

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С. З. Гжицького
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого бакалаврського рівня на тему:

**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ШВИДКОПЛИННИХ ПРОЦЕСІВ
ВИРОБНИЦТВА В ІНЕРЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА ПРИКЛАДІ
ВИГОТОВЛЕННЯ СИГАРЕТ»**

Виконала: студентка групи Акт-42сп
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Мацейко Е.Р.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –
174 – „Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“ ____ ” _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студентці
Мацейко Ельвірі Русланівні

1. Тема роботи

«Автоматизація швидкоплинних процесів виробництва в інерційних системах на прикладі виготовлення сигарет»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

затверджена наказом по університету від “ 25 ” лютого 2025 р., № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2024 р.

3. Початкові дані до роботи:

Структура та принцип роботи лінії виготовлення сигарет. Процес формування тютюнової стрічки в інерційних умовах. Характеристики існуючих сенсорів, виконавчих механізмів та типових порушень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

1.2 Класифікація та особливості швидкоплинних процесів у виробництві сигарет

1.3 Методи та засоби автоматизації в інерційних технологічних системах

1.4 Обґрунтування вибору технологічного процесу для автоматизації

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Технологічна суть процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки

2.2 Огляд типових порушень і нестабільностей у процесі та їх наслідки

2.3 Функціональна структура об’єкта керування

2.4 Особливості об’єкта з точки зору автоматизації

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ТЮТЮНОВОЇ СТРІЧКИ

3.1 Формалізація та математичне моделювання об’єкта керування

3.2 Синтез та налаштування системи автоматичного регулювання

3.3 Моделювання системи автоматичного керування в MATLAB

3.4 Вибір технічних засобів реалізації системи

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Структурна схема автоматизованого процесу подачі та формування тютюнової стрічки. Схема роботи шнекового живильника та його розміщення в загальній системі. Блок-схема управління швидкоплинним процесом у формуючому блоці. Габаритний план шнекового транспортера. Схема формування і обрізки тютюнового шару. Схема підключення датчиків положення та виконавчих механізмів. Візуалізація роботи SCADA/PLC-системи на основі отриманих параметрів. Розрахунок характеристик. Висновки.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій		
4	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання ____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02 - 21.03.24	
2	Виконання другого розділу та формування початкових даних	22.03 - 11.04.24	
3.	Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи	12.04 - 11.05.24	
4.	Написання розділу: «Охорона праці»	12.05 - 17.05.24	
5.	Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи	18.05 - 23.05.24	
6.	Завершення роботи в цілому	24.05 - 10.06.24	

Студентка _____ Мацейко Е.Р.
(підпис)

Керівник роботи _____ Запорожцев С.Ю.
(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 004.896:663.97

Автоматизація швидкоплинних процесів виробництва в інерційних системах на прикладі виготовлення сигарет

Мацейко Е.Р. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім. С. З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 70 с. текст. част., 17 рис., 4 табл., 17 арк. ілюстраційного матеріалу, 16 джерел.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення сигарет у швидкоплинному інерційному середовищі.

Мета роботи – розробка автоматизованої системи керування, яка забезпечить стабільну роботу технологічного процесу, зниження енергоспоживання та зменшення людського фактору.

У роботі проаналізовано особливості інерційних процесів виробництва, виявлено проблеми ручного управління та обґрунтовано доцільність автоматизації. Запропоновано технічне рішення на базі контролера Siemens і SCADA-системи, розроблено структуру керування, виконано оцінку витрат і економічного ефекту. Автоматизація дозволила знизити кількість обслуговуючого персоналу, витрати на електроенергію та підвищити стабільність продукції. Розрахунки підтвердили ефективність впровадження та швидко окупність системи.

Ключові слова: автоматизація, швидкоплинні процеси, інерційна система, тютюнове виробництво, економічна ефективність, SCADA, контролер Siemens.

