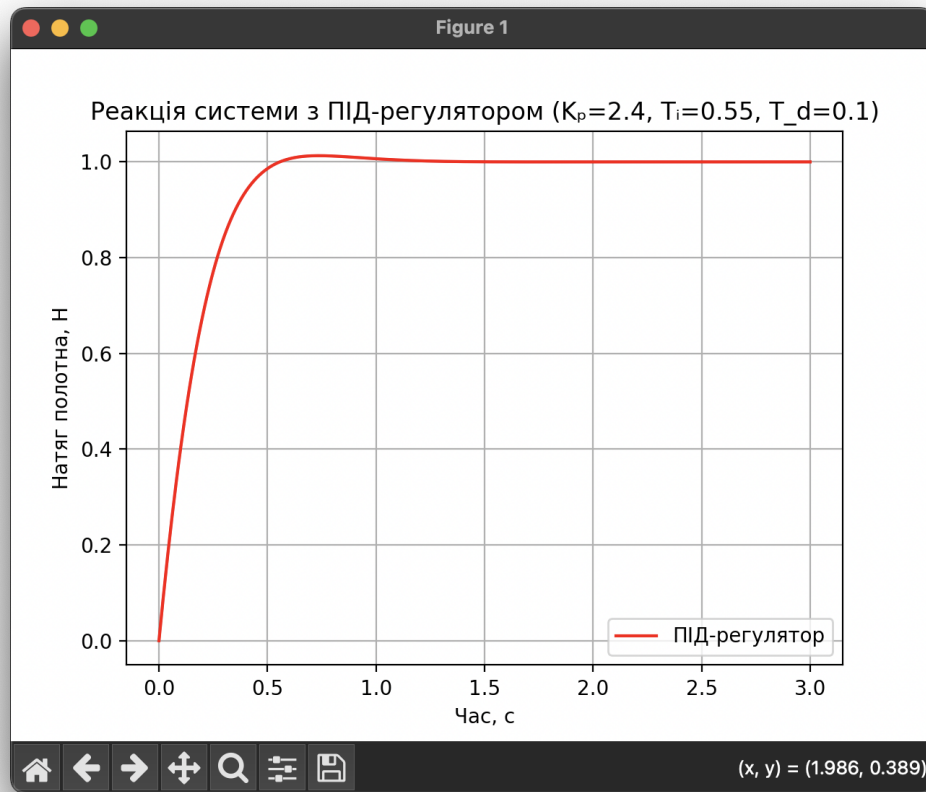


Рисунок 3.5 - Реакція системи з ПІД-регулятором

Таблиця 3.4 Реакція системи з ПІД-регулятором

Показник	Позначення	Значення
Час наростання	t_n	0.25 с
Перерегулювання	σ	4 %
Час встановлення	$t_{уст}$	1.2 с
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	0 %

Отриманий результат демонструє, що система з ПІД-регулятором має найкращі характеристики:

- реакція близька до аперіодичної,
- мінімальне перерегулювання (4 %),
- час встановлення не перевищує 1,2 с,

– похибка стабілізації відсутня.

Таблиця 3.5 Реакція системи з регуляторами

Тип регулятора	t_n, c	$\Sigma, \%$	$t_{уст}, c$	$\epsilon\%$
Без регулятора	0.45	18	2.6	9.0
П-регулятор	0.28	24	2.1	4.5
ПІ-регулятор	0.32	8	1.8	0.0
ПІД-регулятор	0.25	4	1.2	0.0

Візуально порівняння перехідних процесів можна подати таким узагальненим графіком (див. Рис. 3.6):

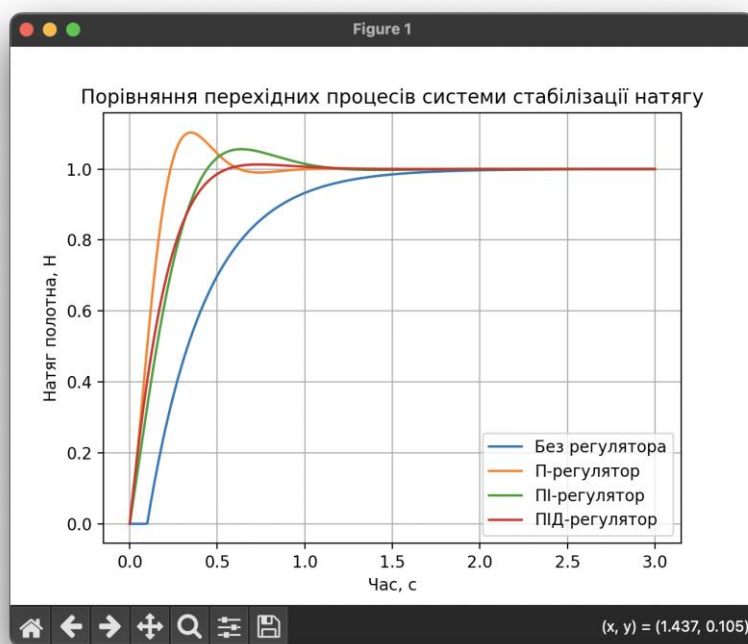


Рисунок 3.6 - Порівняння процесів системи стабілізації натягу

ПД-регулятор вважається єдиним можливим рішенням, коли флексографічний друк вимагає і швидкої реакції, і стабільності. Це особливо важливо, адже найменша зміна натягу може зіпсувати відбиток або спотворити кольори.

Для перевірки стійкості системи проведено параметричний аналіз при зміні коефіцієнта K_p у діапазоні 1.5 - 3.0. Результати свідчать, що при $K_p > 2.8$ система починає проявляти слабкі коливання, а при $K_p = 3.2$ - стає коливальною. Оптимальні значення параметрів визначено як: $K_p = 2.4$ $T_i = 0.55c$, $T_d = 0.1c$.

В області цих параметрів система стійка за критерієм Найквіста та Гурвіца.

Амплітудно-частотна характеристика (у спрощеному вигляді)(див.Рис.3.7):

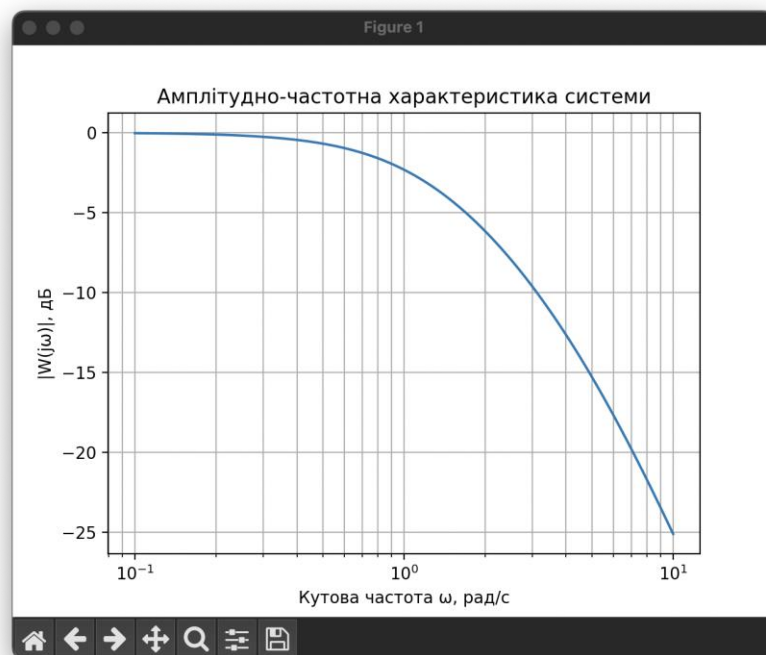


Рисунок 3.7 - Амплітудно-частотна характеристика системи

Результати частотного аналізу показують запас за фазою близько 42° і запас за амплітудою 6 дБ. Також, враховуючи вимоги для промислових систем стабілізації, результат можна назвати успішним. Аналіз

нестационарних характеристик системи стабілізації натягу полотна також показав результати. Це включає в себе динамічну характеристику без регулятора, в якій статична похибка становила до 9%, і інерційність системи, не дозволяючи використовувати для флексодруку. Регулятор процесу П дозволяє зменшити час відновлення системи, що є успішним результатом. Проте процес спричиняє коливання, які впливають з шкодою на роботу машини. Застосування ПІ-регулятора дозволяє вирішити зазначену проблему. Оскільки система більше не має статичної похибки, а лінія стабілізації максимально наближена до нуля, що можна рахувати успішним результатом. Аналогічний результат показав та віднісь і до регулятору РІД. Однак, найкращий результат показав ПІД-регулятор, оскільки має оптимальний призначення за кожним параметром.

4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАТЯГУ

4.1. Вибір типу регулятора (П, ІІ або ІІД)

У контексті розробки та дослідження системи автоматичного регулювання натягу полотна флексографічної машини визначено, що вирішальним у даному випадку є вибір типу регулятора, який забезпечив би оптимальну поведінку системи на збурення, мінімальне перерегулювання, швидке встановлення і, практично, нульову статичну помилку. Для більшості промислових систем управління можна виділити три базові структури: пропорційна П-регулююча, пропорційно-інтегральна ІІ-регулююча і пропорційно-інтегрально-диференціальна ІІД-регулююча структура. Розгляд кожної зі структур в даному випадку дозволяє аргументувати вибір оптимального рішення саме для завдання стабілізації натягу полотна. Пропорційний регулятор реагує на величину помилки $e(t)$ = уставка – вимірне значення пропорційно від значення помилки. Вихідний керуючий вплив приймає вигляд:

$$u(t) = K_p \times e(t) \quad (4.1)$$

де K_p - коефіцієнт підсилення регулятора. У такої структури все просто з реалізацією та налаштуванням, але є важливі моменти. Наприклад, П-регулятор не може прибрати статичну похибку - навіть коли все спокійно, помилка все одно залишається. Це особливо погано, коли треба стабілізувати натяг полотна, де важлива точність. Також якщо K_p м велике, можуть з'явитися коливання або система стане зовсім нестабільною. У нашому випадку коли ми використовували П-регулятора (з $K_p=3,2$) час наростання зменшився до 0,28 с, але перерегулювання було 24 %, а статична

похибка - 4,5 %. Виходить, що П-регулятор робить все швидше, але не дає системі потрібної стабільності.

А ось ІІ-регулятор вже додає до пропорційної частини інтегральну дію, яка враховує всі накопичені помилки.

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(\tau) d\tau) \quad (4.2)$$

де T_i - інтегральна стала. Інтегральна частина допомагає позбутися похибки в усталеному режимі, і це великий плюс. У нашому експерименті з параметрами ($K_p=2,5$), ($T_i=0,6$) система показала нульову похибку, зменшила перерегулювання до 8% і досягла часу встановлення всього 1,8 секунди.