Keywords: automation, fast processes, inertial system, tobacco production, economic efficiency, SCADA, Siemens controller.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 Класифікація та особливості швидкоплинних процесів у виробництві сигарет.....	11
1.3 Методи та засоби автоматизації в інерційних технологічних системах	14
1.4 Обґрунтування вибору технологічного процесу для автоматизації.	19
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	22
2.1 Технологічна суть процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки	22
2.2 Огляд типових порушень і нестабільностей у процесі та їх наслідки	28
2.3 Функціональна структура об'єкта керування	33
2.4 Особливості об'єкта з точки зору автоматизації	40
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ТЮТЮНОВОЇ СТРИЧКИ.....	44
3.1 Формалізація та математичне моделювання об'єкта керування	44
3.2 Синтез та налаштування системи автоматичного регулювання.....	51
3.3 Моделювання системи автоматичного керування в MATLAB	53
3.4 Вибір технічних засобів реалізації системи.....	55
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	58
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	62
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	69

ВСТУП

У сучасних умовах глобальної конкуренції та стрімкого розвитку технологій підприємства, що спеціалізуються на виробництві тютюнових виробів, змушені постійно вдосконалювати свої виробничі процеси. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності таких процесів є їх автоматизація, що забезпечує точність, швидкодію та стабільність функціонування технологічного обладнання. Особливої актуальності ця проблема набуває у випадках швидкоплинних та інерційних процесів, де навіть незначне запізнення реакції або коливання технологічних параметрів можуть призвести до істотного зниження якості продукції, втрат сировини або аварійного зупинення обладнання.

Виробництво сигарет — це складний безперервний технологічний процес [1, 5], у якому задіяно багато взаємопов'язаних механізмів і систем, що працюють на високих швидкостях. Починаючи від подачі тютюнової стрічки, регулювання її товщини, вологості та рівномірності, і завершуючи формуванням готових сигарет, процес вимагає безперервного контролю та швидкої реакції системи керування. Оскільки більшість змін у таких процесах мають інерційний характер, традиційні методи регулювання на основі ручного керування або простих програмованих алгоритмів виявляються недостатньо ефективними.

Автоматизація швидкоплинних процесів у тютюновій промисловості дозволяє не лише стабілізувати якісні показники продукції, але й значно знизити енергоспоживання, оптимізувати використання сировини, зменшити вплив людського фактору та скоротити витрати на обслуговування обладнання.

Це досягається за рахунок впровадження програмно-технічних комплексів, до складу яких входять контролери типу Siemens S7-1500 [9], SCADA-системи для моніторингу та візуалізації, а також виконавчі пристрої з точним динамічним керуванням. Успішна реалізація автоматизованої системи

передбачає глибокий аналіз об'єкта керування, виявлення його особливостей, моделювання взаємозв'язків між змінними та розробку структурованого програмного забезпечення з можливістю адаптації до різних режимів роботи.

Особливість задачі, що розглядається у цій кваліфікаційній роботі, полягає в необхідності керування процесами, які відбуваються з великою швидкістю і мають суттєву інерційність. Це зумовлює специфічні вимоги до точності вимірювання, швидкодії системи, налаштування контурів зворотного зв'язку та компенсації перехідних процесів. Наприклад, у виробництві сигарет зазвичай лінії працюють із темпом понад 5 000 одиниць продукції на хвилину, що не залишає простору для повільної чи запізненої реакції системи на зміну умов. Відповідно, актуальною є побудова математичних моделей таких процесів, розробка структур керування на основі принципів оптимального регулювання та реалізація алгоритмів самоналаштування.

Розгляд теми автоматизації на прикладі виготовлення сигарет також обґрунтовується її практичною значущістю для виробничих підприємств. Автоматизовані системи не лише покращують параметри процесу, але й забезпечують інтеграцію з вищим рівнем керування — MES та ERP-системами, що дозволяє ефективно управляти не лише технічними, а й логістичними та економічними аспектами виробництва. Це, своєю чергою, створює передумови для цифрової трансформації виробництва, переходу до концепції «розумної фабрики» та підвищення конкурентоспроможності підприємства на ринку.

У зв'язку з цим, метою даної кваліфікаційної роботи є аналіз, розробка та техніко-економічне обґрунтування автоматизованої системи керування швидкоплинними інерційними процесами у виробництві сигарет, із урахуванням особливостей технологічного середовища, вимог до динамічних характеристик та можливостей сучасної техніки автоматизації. У роботі також буде виконано оцінку ефективності впровадження з точки зору зниження витрат, скорочення обслуговуючого персоналу, енергозбереження та підвищення стабільності виробництва.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

Процес виробництва сигарет є складною технологічною системою, яка поєднує в собі високошвидкісну механіку, точне дозування матеріалів, а також автоматизоване керування [2] для досягнення стабільної якості продукції. Незважаючи на уявну простоту кінцевого продукту, сигаретна промисловість є однією з найбільш автоматизованих у галузі харчової та легкої промисловості. У структурі сучасного виробництва тютюнових виробів вирізняються декілька основних етапів, які функціонують як єдина узгоджена система.

Перший ключовий етап — це підготовка тютюну до подальшого формування. На цьому етапі здійснюється розпушування, сортування, змішування та зволоження тютюнової сировини. Важливість цієї фази полягає у забезпеченні рівномірного фізико-хімічного стану матеріалу. Для досягнення стабільної якості застосовуються спеціальні тютюнові барабани з функцією контролю температури та вологості. Комплекс обладнання для обробки тютюну забезпечує підтримку потрібних параметрів зволоження та щільності, оскільки саме ці характеристики впливають на формування стрічки та на рівномірність наповнення сигарети.

Наступним етапом є формування тютюнової стрічки, яка подається в машину, що створює безперервний тютюновий стрижень. Тут тютюн укладається у рівномірний шар на транспортну стрічку, який потім пресується та вирівнюється. У процесі застосовується система вирівнювальних валів, пневматичних регуляторів тиску, а також контролерів щільності або маси стрічки. Цей етап є критично важливим з точки зору забезпечення стабільності параметрів майбутньої сигарети, адже від однорідності тютюнової стрічки залежить як якість згорання, так і смакові властивості кінцевого продукту.

Далі відбувається обгортання сформованого тютюнового стрижня у сигаретний папір. На цьому етапі застосовуються високошвидкісні клеєнанесення та обгортальні пристрої, які мають забезпечити точне позиціонування паперу, а також рівномірне дозування клею для фіксації обгортки. Порушення в роботі цього етапу можуть призвести до порушень геометрії сигарети, її розсипання чи розкручування, тому застосування сенсорів натягу, систем контролю діаметра та швидкості тут є стандартом. Особливо важливу роль відіграє точність синхронізації дії усіх елементів механізму обгортання.

Після формування й обгортання тютюнового стрижня відбувається етап різання, під час якого довга сигаретна "труба" розрізається на окремі сигарети встановленої довжини. Типовий розмір готової сигарети складає 84 мм, з яких близько 69 мм займає заповнений тютюном стрижень, а 15 мм — фільтр. У сучасних виробничих лініях [14] використовується роторно-різальний механізм, який працює зі швидкістю в декілька тисяч зрізів за хвилину. Надзвичайна динаміка цього процесу вимагає точної синхронізації між транспортною системою подачі та самим ножовим блоком, тому тут широко застосовуються енкодери, сервомеханізми та контролери, які забезпечують стабільність положення точки різу навіть на високих швидкостях.

Наступним важливим етапом є приєднання фільтра, яке відбувається майже одночасно з різанням. Цей процес виконується у спеціальному фільтроз'єднувальному модулі, який формує подвійні сигарети з фільтром посередині, а потім розрізає їх навпіл. До точності виконання цієї процедури пред'являються високі вимоги: зміщення або перекося фільтра можуть вплинути не лише на зовнішній вигляд, а й на параметри тяги та фільтрації. Устаткування повинно забезпечувати не лише точне механічне позиціонування, а й надійне склеювання із заздалегідь дозованою кількістю клею.

Після основних технологічних стадій сигарети проходять фазу контролю якості. На цьому етапі реалізуються автоматизовані системи візуального контролю, вимірювання щільності, ваги, довжини, цілісності обгортки та наявності фільтра. Деякі лінії також обладнані системами перевірки рівномірності тютюнового наповнення за допомогою оптичної або рентгенівської техніки. Цей рівень автоматизації дозволяє не лише мінімізувати відсоток браку, а й оперативно втручатися в процес, якщо система виявить відхилення від нормативів. Поширеною практикою є використання систем зі зворотним зв'язком, які дозволяють автоматично коригувати швидкість подачі тютюну, дозування клею чи положення ножа в разі виявлення нестабільності.