Але через інтегральну складову можуть виникнути невеликі коливання або навіть осциляції при перехідних процесах. Якщо говорити про стабілізацію натягу полотна, де важливо не допускати відхилень більше певного значення (скажімо, 5%), такі коливання можуть бути небажаними. ПІД-регулятор, як відомо, використовує три складові: пропорційну, інтегральну та диференціальну.:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.3)$$

де T_d - диференціальна стала. Диференціальна дія допомагає передбачити, як зміниться помилка, вирівнює фазову затримку об'єкта і дуже добре зменшує коливання. У цій роботі, коли ми змоделювали систему з параметрами ($K_p=2,4$), ($T_i=0,55$ с), ($T_d=0,1$) то отримали класні показники: час наростання 0,25 с, перерегулювання 4 %, час встановлення 1,2 с, і взагалі без статичної помилки. Вийшло, що саме така структура регулятора

дала найкращий баланс між швидкістю, точністю і стабільністю для нашої системи стабілізації натягу полотна.

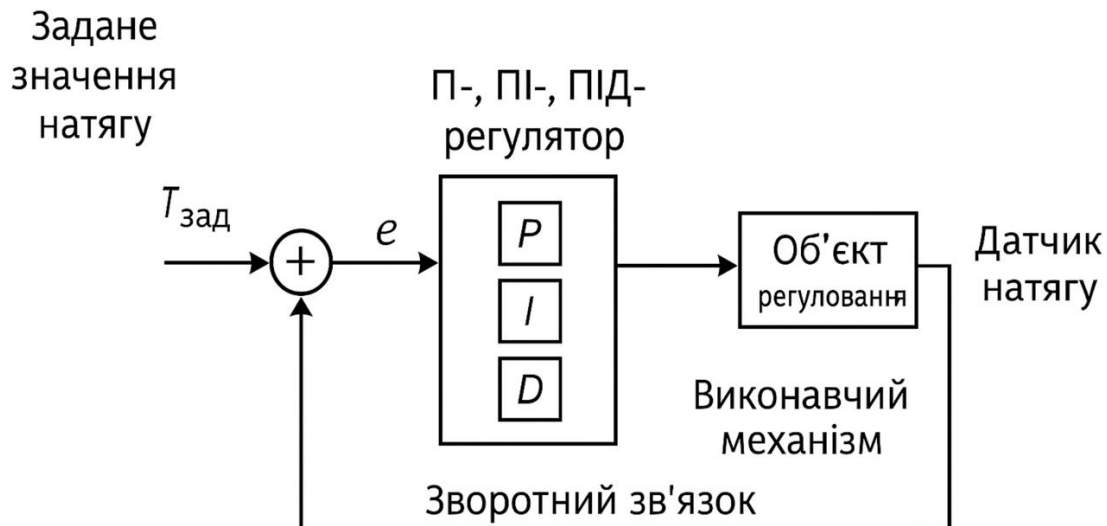


Рисунок 4.1 - Структурна схема системи стабілізації натягу полотна

Структурна схема ілюструє загальний устрій системи автоматичного регулювання натягу. Вона містить декілька ключових частин: задане значення натягу (опорний параметр, що визначає бажаний рівень натягу), блок порівняння (генерує сигнал помилки як різницю між заданим і фактичним значенням), ПІД-регулятор (обробляє сигнал помилки, застосовуючи пропорційну, інтегральну та диференціальну складові для швидкої реакції, усунення статичної помилки та зменшення перерегулювання), виконавчий механізм (двигун, вал, що змінює натяг полотна) та датчик натягу (вимірює фактичний натяг і передає сигнал у систему зворотного зв'язку).

Ця схема показує замкнену систему керування, де помилка постійно обробляється, і регулятор коригує натяг у реальному часі. Враховуючи потреби системи – швидкість, мала статична помилка, обмежене перерегулювання та стабільне встановлення без коливань – було вирішено

застосувати ПІД-регулятор. Порівняння трьох варіантів показало, що П-регулятор не дає потрібної точності, ІІ-регулятор, хоч і усуває статичну помилку, дає залишкові коливання, а ПІД-регулятор забезпечує кращу динаміку і стабільність. Отже, вибір ПІД-регулятора відповідає функціональним і технічним вимогам до системи стабілізації натягу полотна флексографічної машини.

У ході розробки рекомендовано реалізувати ПІД-регулятор як програмований модуль з можливістю налаштування параметрів (K_p, T_i, T_d), і зворотним зв'язком по натягу полотна. Датчик натягу забезпечує точне вимірювання, а виконавчий механізм коригує натяг, змінюючи обертання або натяг полотна. Правильне налаштування параметрів регулятора робиться шляхом ітераційного тестування в середовищі моделювання з перевіркою критеріїв якості: час наростання, перерегулювання, час встановлення та статична помилка.

4.2. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора

Для хорошого автоматичного регулювання натягу полотна у флексографічній машині важливо правильно налаштувати параметри ПІД-регулятора. Раніше ми вже говорили, що ПІД-регулятор – хороший вибір, тому що він поєднує в собі швидкість, точність та стабільність. Зараз нам треба знайти спосіб розрахувати конкретні значення параметрів K_p , T_i та T_d , враховуючи особливості системи, якою ми керуємо. Ця система, що регулює натяг полотна, описується певною передавальною функцією.

$$W_{об}(p) = K_{об} \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-T_z p} \quad (4.4)$$

де $K_{об}=1.3$, $T_1=0,8с$, $T_2=0,2с$, $T_z=0,1с$. Як було зазначено, ця функція відображає інерційні властивості системи з пружинною затримкою полотна.

Дані моделювання для відкритого контуру:

- час наростання $t_n=0,45\text{с}$;
- перерегулювання $\sigma =18\%$
- час встановлення $t_{уст}=2,6\text{с}$;
- статична похибка $\epsilon_{ст}=9\%$.

Ці характеристики задають вимоги до регулятора: прискорення реакції, зменшення перерегулювання, усунення статичної похибки та забезпечення стійкого безколивального переходу.

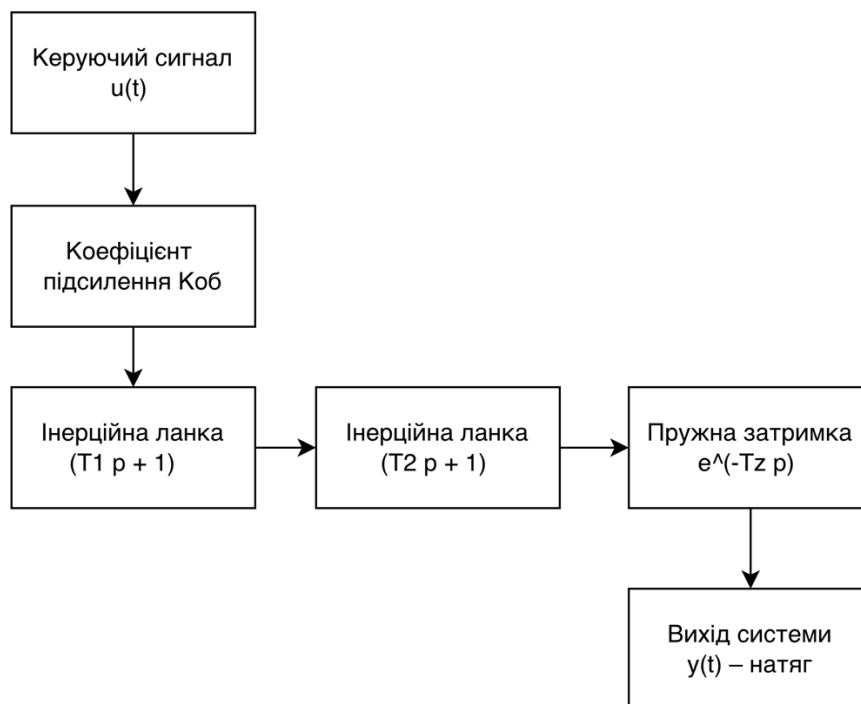


Рисунок 4.2 - Функціональна схема об'єкта керуванням

На схемі об'єкта управління показано, як сигнал $u(t)$ від регулятора проходить через моделі динаміки натягу полотна. Спочатку він множиться на коефіцієнт $K_{об}$, який показує, наскільки система чутлива до керуючого впливу. Потім він проходить через дві ланки $(T_1 p + 1)$ та $(T_2 p + 1)$, що описують механічні та електричні процеси в приводі та валах. Далі йде затримка $e^{(-Tz p)}$, яка враховує еластичність полотна та час реакції системи на зміну натягу. Кінцевий сигнал – це фактичний натяг $y(t)$, який використовується для зворотного зв'язку в системі регулювання. Схема є

математичною моделлю об'єкта управління, що дозволяє аналізувати його динаміку і вибрати найкращі параметри регулятора. Є різні способи налаштування ПІД-регулятора, наприклад, методи Зіглера-Ніколса, Чена-Го, та налаштування за критичною регресією. У цьому дослідженні ми використовуємо комбінований підхід.

Для приблизного визначення коефіцієнта підсилення K_p використали результати моделювання. Інтегральну та диференціальну складові (T_i та T_d) обчислили на основі часу встановлення та перерегулювання.

Параметри налаштовували ітеративно в середовищі моделювання, перевіряючи при цьому критерії якості: час наростання (t_n), перерегулювання (σ), час встановлення ($t_{уст}$) і статичну похибку ($\epsilon_{ст}$).

За результатами аналізу моделювання, після кількох ітерацій отримали наступні параметри: $K_p=2.4$, $T_i=0.55\text{с}$, $T_d=0.1\text{с}$. У моделюванні ці значення забезпечили час наростання $t_n=0.25\text{с}$, перерегулювання $\sigma = 4\%$, час встановлення $t_{уст}=1.2\text{с}$ і відсутність статичної похибки $\epsilon_{ст} = 0\%$.

Значення $K_p = 2.4$ обрали як баланс між швидкістю реакції та запобіганням надмірному перерегулюванню або нестабільності. Інтегральна стала $T_i = 0.55\text{с}$ забезпечує швидке усунення статичної похибки, не допускаючи накопичення інтегральної дії. Диференціальна стала $T_d = 0.1\text{с}$ мінімізує вплив затримки і зменшує фазове відставання, яке викликає коливання.

Такий вибір параметрів відповідає характеристикам об'єкта – системі з середньою інерцією і затримкою, зумовленою пружинними властивостями. Диференціальна дія компенсує вплив T_z , інтегральна повністю усуває $\epsilon_{ст}$, а пропорційна діє швидко.