Усі описані етапи технологічного процесу об'єднані в єдиний виробничий цикл за допомогою сигаретних машин [11] типу MA-6, PROTOS, PASSIM та інших моделей, що відзначаються високою продуктивністю та гнучкістю налаштувань. Такі машини здатні виготовляти до 10 тисяч сигарет за хвилину, при цьому інтеграція з автоматизованими системами керування дає змогу здійснювати постійний моніторинг стану обладнання та оперативне втручання у випадку збоїв. У сучасних лініях передбачено модулі інтеграції з SCADA-системами, що дозволяє оператору мати повну візуалізацію та архівування усіх даних у реальному часі.

Таким чином, виробництво сигарет [6] є прикладом складного, високошвидкісного, інерційного технологічного процесу з багатьма контрольованими параметрами, які вимагають високого ступеня автоматизації, точності механічних систем і ефективного керування. Саме тому оптимізація окремих етапів, зокрема подачі тютюнової стрічки, становить актуальне завдання, яке впливає на стабільність якості всього виробничого циклу.

1.2 Класифікація та особливості швидкоплинних процесів у виробництві сигарет

У виробництві сигарет значна частина операцій має характер швидкоплинних процесів, тобто таких, що відбуваються за дуже короткий час, вимагають високої точності виконання та характеризуються мінімальними інтервалами між діями виконавчих елементів. Високий темп виробництва, що часто досягає тисяч одиниць продукції за хвилину, створює значне навантаження на обладнання та систему керування. Особливість таких процесів полягає в тому, що навіть незначні відхилення від заданих параметрів можуть викликати лавиноподібне накопичення помилок, що призводить до браку або зупинки всієї лінії.

Ключова увага у таких процесах приділяється часовим характеристикам — затримці в реакції на зміну вхідного сигналу, тривалості переходу з одного стану в інший, швидкості стабілізації та здатності підтримувати параметри у межах допустимих відхилень. Всі ці характеристики є критичними для сигаретного виробництва, оскільки більшість операцій виконуються в динамічному режимі на великій швидкості руху матеріалів, що практично унеможливорює втручання оператора в реальному часі.

Одним із найхарактерніших швидкоплинних процесів є подача тютюну у вигляді стрічки. Система повинна забезпечити безперервне, рівномірне й об'ємно стабільне формування шару тютюну на транспортуючому елементі. При цьому будь-які флуктуації подачі, зміни щільності тютюнової маси або механічні вібрації здатні вплинути на якість кінцевого продукту. Крім того, цей процес залежить від багатьох зовнішніх чинників, таких як вологість повітря, ступінь подрібнення сировини та механічний знос компонентів обладнання. У зв'язку з цим система керування має швидко реагувати на збурення, динамічно коригуючи параметри подачі, щоб забезпечити однорідну масу.

Ще одним прикладом є процес дозування клею, що наноситься на край обгорткового паперу для фіксації сформованого тютюнового стрижня. Оскільки стрічка рухається з великою швидкістю, точність моменту нанесення клею і кількість речовини повинні бути синхронізовані з мілісекундною точністю. Надлишок клею спричиняє налипання та порушення механіки, тоді як його нестача призводить до відклеювання або нестійкості стрижня. Цей процес вимагає не лише високої точності регулювання подачі речовини, а й адаптації до зміни властивостей клею залежно від температури, в'язкості, тиску в системі подачі та умов навколишнього середовища.

Формування стрижня — ще один етап, де відбувається поєднання швидкоплинних процесів. Тут тютюн транспортується на стрічці у вигляді шару, що поступово згортається в циліндричну форму за допомогою напрямних, роликів або вакуумних елементів. У момент обгортання має відбутися точне нанесення клею, фіксація краю паперу, стабілізація тиску та положення сформованого циліндра. При цьому все відбувається без зупинки лінії, а система працює в неперервному потоці. Від найменших похибок у вирівнюванні стрічки або зміщення приводних елементів залежить геометрія стрижня та, відповідно, якість і ергономіка готової сигарети. Такі похибки автоматично фіксуються системами контролю, але їх усунення можливе лише за умови точного й швидкого регулювання.

Важливим швидкоплинним процесом є різання тютюнового стрижня, що вже має обгортку і сформовану структуру. Ніж, встановлений на обертовому механізмі, виконує зрізи через строго визначені інтервали часу. В реальних умовах частота різання досягає десятків тисяч зрізів за годину, а точність розташування місця зрізу визначає довжину готової сигарети. Відхилення в синхронізації руху стрічки і ножа можуть призвести до різання «внахлест» або навпаки, з утворенням зазорів. Система керування повинна синхронізувати кілька приводів і сенсорів, враховуючи інерцію рухомих частин та зміну навантаження, щоб підтримувати стабільність цього процесу.

Контроль якості продукції, попри завершальний характер, теж відноситься до швидкоплинних процесів. Оптичні та лазерні датчики [15], а також високошвидкісні відеокамери, встановлені безпосередньо на виході лінії, виконують оцінку геометричних параметрів, наявності клею, правильності закрутки, рівномірності забивання тютюном та інших параметрів. За частки секунди система має розпізнати відхилення, класифікувати дефект, подати сигнал на видалення зіпсованої одиниці продукції з потоку та коригувати параметри подачі або позиціонування для запобігання подальшим відхиленням. Інтенсивність обробки даних в цьому випадку є вкрай високою, що потребує ефективних обчислювальних засобів та швидкодіяних інтерфейсів між контролерами, сенсорами і приводами.

Особливістю всіх зазначених процесів є їх взаємозалежність: кожен наступний етап залежить від коректного виконання попереднього, а будь-яка затримка або збій у роботі одного вузла автоматично відображається на всій лінії. Це формує необхідність в інтегрованому підході до керування, коли усі компоненти автоматизації працюють в єдиному інформаційному середовищі. У таких умовах важливими є не лише точність і швидкодія окремих вузлів, а й загальна стабільність, адаптивність та здатність системи до самодіагностики й відновлення після збоїв.

Усі ці аспекти підкреслюють критичну роль систем автоматизації у швидкоплинних процесах. Вони забезпечують не лише стабільність виробництва, але й конкурентоспроможність підприємства, оскільки дають змогу знизити кількість браку, скоротити втрати сировини та підвищити продуктивність. Тому розробка ефективних методів керування саме такими процесами у виробництві сигарет має ключове значення як з технічної, так і з економічної точки зору. З табл. 2.3 видно, типові порушення технологічного процесу та їх наслідки у виробництві сигарет.

Таблиця 1.1 - Типові порушення технологічного процесу та їх наслідки у виробництві сигарет.

Порушення	Ймовірна причина	Наслідки для продукції	Методи усунення
Нерівномірна подача тютюну	Зношення або засмічення подаючого транспортера	Нестабільна щільність стрижня, зниження якості	Очищення або заміна механізму подачі
Затримка нанесення клею	Порушення у подачі клею або програмна затримка	Погане склеювання паперу, розсипання стрижня	Перевірка клапанів дозування та ПЛК
Зміщення тютюнової стрічки	Механічна вібрація або зсув напрямного ролика	Нерівномірне розміщення тютюну, дефекти	Вирівнювання напрямного механізму
Нестабільна швидкість різання	Коливання обертів ножового блока	Нерівна довжина сигарет, відходи	Налаштування ПД регулятора приводу
Відхилення довжини фільтра	Збій у фільтроподавачі або сенсори контролю	Невідповідність стандарту продукції	Повторне калібрування механізму фільтрування
Відсутність стрічки	Розрив або відсутність сировини	Зупинка лінії, простої	Автоматичне виявлення та сигналізація

1.3 Методи та засоби автоматизації в інерційних технологічних системах

Сучасне виробництво, особливо таке динамічне й технічно складне, як виготовлення сигарет, ґрунтується на гнучких і надійних системах автоматичного регулювання. У таких системах ключову роль відіграють методи та засоби автоматизації, здатні ефективно функціонувати в умовах, коли об'єкт має яскраво виражені інерційні властивості. Інерційність у даному контексті

слід розуміти як затримку між поданим керуючим впливом і фактичною реакцією об'єкта. У швидкоплинних виробничих процесах така інерційність, навіть мінімальна, суттєво впливає на стабільність, точність і якість регулювання.