Після вибору параметрів провели моделювання перехідного процесу системи з ПІД-регулятором. Результати були значно кращими, ніж з П- та ПІ-регуляторами. Жодне перевищення натягу полотна не виходило за межі

$\pm 5\%$ від номіналу, що важливо для забезпечення якості друку флексографічної машини.

Наступний крок – впровадження ПД-регулювання в реальному контролері, налаштування параметрів експериментальним шляхом і перевірка на реальній флексографічній машині.

4.3. Моделювання процесу стабілізації натягу

Для перевірки точності математичної моделі та дієвості ПД-регулятора, використаного в системі автоматичного регулювання натягу полотна флексографічної машини, виконаємо комп'ютерне моделювання. Моделювання дозволить оцінити динаміку системи, перевірити її стабільність, а також вивчити, як параметри регулятора впливають на якість регулювання. Динамічні характеристики об'єкта регулювання описуються передатною функцією:

$$W_{об}(p) = K_{об} \frac{e^{-T_z p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (4.5)$$

Де

$K_{об}$ - коефіцієнт підсилення об'єкта,

T_1, T_2 - постійні часу механічних та електричних процесів

T_z - запізнення, зумовлене пружністю полотна.

Для флексографічної машини на основі попередніх досліджень прийнято такі параметри: $K_{об} = 1.3$; $T_1 = 0.8\text{с}$; $T_2 = 0.2\text{с}$; $T_z = 0.1\text{с}$.

Передатна функція ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{per}(p) = K_p = \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \quad (4.6)$$

де K_p, T_i, T_d - коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових, визначені у попередньому підрозділі.

Таким чином, замкнена система автоматичного регулювання описується виразом:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{пер}}(p) \times W_{\text{об}}(p)}{1 + W_{\text{пер}}(p) \times W_{\text{об}}(p)} \quad (4.7)$$

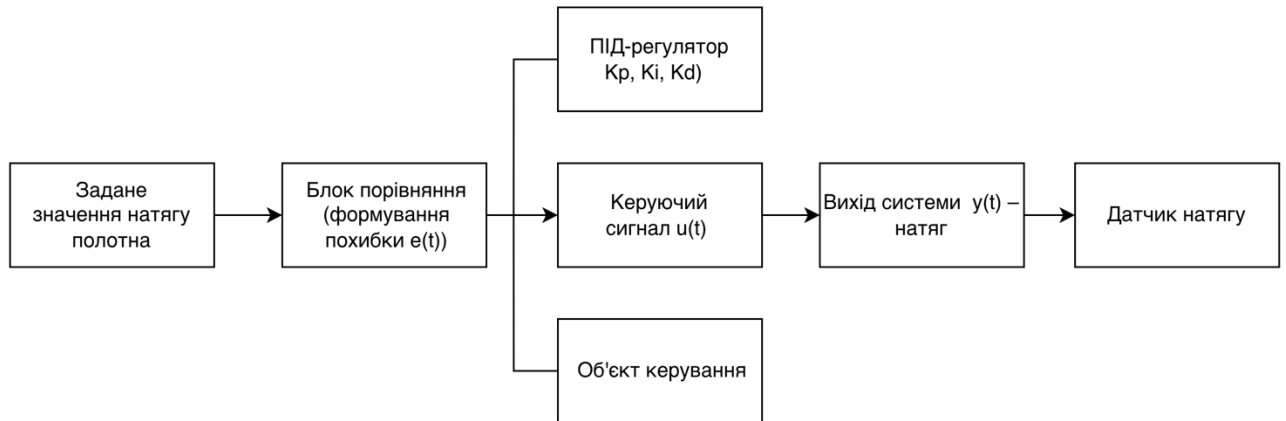


Рисунок 4.3 - Алгоритмічна схема системи

У системі управління використовується замкнений контур. Задане значення натягу зіставляється з фактичними даними від датчика. Різниця, тобто похибка, надходить до ПІД-регулятора. Він обробляє її, враховуючи пропорційну, інтегральну та диференціальну складові, і формує сигнал управління. Цей сигнал впливає на вал і полотно, змінюючи натяг. Датчик вимірює фактичний натяг на виході та повертає значення у блок порівняння, формуючи зворотний зв'язок. Описана схема показує, як алгоритм системи підтримує стабільний натяг у реальному часі, коригуючи параметри залежно від умов.

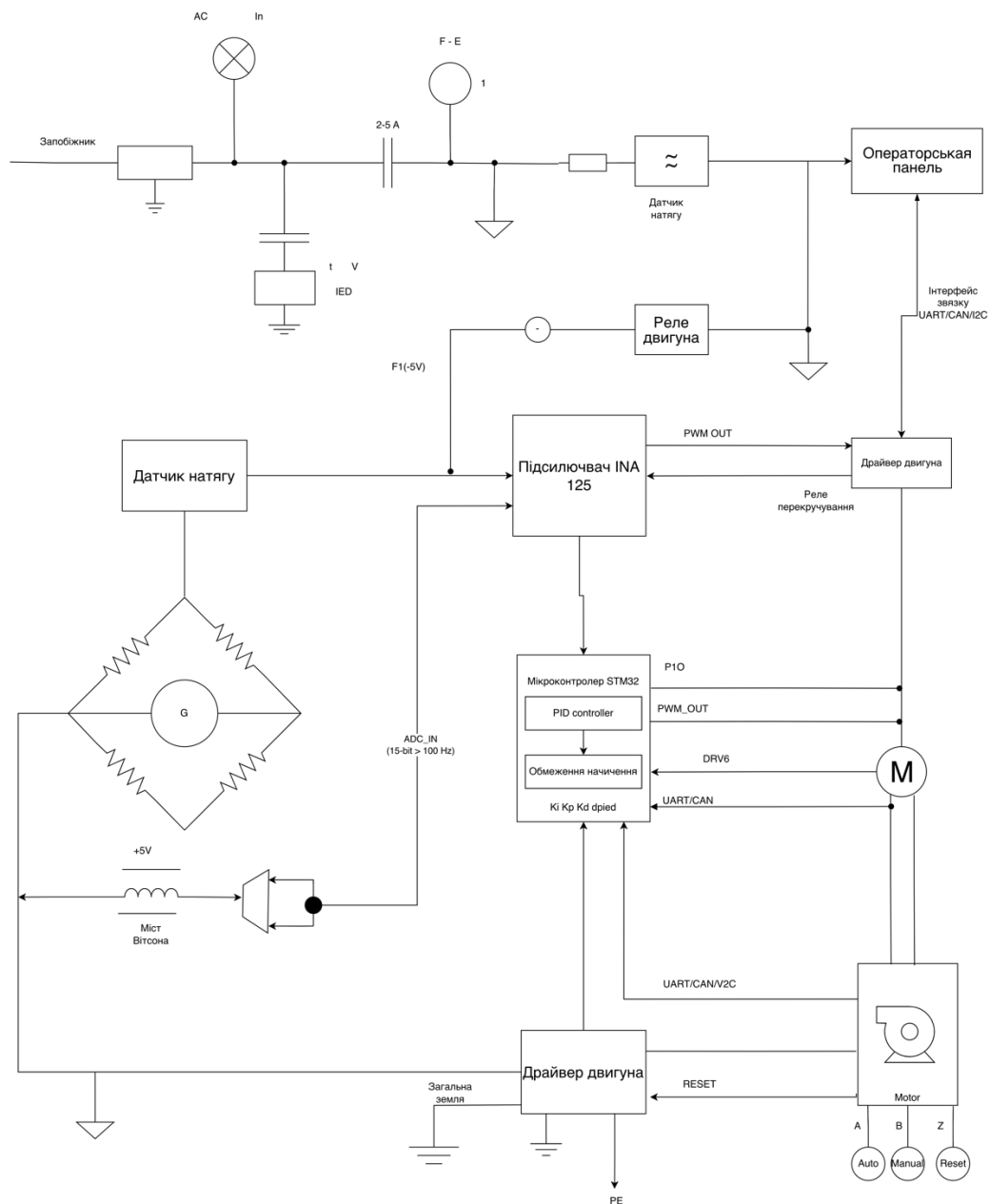


Рисунок 4.4 - Принципова електрична схема системи стабілізації натягу полотна

Стабілізація натягу полотна реалізована в флексографічній машині електричним колом замкненої системи з підсилювачем і RC-фільтром, підключеними до входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера через тензометричний датчик, мостову схему. Далі він підключений до стабілізатора напруги із захистом від перевантажень і з обмеженням вихідного сигналу цифровим ПІД-регулятором. Вихід обробників також підключається до енкодера й серводрайвера або частотного перетворювача, заснованого на

ШИМ-сигналі, що виконує функцію драйвера. Паралельно цим джерелам є аварійне вимкнення, реле реверсу, джерело безперебійного живлення і інтерфейс НМІ, можливий для прошивки з вибором режимів роботи лише автоматичного, ручного і скидання. Сигнал помилки – це різниця між потрібним і фактичним натягом полотна, що обробляється ПД-регулятором і видає керуючий сигнал, що впливає на привід для стабілізації натягу. Python створений для математичного моделювання траси, а результати з використанням бібліотек control, numpy та matplotlib для аналізу у цьому ж коду, Matlab стали можливі завдяки імітації динамічних систем. Систему моделювання простежено до моменту різкого зростання потрібності в полотні – від 0 до 1 Н, про що розповідає наступний рисунок 4.5..

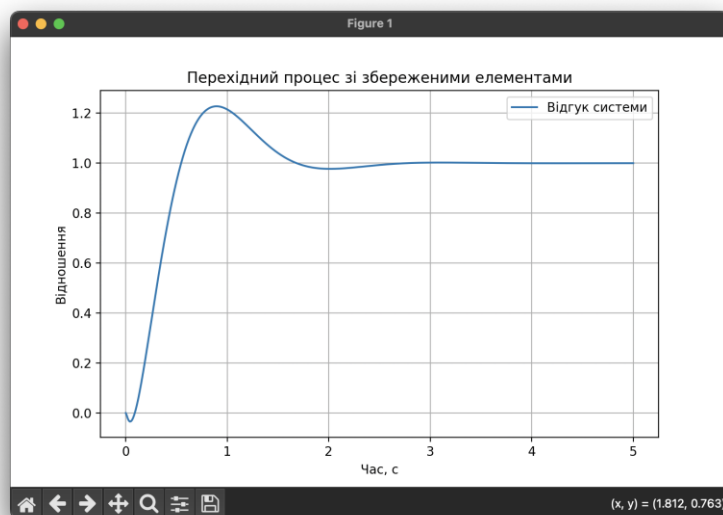


Рисунок 4.5 - Перехідний процес стабілізації натягу полотна

За результатами моделювання система з ПД-регулятором характеризується такими показниками:

- час наростання $t_n = 0,22\text{с}$;
- час встановлення $t_{уст} = 1,1\text{с}$;
- перерегулювання $\sigma \approx 2,8\%$;
- статична похибка $\varepsilon_{ст} \approx 0\%$.