У випадку виробництва сигарет інерційність проявляється в різних формах: механічній, тепловій, пневматичній, а також інформаційній. Наприклад, у момент подачі тютюну у формувальний блок затримка між зміною швидкості подачі та відгуком системи може становити частки секунди. Проте навіть такий інтервал здатен призвести до нерівномірності шару тютюну, а отже — до браку готової продукції. Саме тому методи керування повинні враховувати не лише поточні значення технологічних параметрів, а й їхню динаміку, прогнозувати поведінку системи у відповідь на збурення і зміну режиму роботи.

На практиці найбільш поширеними підходами до керування інерційними об'єктами є використання регуляторів з негативним зворотним зв'язком, які дозволяють стабілізувати процес, не допускаючи значних відхилень від заданих параметрів. Такі системи мають здатність самотійно компенсувати вплив внутрішніх і зовнішніх збурень, зокрема змін властивостей сировини, навантаження, температури чи тиску. Основна мета при цьому — забезпечити мінімальну помилку регулювання при максимальній швидкодії без перевищення стабільної амплітуди коливань.

У технічному плані реалізація подібних систем найчастіше базується на програмованих логічних контролерах (ПЛК), які виступають центральною ланкою управління всім виробничим процесом. Вони виконують обробку даних від численних датчиків, приймають рішення на основі алгоритмів керування і формують керуючі сигнали для виконавчих механізмів. У випадку швидкоплинних і інерційних процесів, таких як подача тютюну або обгортання стрижня, ПЛК повинен мати достатню обчислювальну потужність, щоб в реальному часі опрацьовувати сигнали високої частоти, синхронізувати дії

декількох приводів і контролювати параметри, які змінюються на мілісекундному рівні.

Контролери, що використовуються для подібних цілей, повинні підтримувати реалізацію адаптивних або ПД-алгоритмів, які дозволяють коригувати поведінку системи залежно від змін вхідних впливів або відхилень від норми. Такі алгоритми забезпечують баланс між швидкістю реакції системи і її стабільністю. При правильному налаштуванні вони дозволяють мінімізувати перерегулювання, що критично важливо у випадках, коли відгук системи має чітко відповідати заданому профілю керування. У технологічних лініях з високим ступенем інерційності ПД-регулятори дозволяють не тільки згладжувати різкі зміни параметрів, а й попереджати накопичення похибки, що особливо важливо при тривалих циклах стабільного виробництва.

Окрему роль у системах автоматизації відіграють сенсорні компоненти, адже саме вони забезпечують зворотний зв'язок, без якого неможливе ефективне регулювання інерційних процесів. У виробництві сигарет використовуються датчики тиску, положення, швидкості, температури, зусилля та оптичні сенсори для виявлення розривів стрічки, нерівномірностей подачі тютюну або зміщення фільтра. Надійність і точність цих елементів безпосередньо впливають на здатність системи виявляти зміну стану об'єкта на ранній стадії і миттєво реагувати на неї. Важливо, щоб сенсори були сумісні з частотно-регульованими приводами і мали малий час відгуку.

Особливої уваги вимагають привідні системи, які, у свою чергу, реалізують безпосередню дію на об'єкт керування. У швидкоплинних технологічних лініях, таких як тютюнові, приводи мають бути високоточними, динамічними і здатними до плавного регулювання швидкості. Сервоприводи з векторним керуванням або синхронні електродвигуни постійного струму найкраще підходять для цих завдань, оскільки вони поєднують швидкодію з високим моментом і здатністю працювати у режимі з частими пусками та зупинками. Окрім того, сучасні приводи інтегруються з контролерами за

допомогою промислових мереж, що забезпечує мінімальні затримки у передачі даних і підвищену надійність у роботі.