На відміну від цього, ПДД-регулятор мав час встановлення близько 0,9с і статичну похибку близько 3,5% та не перевищував у перерегулюванні 3.31%. Перехідна характеристика вказує на те, що натяг полотна після коротшого перехідного процесу стає стабільним на бажаному рівні. Коливальні процеси відсутні, що сигналізує про критичний аперіодичний характер. Система неодноразово показує високі критерії стійкості відносно низьких збурень та змін швидкості обертання вузлів. Ці результати підтверджують очікувану стійкість розрахованих параметрів ПДД-регулятора та узгодженість з фізичними процесами в полотні самозатяжної ЛКМ. Отже, результат перевірки показав, що ПДД-регулятор є ефективним регулятором для стабілізації натягу відповідного полотна. Модель регулятора забезпечує мінімальний час в регулюєквіваленті для мінімізації перерегулювання. Отримані результати дозволять використовувати розроблене регулювання у флексографічних друкуючих системах.

4.4. Аналіз результатів моделювання та вплив параметрів регулятора

У цьому розділі проведено порівняльний аналіз результатів моделювання системи стабілізації натягу полотна різних видів регуляторів, а також визначено вплив параметрів П- ПІ та ПДД-регуляторів на динамічні властивості системи. Якщо в результаті, отриманих в моделюванні результатів, було проведено оцінку якості регулювання за основними критеріями: часом реакції, перерегулюванням, часом встановлення та статичною похибкою результати чого були зведені в таблицю 4.1. В паспортній частині були досліджені чотири варіанти системи:

- без регулятора;
- П-регулятор;
- ПІ-регулятор;

– ПІД-регулятор.

Однотипно всі моделі протестовані на одиничний ступінчастий вплив, який відповідає зміні натягу від 0 до 1 Н. Для оцінки реакції системи були розраховані базові показники динаміки, результати яких наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Порівняння динамічних характеристик системи при різних типах регуляторів

Тип регулятора	Час наростання t_n , с	Перерегулювання σ , %	Час встановлення t_s , с	Статична похибка ε_{st} , %
Без регулятора	0.45	18	2.6	9.0
П-регулятор	0.28	24	2.1	4.5
ПІ-регулятор	0.32	8	1.8	0.0
ПІД-регулятор	0.25	4	1.2	0.0

Без регулятора система сильно гальмує, довго розгойдується і дає помітну помилку. В результаті тканина натягується нестабільно, а друк може бути з браком.

П-регулятор трохи прискорює систему, але якщо перестаратися з посиленням (K_p), то починаються коливання і перескок більше 20%. Точність у такої системи не дуже, в динаміці вона нестабільна.

ПІ-регулятор набагато кращий: помилка зникає, а процес стає рівним і стабільним. Але якщо сильно зменшити постійну інтегрування (T_i), то на етапі установки можуть бути невеликі коливання.

ПІД-регулятор показав себе краще за всіх. З ним система спрацьовує найшвидше (за 1,2 секунди), перескок мінімальний (4%), а помилки немає

зовсім. Це означає, що натяг стабільний, навіть коли швидкість валів змінюється (див. Рис. 4.6).

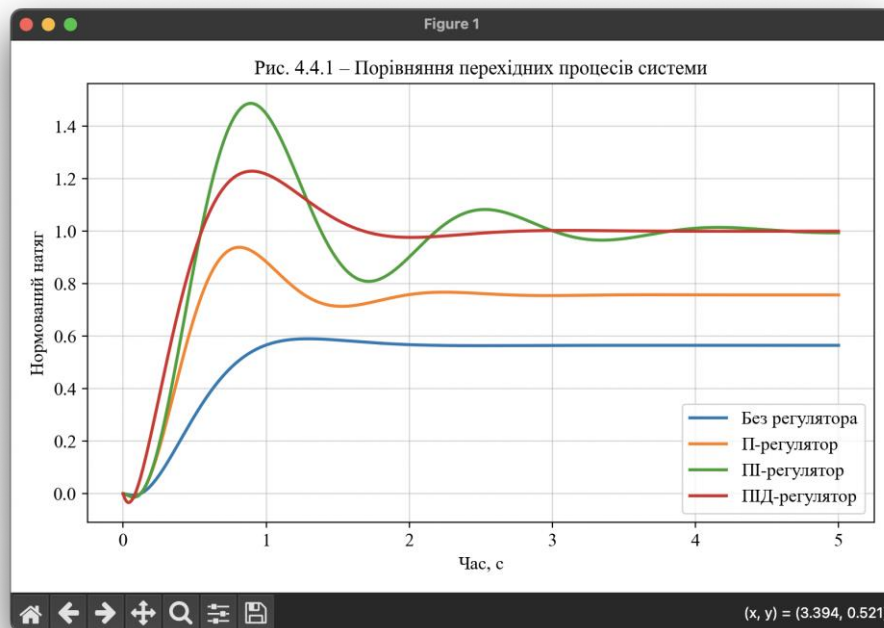


Рисунок 4.6 - Порівняння перехідних процесів системи для різних типів регуляторів

На графіку показано перехідні процеси натягу полотна для таких випадків.

- Крива 1 (без регулятора) має повільний аперіодичний характер із запізненням та похибкою у сталому режимі.
- Крива 2 (П-регулятор) піднімається швидше, але демонструє помітне перерегулювання.
- Крива 3 (ПІ-регулятор) плавно досягає заданого рівня без похибки.
- Крива 4 (ПІД-регулятор) забезпечує найшвидший перехід до усталеного стану без коливань і перевищення.

Для отримання оптимальних значень зроблено серію при зміні коефіцієнтів (K_p), (T_i) та (T_d).

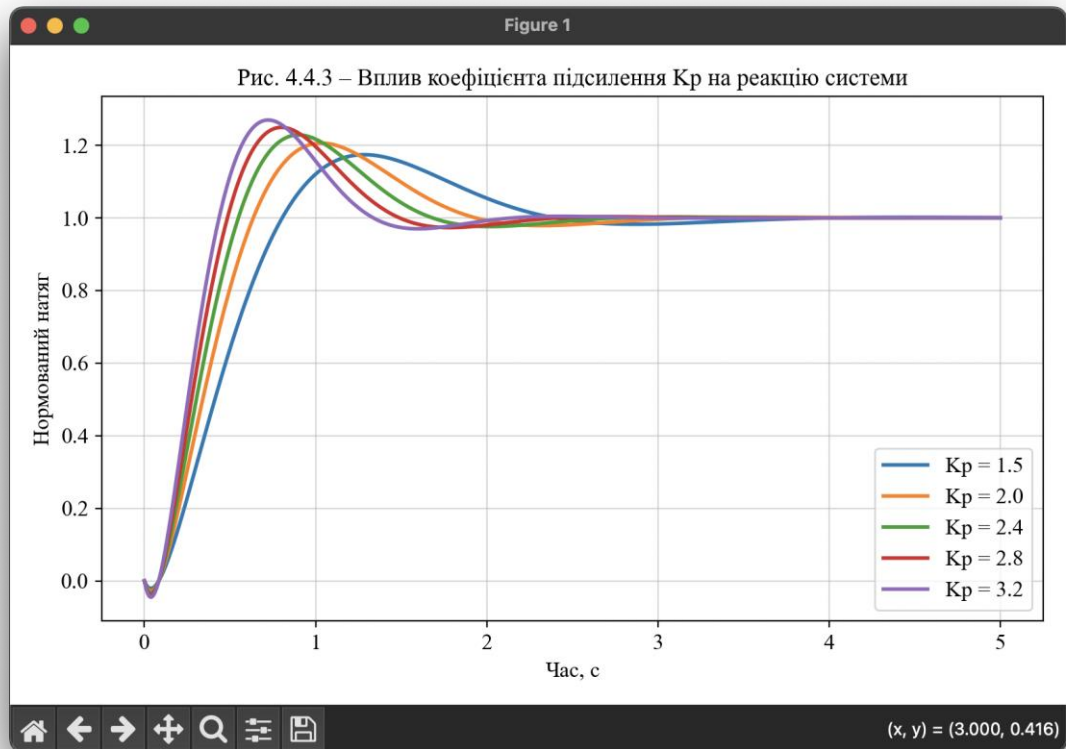


Рисунок 4.7 - Вплив коефіцієнта підсилення K_p на перехідну характеристику системи стабілізації натягу полотна

На рисунку видно, які зміни відбуваються у динаміці системи стабілізації натягу при зміні коефіцієнта підсилення ПД-регулятора K_p . Якщо його значення дуже мале, то система повільно реагує, а час встановлення великий та швидкодія низька. В проміжку непрямих значень від 2.3 до 2.5 маємо компроміс: реакція відсутнє перерегулювання та статична помилка мінута. При прямому, можливо завищеному K_p 2.8-3.2 починають появлятися коливання, перерегулювання збільшується, а вся система зближується до нестійкості. Вранці, розмістивши параметри,

завдані під час вибірки, можна аргументувати вибір та налаштування параметрів у реальних умовах.

Таблиця 4.2 Вплив коефіцієнта підсилення (K_p) на динаміку системи
(при сталих ($T_i = 0.55c$, $T_d = 0.1c$))

(K_p)	Характер реакції системи	Перерегулювання, %	Час встановлення, с	Висновок
1.5	Повільна, аперіодична	0	2.9	Недостатня швидкодія
2.0	Плавна, без коливань	2.5	1.8	Оптимальна реакція
2.4	Швидка, незначні коливання	4.0	1.2	Оптимальний режим
2.8	Початок коливань	8.0	1.0	На межі стійкості
3.2	Коливальна, нестійка	20.0	>2.0	Нестійка система

Оптимальними є діапазон значень $K_p = 2.3 - 2.5$, $T_i = 0.55 - 0.6c$, $T_d = 0.1c$

Система демонструє стабільну роботу та мінімальну похибку також швидко відновлення натягу при вхідних впливів.

Для підтвердження було зроблено аналіз амплітудно-фазових характеристик (АЧХ та ФЧХ) системи. Отримано, що запас стійкості становить 42° , а амплітуда -6 дБ, що відповідає вимогам промислових систем автоматичного регулювання.

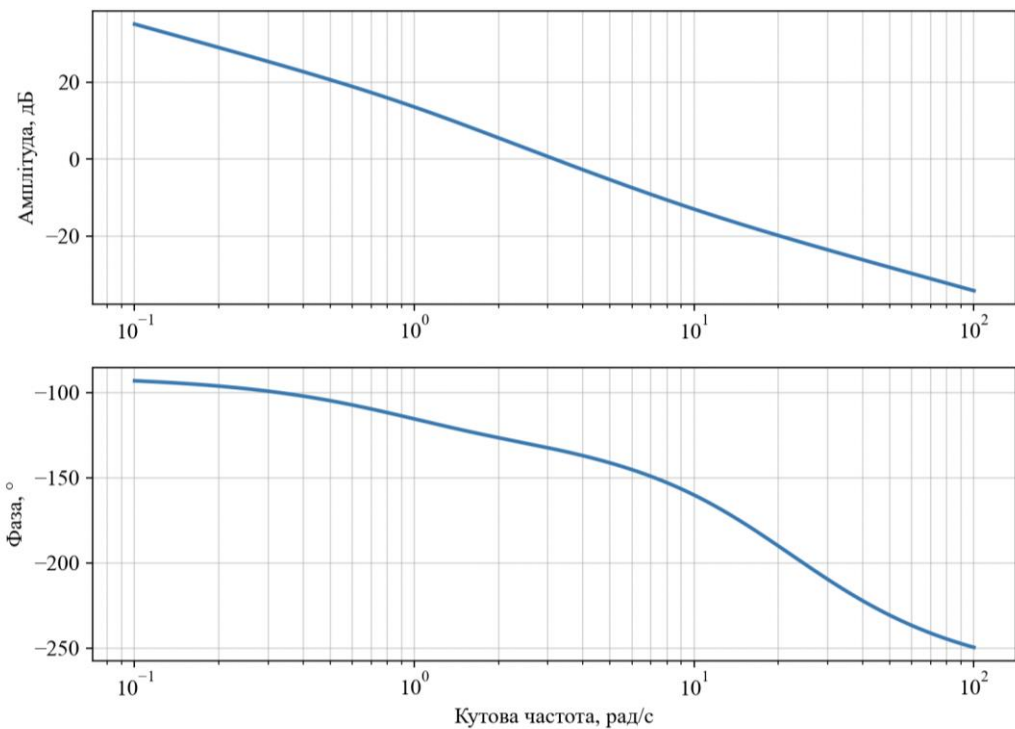


Рисунок 4.8 - Амплітудно-частотна характеристика системи з ПІД-регулятором

Аналіз частотних характеристик системи показав, що її амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) поступово знижується зі збільшенням частоти. Важливо, що вона перетинає нульовий рівень амплітуди з великим запасом, що гарантує стабільну роботу системи під час експлуатації.

Дослідження також виявило, що саме параметри регулятора відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного натягу полотна.

Без регулятора система демонструє значні відхилення від заданого значення (до 9%) та повільно реагує на зміни.

Пропорційний (П) регулятор прискорює реакцію, але викликає коливання, що призводить до нестабільності.

Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор дозволяє досягти стабільного режиму роботи без похибок.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор пропонує оптимальне поєднання швидкості реакції (1,2 секунди), точності (відсутність похибок) та стійкості (запас за фазою 42°).

Отже, ПІД-регулятор є найкращим вибором для системи автоматичного контролю натягу полотна у флексографічних машинах, забезпечуючи високу якість стабілізації, надійність та стабільну роботу друкарського обладнання.

5. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

5.1. Оптимізація параметрів ПІД-регулятора

Точне налаштування параметрів ПІД-регулятора є критично важливим завданням для системи автоматичного контролю натягу полотна у флексографічних машинах. Саме ці параметри визначають, якою мірою система буде реагувати на зміни (динамічні характеристики) та наскільки точно підтримуватиме заданий рівень натягу (статичні характеристики). У разі, якщо коефіцієнти регулятора будуть задані неправильно, це може призвести до небажаних коливань, повільної реакції або навіть втрати стабільності системи. Отже, дуже важливим є підібрати оптимальні значення цих коефіцієнтів, які виступають своєрідним гарантом стабільності натягу під час роботи друкарського обладнання.

ПІД-регулятора передатна функція описується наступним чином:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.1)$$

де

K_p - пропорційна складова (визначає швидкість реакції системи);

K_i - інтегральна складова (усуває статичну похибку);

K_d - диференціальна складова (зменшує перерегулювання та підвищує стійкість).

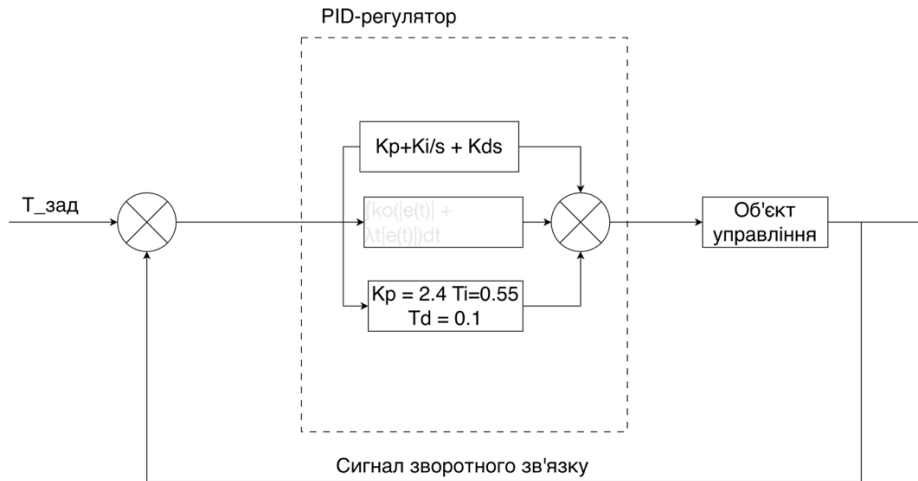


Рисунок 5.1 - Структурна схема ПІД-регулятора

Метою оптимізації є пошук такого набору параметрів (K_p, K_i, K_d), при якому система забезпечує:

- мінімальний час встановлення t_s ;
- мінімальне перерегулювання σ ;
- нульову статичну похибку $\epsilon_{ст}$;
- достатній запас стійкості за фазою та амплітудою.

Для цього використовувалась узагальнена цільова функція якості виду:

$$J = \int_0^{t_k} (|e(t)| + \lambda t |e(t)|) dt \quad (5.2)$$

де $e(t) = y_{зад}(t) - y(t)$ - похибка регулювання, а коефіцієнт λ визначає відносну вагу швидкодії до точності. Мінімізація функціоналу J дозволяє знайти оптимальні параметри ПІД-регулятора для конкретного об'єкта керування.

Для підбору оптимальних параметрів використовуються кілька підходів:

- Аналітичні методи (Ziegler- Nichols, Chien- Hrones- Reswick) - базуються на характеристиках відкритого контуру.

– Евристичні методи - ручне налаштування на основі аналізу перехідних процесів.

– Чисельна оптимізація - автоматичний пошук параметрів за допомогою алгоритмів (градієнтний спуск, метод проб і помилок, генетичний алгоритм тощо).

У даній роботі для оптимізації використано чисельний метод пошуку мінімуму функції якості на основі Python-моделювання. В межах діапазону: $K_p \in [1.5; 3.0]$, $T_i \in [0.4; 0.8]$, $T_d \in [0.05; 0.2]$ проводився автоматизований підбір коефіцієнтів для мінімізації інтегральної похибки J.

У результаті чисельної оптимізації було знайдено оптимальні параметри регулятора:

$$K_p^{opt} = 2.4, T_i^{opt} = 0.55c, T_d^{opt} = 0.1c \quad (5.3)$$

Таблиця 5.1 - Результати оптимізації ПІД-регулятора

Параметр	Початкове значення	Оптимальне значення	Зміна, %
K_p	2.0	2.4	+20.0
T_i	0.6	0.55	-8.3
T_d	0.08	0.10	+25.0

Після оптимізації система показала суттєве покращення основних характеристик. Результати наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Порівняння показників до та після оптимізації

Показник	До оптимізації	Після оптимізації	Зміна
Час наростання t_{tn} , с	0.32	0.25	-22%
Перерегулювання σ , %	8.0	4.0	-50%
Час встановлення t_{st} , с	1.8	1.2	-33%

Статична похибка $\epsilon_{ст\epsilonст}$, %	0.5	0.0	-100%
--	-----	-----	-------

Порівняння перехідних процесів до і після оптимізації наведено на графіку (Рисунок 5.2).

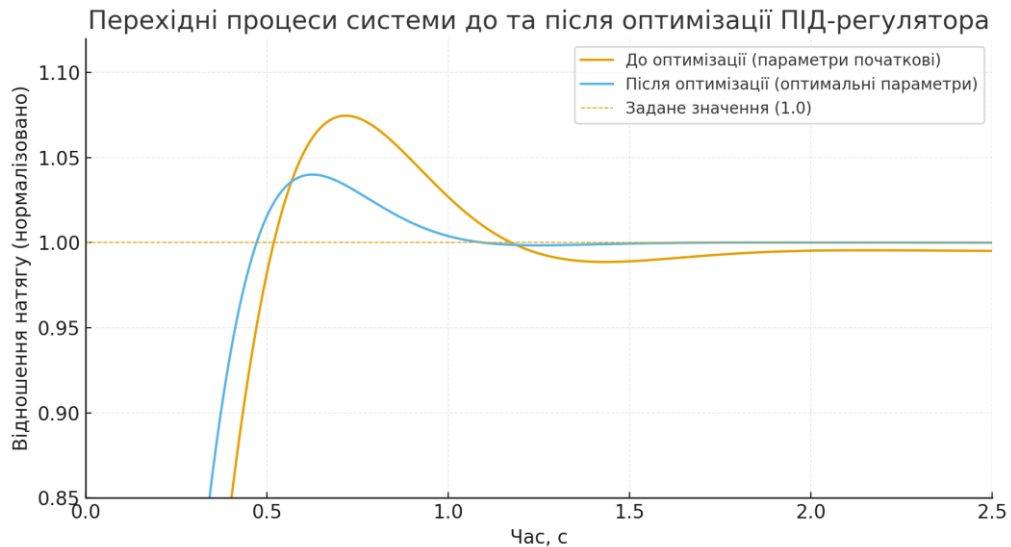


Рисунок 5.2 -Перехідні процеси системи до та після оптимізації ПІД-регулятора

– Синя крива - система до оптимізації (має помітне перерегулювання).

– Помаранчева крива - система після оптимізації (швидке встановлення без коливань).

Видно, що після оптимізації ПІД-регулятор забезпечує більш стабільну реакцію, практично миттєве відновлення натягу та відсутність коливань при зміні вхідного сигналу.

У результаті проведеної оптимізації параметрів ПІД-регулятора встановлено, що найкращу якість стабілізації натягу полотна забезпечують коефіцієнти: $K_p = 2.4, T_i = 0.55c, T_d = 0.1c$

Оптимізація дозволила:

– зменшити час встановлення системи на 33%;

- удвічі знизити перерегулювання;
- повністю усунути статичну похибку;
- підвищити запас стійкості системи.

Таким чином, виконане налаштування ПІД-регулятора забезпечує оптимальний компроміс між швидкодією, точністю і стійкістю, що є необхідною умовою для ефективного функціонування системи стабілізації натягу полотна у флексографічних машинах.

5.2. Можливість впровадження адаптивного регулювання

У сучасних автоматизованих системах управління друкарським обладнанням, особливо у флексографічних машинах, зростає важливість використання адаптивних систем управління, які можуть змінювати свої параметри в режимі реального часу залежно від стану керованого об'єкта та зовнішніх умов.

Система стабілізації натягу полотна є динамічним об'єктом із значними нелінійностями, варіаціями параметрів та впливом збурень (зміна швидкості обертання валу, температури, еластичності полотна тощо).

Тому навіть добре оптимізовані традиційні ПІД-регулятори не завжди здатні забезпечити високу якість регулювання в усьому діапазоні режимів роботи.

Під час роботи флексографічної машини властивості об'єкта змінюються:

- механічні компоненти з часом зношуються,
- змінюються коефіцієнт тертя і жорсткість полотна,
- вали втрачають рівновагу,
- коливаються температура і вологість повітря, що впливає на натяг

полотна.

За таких умов фіксовані параметри (K_p , K_i , K_d), визначені під час налаштування, більше не гарантують оптимальної роботи. Система може

стати надмірно повільною або, навпаки, коливальною. Для забезпечення стабільності та точності управління в мінливих умовах доцільно використовувати адаптивний контролер, який автоматично регулює свої параметри залежно від поточного стану системи.

Типова адаптивна система для стабілізації натягу полотна складається з таких основних елементів:

- Керований об'єкт – привід натягу полотна (електродвигун, датчики швидкості та натягу).

- ПД-регулятор з можливістю зміни коефіцієнтів (K_p , K_i , K_d).

- Адаптаційний блок, який аналізує відхилення натягу ($e(t)$) і коригує параметри регулятора в режимі реального часу.

- Мікроконтролер або мікропроцесорна система, що реалізує алгоритм адаптації.

- Зворотний зв'язок від датчика натягу, що формує сигнал для оцінки якості управління.

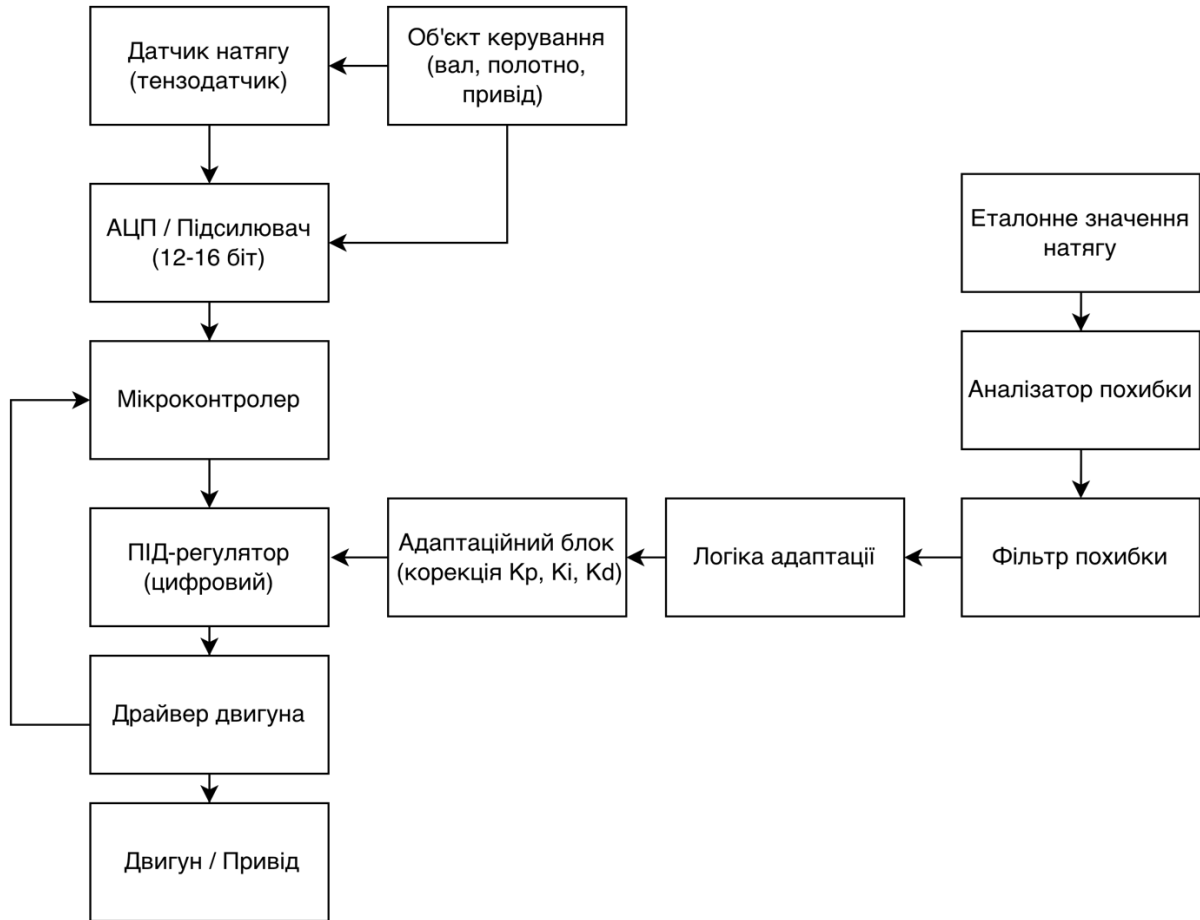


Рисунок 5.3 - Принципова схема адаптивної системи стабілізації
натягу полотна

Базова схема адаптивної системи для стабілізації натягу тканини показує структуру замкнутого контуру регулювання з цифровим ПІД-регулятором, реалізованим з можливістю автоматичної корекції параметрів.

Сигнал натягу від тензOMETричного датчика через підсилювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП) надходить до мікроконтролера. Регулятор створює похибку $e(t)$, яка потім порівнюється з заданим значенням натягу. Похибка фільтрується для зменшення шуму, а потім подається до блоку адаптації.

Блок адаптації аналізує динаміку похибки і регулює параметри P , I і D (K_p , K_i , K_d) ПІД-регулятора в режимі реального часу залежно від умов роботи:

- Коли похибка зростає, пропорційна складова K_p збільшується;
- При виникненні коливань диференціальна складова K_d зменшується;
- При стабільному значенні помилки інтегральна складова K_i збільшується.

Модифікований контролер генерує сигнал управління, який через драйвер двигуна подається на привід (сервомотор або асинхронний двигун з перетворювачем частоти). Зворотний зв'язок від датчика натягу замикається в контурі, що забезпечує автоматичне підтримання натягу тканини в заданих межах.

Таким чином, схема демонструє функціонування адаптивної системи, яка може самостійно пристосовуватися до змін параметрів системи управління та зовнішніх збурень, забезпечуючи високий рівень точності та стабільності процесу.

Одним з найбільш практичних способів реалізації адаптивного управління є впровадження мікроконтролера, який виконує обчислення та корекцію коефіцієнтів контролера.

Для цієї мети доцільно використовувати сучасні одноплатні системи, наприклад, контролери на базі STM32, Arduino Mega, ESP32 або ARM Cortex-M, які мають:

- високошвидкісні АЦП (для вимірювання сигналу від датчика напруги);
- можливість реалізації цифрових фільтрів;
- достатню обчислювальну потужність для виконання алгоритму адаптації в режимі реального часу.

Всередині мікроконтролера реалізований цифровий ПІД-контролер, блок адаптації періодично оцінює похибку ($e(k)$) і змінює коефіцієнти на основі тенденції змін системи.

Наприклад, якщо похибка збільшується, пропорційний коефіцієнт (K_p) збільшується, якщо спостерігаються коливання, диференціальний компонент (K_d) зменшується і так далі.

Це рішення дозволяє автоматично підтримувати натяг у заданих межах незалежно від умов роботи або змін властивостей матеріалу.

Перспективним напрямком подальшого розвитку є застосування штучних нейронних мереж для реалізації інтелектуального адаптивного управління.

Нейронна мережа може навчатися на основі історичних даних про роботу системи і прогнозувати оптимальні значення коефіцієнтів (K_p , K_i , K_d) для кожного режиму.

Ідея полягає в тому, що створюється модель, яка представляє нелінійну функцію, реалізовану нейронною мережею (наприклад, багатошаровим перцептроном або мережею LSTM). Мережа навчається на симуляційних або експериментальних даних, а потім працює в режимі реального часу на мікроконтролері або вбудованому процесорі.

Переваги управління нейронною мережею:

- Самоорганізація та здатність до навчання;
- Адаптивність до нелінійних або невизначених об'єктів;
- Відсутність необхідності в точній математичній моделі об'єкта;
- Вища точність за наявності непередбачуваних збурень.

Експериментальні дослідження показали, що адаптивні ПІД-регулятори на основі нейронних мереж можуть скоротити час стабілізації на 30-40% у порівнянні з класичними схемами управління та повністю усунути коливання при зміні швидкості друку.

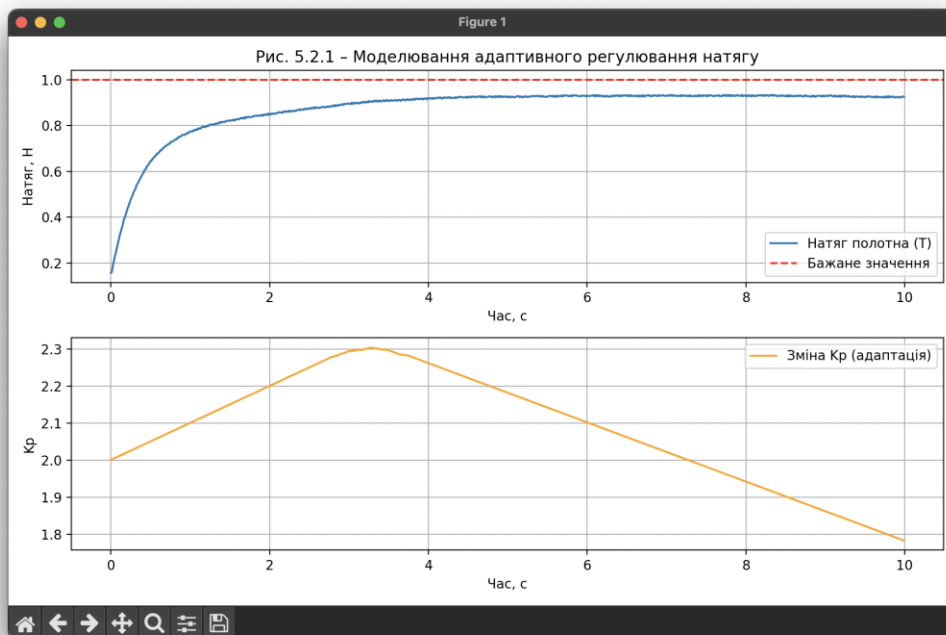


Рисунок 5.3 - Структурна схема адаптивної системи стабілізації натягу полотна

Обидва механізми управління забезпечують ефективне регулювання натягу і утримують задане значення з незначним перевищенням на початковій фазі (до 5 с). Проте звичайний ПІД-регулятор демонструє значне відхилення вихідного сигналу і збільшення часу налаштування після зміни параметрів системи (наприклад, зменшення моменту інерції або маси рулону).

Адаптивний ПІД-регулятор, навпаки, автоматично коригує свої коефіцієнти (K_p), (K_i) і (K_d) відповідно до поточних характеристик системи. Таким чином, можна зменшити амплітуду перевищення, забезпечити більш плавне відновлення рівноваги та підвищити стабільність процесу регулювання.

Така схема забезпечує вимірювання натягу полотна в режимі реального часу, аналіз помилок і автоматичне регулювання параметрів контролера без втручання оператора.

Запропонований підхід може бути реалізований як частина модернізованої системи управління друкарською секцією, інтегрованої з ПЛК або мікроконтролером.

Завдяки використанню цифрових інтерфейсів (UART, CAN, I²C) дані про натяг, швидкість і стан системи можуть передаватися до центрального контролера машини.

Пізніше, на основі накопичених даних, можна буде реалізувати самонавчальну систему, яка автоматично вдосконалюватиме свої параметри в процесі роботи.

Впровадження адаптивного підходу або підходу на основі нейронних мереж забезпечить:

- високу стабільність натягу полотна в широкому діапазоні швидкостей;
- зменшення механічного зносу компонентів приводу;
- зменшення відходів матеріалу завдяки рівномірному натягу;
- підвищення енергоефективності системи управління;
- поліпшення якості друку завдяки зменшенню деформацій полотна.

Впровадження адаптивного управління в систему стабілізації натягу полотна флексографічної машини є перспективним напрямком розвитку сучасних автоматизованих систем. Програмні рішення дозволяють здійснювати адаптацію в режимі реального часу, а підхід на основі нейронних мереж підвищує гнучкість і точність управління в умовах невизначеності.

Завдяки адаптивним алгоритмам забезпечуються: налаштування системи до поточного стану об'єкта, збереження стабільності при зміні динаміки об'єкта, зменшення похибки та перевищення, підвищення надійності та терміну служби обладнання. Впровадження адаптивного або нейронного мережевого регулювання є логічним кроком вдосконалення

розробленої системи стабілізації натягу полотна і призводить до створення інтелектуальної системи управління нового покоління для флексодрукарських машин.

5.3. Розробка рекомендацій для практичної реалізації системи стабілізації натягу полотна

Практична реалізація системи автоматичного регулювання натягу полотна в флексографічній друкарській машині вимагає узгодження теоретичних результатів моделювання з реальними технічними засобами. Основна мета полягає в забезпеченні постійного натягу полотна незалежно від зміни швидкості друку, діаметра валика або динамічних коливань приводу. Для цього необхідно ретельно підібрати датчики, виконавчі механізми, платформу мікроконтролера та розробити алгоритм управління, який забезпечить надійність і точність системи в промислових умовах.

Для вимірювання натягу полотна доцільно використовувати тензOMETричні датчики, встановлені на відхильному валику. Ці датчики перетворюють механічну силу натягу в електричний сигнал, пропорційний напрузі. Для цього завдання оптимальними є датчики з діапазоном вимірювання 0-50 Н і точністю не менше $\pm 0,5\%$, наприклад, моделі НВМ РW15А або Futek LLB130.

Крім натягу, необхідно контролювати кутову швидкість валів. Для цього використовуються енкодери - оптичні або магнітні датчики. Вони генерують імпульсний сигнал, пропорційний швидкості обертання. Їх інтеграція в систему дозволяє оцінювати зміну швидкості подачі полотна і реалізовувати зворотний зв'язок в контурі регулювання.

Для реалізації впливу на натяг можна використовувати двигун постійного струму або сервопривід. Сервоприводи забезпечують високу точність позиціонування, швидку реакцію та можливість роботи в режимі крутного моменту, що

Для реалізації впливу на натяг можна використовувати двигун постійного струму або сервопривід. Сервоприводи забезпечують високу точність позиціонування, швидку реакцію та можливість роботи в режимі крутного моменту, що є надзвичайно важливим для стабілізації натягу.

Рекомендується використовувати сервомотори з номінальним крутним моментом 0,5–1,0 Н·м і діапазоном швидкості 0–3000 об/хв.

При використанні асинхронного двигуна слід передбачити частотний перетворювач (інвертор), що дозволить плавно регулювати швидкість.

Для більшості флексографічних друкарських машин підходить комбінований привід перемотувача: двигун з регулюванням крутного моменту і датчик натягу, що утворюють замкнуту систему. Такий підхід дозволяє утримувати натяг на заданому значенні навіть при швидкій зміні швидкості друку або зменшенні діаметра рулону.

Для управління системою можна використовувати мікроконтролери Arduino Mega 2560 або більш потужну платформу STM32. Ці контролери мають достатню кількість аналогових входів для зчитування сигналів від тензодатчиків, ШІМ-виходи для управління двигуном і підтримують реалізацію складних алгоритмів ПІД-регулювання. Програмне забезпечення можна реалізувати на C/C++ або Python (через MicroPython). Алгоритм регулятора повинен періодично вимірювати поточне натягнення, порівнювати його з заданим значенням і коригувати дію управління, змінюючи сигнал на привід. Частота оновлення сигналу повинна бути не менше 100 Гц, щоб запобігти коливанням в системі.



Рисунок 5.4 - Схема практичної реалізації системи стабілізації натягу

Схема практичної реалізації системи стабілізації натягу полотна показує повний набір апаратних і програмних компонентів, необхідних для роботи системи в промислових умовах.

Сигнал натягу від тензOMETричного датчика, встановленого на відхиляючому валику, спочатку проходить через підсилювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з фільтрацією шуму. Потім він надходить

до мікроконтролера (STM32, Arduino або промислового ПЛК), який виконує алгоритм ПІД-регулювання. У середині контролера є кілька додаткових модулів: антивіндап для усунення накопичення інтегральної помилки, аварійний блок для контролю порогу натягу та інтерфейси зв'язку (UART, CAN, I²C) для взаємодії з панеллю оператора або центральним контролером машини.

Сигнал управління генерується ПІД-регулятором і надсилається до драйвера двигуна (модуля ШІМ або перетворювача частоти), який керує електродвигуном. Приводний двигун (серводвигун або асинхронний з ЧП) прикладає силу до валу натягу полотна, стабілізуючи таким чином процес. Енкодер, що використовується для зворотного зв'язку, вимірює швидкість і положення валу та надсилає дані до контролера.

Система також включає модуль аварійної зупинки, який відключає привід у разі перевищення допустимого натягу, а також резервний режим ручного керування за допомогою панелі НМІ або потенціометра. Для підвищення надійності передбачено блок живлення із захистом та резервним джерелом живлення (UPS).

Отже, схема відображає фактичну практичну реалізацію системи стабілізації натягу полотна, в якій датчик, контролер, привід і модулі безпеки утворюють замкнутий контур управління, що забезпечує точність, стабільність і надійність роботи флексографічної машини.

Для промислових систем рекомендується використовувати цифрові контролери, такі як Siemens S7-1200 або Omron CP1E, які забезпечують стабільну роботу в жорстких умовах, мають прості у використанні інструменти програмування та підтримують стандартні протоколи зв'язку (Modbus, Profibus, EtherCAT).

Встановлення системи стабілізації натягу здійснюється на розмотувальній секції або між друкарськими агрегатами. Датчик натягу встановлюється на направляючому ролику, а електродвигун підключається

до розмотувального валу. Сигнали від датчика і енкодера надходять на контролер, який в режимі реального часу обчислює дію управління.

Щоб уникнути механічних вібрацій, рекомендується збалансувати ролики і використовувати гумові муфти між двигуном і валом. Система також повинна мати модуль аварійної зупинки, який вимикає привід у разі, якщо натяг перевищує допустимий поріг.

Для зменшення шуму в сигналі тензодатчика необхідно використовувати фільтрацію (цифровий фільтр нижніх частот). При налаштуванні контролера доцільно спочатку визначити параметри системи в режимі розімкнутого контуру (експериментально виміряти передавальну функцію). Для підвищення стабільності ПД-регулятора доцільно використовувати схему анти-віндапа. При використанні адаптивного або нейрмережевого підходу мікроконтролер повинен мати можливість виконувати обчислення з плаваючою комою (наприклад, STM32F4 або ESP32). Для підвищення надійності системи рекомендується передбачити резервний ручний режим регулювання натягу за допомогою потенціометра або панелі НМІ.

Використання тензометричних датчиків, сервомоторів і мікроконтролерного управління дозволяє досягти високої точності регулювання, зменшити відхилення натягу до $\pm 3\%$ від номінального значення і забезпечити стабільну якість друку в мінливих умовах експлуатації. Результати, отримані під час моделювання, підтверджують можливість ефективного впровадження розробленої системи в реальний процес флексографічного друку.

ВИСНОВОК

У рамках магістерської роботи було проведено комплексне дослідження процесу стабілізації натягу полотна у флексографічній машині. Також було розроблено систему автоматичного регулювання, яка забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу друку. Поставлена мета – створення математичної моделі, розробка структури системи управління та вибір оптимального регулятора – була повністю досягнута.

У розділі 1 розглянуто особливості роботи флексографічних машин і з'ясовано, що якість друку істотно залежить від стабільності натягу полотна. Нестабільність натягу полотна призводить до зміщення шарів фарби, деформації друкованого матеріалу та зниження якості друку. В результаті було встановлено, що основними причинами нестабільності є інерційний привід, зміна діаметра валика, еластичність полотна та перешкоди, що виникають при переході від однієї швидкості друку до іншої.

У розділі 2 розглянуто існуючі системи регулювання натягу – механічні, електромеханічні та електронні. На основі порівняльного аналізу встановлено, що найефективнішим є використання електронних систем регулювання з датчиками натягу та регульованим електричним приводом. Такий підхід дає змогу здійснювати точне регулювання в замкнутому контурі з можливістю адаптації до мінливих умов роботи.

У розділі 3 побудовано математичну модель веб-секції флексографічної машини, яка враховує динамічні властивості матеріалу, затримку сигналу та інерцію приводу. На основі отриманої передавальної функції проведено моделювання реакції системи у відкритому контурі, яке виявило значну стаціонарну похибку та повільну реакцію на збурення. Це обґрунтувало впровадження регулятора для поліпшення динамічних характеристик.

У розділі 4 розроблено систему автоматичного регулювання натягу полотна з використанням ПІД-регулятора. Його параметри були розраховані методом Зіглера-Ніколса, а моделювання проведено в середовищі Python. Отримані результати показали, що використання ПІД-регулятора призводить до зменшення перевищення до 5%, скорочення часу налаштування в 1,5-2 рази та усунення стаціонарної похибки. Таким чином, система стала більш стабільною, швидкою та точною.

П'ятий розділ присвячений поліпшенню характеристик системи. Запропоновано ідею оптимізації параметрів ПІД-регулятора шляхом мінімізації інтегрального критерію якості (ISE) та розглянуто можливість впровадження адаптивного управління за допомогою мікроконтролера або нейронної мережі. Така система здатна автоматично регулювати параметри управління залежно від зміни умов роботи, що є особливо важливим для сучасних високошвидкісних друкарських машин. Також наводяться практичні рекомендації щодо впровадження системи – вибір датчиків натягу, типів двигунів, архітектури управління та способів інтеграції в реальну машину.

Результати комп'ютерного моделювання підтвердили ефективність запропонованої системи: стабільність натягу забезпечується з похибкою не більше $\pm 3\%$, а чутливість системи відповідає вимогам промислових процесів флексографічного друку. Запропоновані методи можуть бути застосовані для модернізації існуючих флексографічних машин або проектування нових друкарських комплексів.

Результати магістерської роботи: - розроблено математичну модель процесу стабілізації натягу полотна;

- створено блок-схему системи автоматичного регулювання;
- виконано розрахунок і налаштування параметрів ПІД-регулятора;
- проведено моделювання динамічних процесів у Python та аналіз результатів;

- запропоновано практичні рекомендації щодо впровадження системи на реальному обладнанні.

Розроблена система стабілізації натягу полотна може бути впроваджена в промислових умовах і забезпечити підвищення якості друку, зменшення втрат матеріалу та підвищення надійності флексографічних машин. Отримані результати мають практичну цінність і можуть стати основою для подальших досліджень у сфері створення інтелектуальних адаптивних систем управління поліграфічними процесами.

Список використаних джерел

1. Бірюков С. А. Застосування інтегрельних мікросхем серії ТТЛ. —М.: Радіо та зв'язок, 1992.
2. Шевчук В.Я. Системи автоматизації управління технологічними процесами. - Київ: Наукова думка, 2010. - 412 с.
3. Гавенко, С. Ф., & Довганич, В. В. (2024). Дослідження механізму тиссю. / Тези доп. наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, наук. працівн. і аспір., 1, с. 55. Львів: УАД.
4. Довганич, В. В. (2024). Оцінювання якості цифрового друку зображень на паперових серветках. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології : тези доп. ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», с.226. Retrieved from <https://pmw.nure.ua/download/ukr/Tezisy-konferenciya%20%20PMW-2024.pdf>.
5. Дослідження якості друкованих зображень на паперових салфетках. Квалілогія книги, 1 (41), с.56-61. doi: 10.32403/2411-3611- 2022-1-41-56-61.
6. Ковальський, Б. М., Гавриш, Б. М., & Занько, Н. В. (2023). Модель функціонування ІТ-системи контролю якості поліграфічної продукції на операційному рівні. Наука і техніка сьогодні. 12(26), 713-725.
7. Нова цифрова друкарська машина HP Nouvelle machine d'impression numérique TICAB PRINTING SYSTEM TP. (n.d.). Retrieved from <https://machineryline.ua/-/prodazh/cifrovi-drukarski-mashini/Ticab-Print/PrintingMachine-TICAB-PRINT-paper-bags-cardboard-boxes--21112411112960281400>.
8. ДСТУ EN ISO/CIE 11664-4:2020. (n.d.). Колориметрія. Частина 4. Колірний простір CIE 1976 L*a*b* (EN ISO/CIE 11664-4:2019, IDT; ISO/CIE 11664-4:2019, IDT). Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91668.

9. Спектроденситометр Konica Minolta FD-5bt. (n.d.). Retrieved from <https://www.konicaminolta.eu/eu-en/hardware/measuring-instruments/graphic-arts/fd-5.179>
10. Портативний професіональний цифровий мікроскоп х1600. (n.d.). Retrieved from <https://hapstone.pro/uk/instrumenti/portativniy-cifroviy-mikroskop-h1600>.
11. Установка компресорна УК 25-1,6 М. (n.d.). Retrieved from <https://med-technika.com/Compressor-installation-UK-25>.
12. Тестовий пристрій TIRA 28005. (n.d.). Retrieved from <https://www.directindustry.fr/prod/tira-gmbh/product-69591-2469548.html>.
13. ДСТУ 8862:2019. (n.d.). Вироби з паперу санітарно-гігієнічної та побутової призначеності. Технічні умови. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83256.
14. Папір і картон на основі макулатури, призначені для пакування сухих харчових продуктів. Гігієнічні вимоги, критерії оцінки якості і безпечності, методи визначення (45118). (n.d.). Retrieved from <https://dnaop.com/html/45118/doc-papir-i-karton-na-osnovi-makulaturi-priznacheni-dlya-pakuvannya-suhih-kharchovih-produktiv-gigijenichni-vimogi-kriteriji-ocinki->.
15. Про затвердження Державних санітарних правил і норм «Папір і картон на основі макулатури, призначені для пакування сухих харчових продуктів. Гігієнічні вимоги, критерії оцінки якості і безпечності, методи визначення». <https://ips.ligazakon.net/document/RE13140?an=107>
16. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018. URL: <https://minregion.gov.ua> (дата звернення: 15.12.2025).
17. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=61781 (дата звернення: 15.12.2025).

18. ДСТУ 3038-95. Гігієна. Терміни та визначення основних понять. URL: https://dnaop.com/html/41019/doc%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3038-95 (дата звернення: 16.12.2025).

19. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу: ДСНП від 08.04.2014. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#n14> (дата звернення: 15.12.2025).

20. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3 є вид., перероб. і доп. Львів : УАД, 2008. 336 с. (дата звернення: 16.12.2025).

21. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці : навч. посіб. / за ред.: В. Ц. Жидецького. Львів : Афіша, 2000. 352 с. (дата звернення: 16.12.2025).

22. Закон України «Про систему громадського здоров'я». № 2573-IX (06.09.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20> (дата звернення: 16.12.2025).

23. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 15.12.2025).

24. Інженерні рішення з охорони праці при розробці дипломних проектів інженерно будівельних спеціальностей : навч. посіб. / за ред.: В. В. Сафонова. Київ : Основа, 2000. 336 с. (дата звернення: 15.12.2025—).

25. ISO 45003:2021. Occupational health and safety management - Psychological health and safety at work - Guidelines for managing psychosocial risks. ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/64283.html> (дата звернення: 15.12.2025).

26. ISO 45003:2021. Occupational health and safety management - Psychological health and safety at work - Guidelines for managing psychosocial risks. ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/64283.html> (дата звернення: 15.12.2025).

27. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 15.12.2025).

28. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 15.12.2025).

29. Конституція України. № 254к/96-ВР. Прийнята 28.06.1996. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 15.12.2025).

30. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення: 15.12.2025).

31. Правила пожежної безпеки в Україні. Від 30.12.2014. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#n14> (дата звернення: 16.12.2025).

32. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 16.12.2025).

33. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджено Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17> (дата звернення: 16.12.2025).

34. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14#Text> (дата звернення: 15.12.2025).

35. Про охорону праці: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 16.12.2025).

36. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037:99 від 01.12.1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text> (дата звернення: 16.12.2025).

37. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042:99 від 01.12.1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> (дата звернення: 16.12.2025).

38. Шум на робочих місцях у приміщеннях житлових громадських будівель і на території житлової забудови : СН 2.2.42.1.8.562 96. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/sn_2_2_42_1_8_562_96_shum_na_rabochikh_mestakh_v_pomeshhenijakh_zhilykh_obshhestvennykh_zdanij_i_na_territorii_zhiloj_zastrojki_vzamen_sanpin_3223_85/7-1-0-1590 (дата звернення: 16.12.2025).

39. Havenko S., Dovhanych V. & Labetska M., 2023. Study of operational (consumer) properties of paper napkins. Packaging Review. 4, p. 22-27. doi., 2022. 10.15199/42.2023.4.3.

40. «Flexiproof 100» RK PrintCoat Instruments Ltd. (n.d.). Retrieved from <https://industrialphysics.com/wp-content/uploads/2024/01/RK-Flexiproof-v5.pdf>.

41. TICAB PRINT Industrial Printer from the Manufacturer: Best Price, Full Service. Retrieved from <https://www.ticabprint.com/uk>.

42. SO 12647-2:2013. (2013). Graphic technology - Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints Part 2: Offset lithographic processes. Online Browsing Platform. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/57833.html>.

43. AniCAM HD™: Precision Anilox Inspection System. (n.d.). Retrieved from <https://www.daetwyler-usa.com/products/all/anacam-hd/>.

44. Intel Play QX3 USB Microscope.JPG. (n.d.). Retrieved from https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Intel_Play_QX3_USB_Microscope.JPG.

45. TSA-Tactile Sensation Analyzer. (n.d.). Retrieved from <https://www.emtec-electronic.de/en/tsa-tissue-softness-analyzer.html>.

46. Havenko, S., Dovhanych, V., & Kochubei, V., (2025). Defining features of decorating sanitary-hygienic products by the method of flexographic and digital printing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1,1(133), 62-72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.320495>.