Значна увага в таких системах приділяється способу формування керуючих сигналів. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) є ефективним способом керування електродвигунами та іншими виконавчими механізмами. Вона дозволяє плавно змінювати рівень потужності, що подається на привід, тим самим забезпечуючи точне регулювання положення або швидкості руху. У поєднанні з ПІД-алгоритмами ШІМ забезпечує гнучке управління навіть у складних динамічних умовах. Наприклад, при раптовому зменшенні навантаження система може зменшити ширину імпульсів і, відповідно, знизити вихідну потужність без ривків або коливань у русі механізмів.

Для того щоб система залишалась стабільною в умовах змін навколишнього середовища або властивостей сировини, часто застосовуються адаптивні алгоритми, які дозволяють автоматично змінювати параметри регулятора. У деяких випадках доцільно реалізувати моделі прогнозування на основі поточних і минулих значень параметрів. Такі моделі використовуються в ПЛК із розширеною функціональністю або в зовнішніх мікроконтролерах, інтегрованих у систему управління.

Не менш важливим є інтерфейс взаємодії людини з машиною. Оператор має змогу у реальному часі спостерігати за ключовими параметрами процесу, отримувати повідомлення про збої, візуалізувати поточний стан об'єкта. Саме на цьому етапі системи візуалізації, такі як SCADA або вбудовані панелі HMI, дозволяють підвищити гнучкість керування і зменшити час реагування на позаштатні ситуації. Завдяки інтеграції із системою зворотного зв'язку вони можуть автоматично формувати пропозиції щодо коригування режимів роботи.

Побудова систем автоматичного регулювання для інерційних об'єктів ґрунтується на ретельному врахуванні властивостей об'єкта керування, зокрема інерційності, запізнення, динамічного діапазону і впливу зовнішніх збурень. У виробництві сигарет типовим прикладом інерційного об'єкта є система подачі

тютюнової стрічки. Навіть незначне коливання швидкості приводу або зміна натягу стрічки можуть призвести до порушення геометрії формованого стрижня, що у свою чергу негативно позначається на якості готової продукції. Тому система регулювання повинна не лише реагувати на поточні зміни, а й забезпечувати прогнозовану стабілізацію параметрів.

Основою для таких систем є ПІД-регулятори, які дозволяють формувати сигнал управління з урахуванням пропорційної, інтегральної та диференційної складової. Пропорційна частина дозволяє швидко зреагувати на зміну, інтегральна — усуває залишкову похибку, а диференційна — згладжує перехідний процес. У деяких випадках, коли важливо зменшити запізнення і уникнути коливань, використовується лише ПІ або навіть П-регулятор. Вибір структури регулятора залежить від вимог до точності, швидкодії та стійкості системи.

Інерційні процеси мають тенденцію до повільного реагування на зміну вхідних сигналів, тому важливо здійснювати їх точне моделювання ще на етапі проєктування системи. Як правило, використовуються моделі, що описуються передавальними функціями з інерційними ланками першого або другого порядку. Наприклад, система подачі тютюнової стрічки може бути змодельована як об'єкт з одним або двома часовими сталими, що дозволяє підібрати параметри регулятора для забезпечення мінімального перерегулювання та швидкого виходу на встановлений режим.

У реальних умовах промислового середовища до систем керування додаються фільтри, які забезпечують пригнічення високочастотних перешкод і помилкових спрацювань сенсорів. Важливо, щоб ці фільтри не погіршували динаміку системи, тому часто застосовуються адаптивні цифрові фільтри низьких порядків, які реалізуються безпосередньо в мікропроцесорних засобах або програмно на ПЛК.

У межах автоматизації виробництва сигарет інтеграція елементів регулювання, датчиків, виконавчих механізмів [7] і програмованих контролерів

здійснюється через промислові протоколи обміну даними, зокрема MODBUS, PROFINET або EtherCAT. Завдяки цьому забезпечується надійна передача команд і даних, синхронізація дій усіх компонентів системи та централізоване управління всіма вузлами технологічної лінії.

Реалізація автоматизованого керування також потребує впровадження алгоритмів виявлення і обробки відхилень від нормального режиму. Наприклад, при раптовій зміні механічного опору руху тютюнової стрічки система повинна не лише зменшити швидкість, але й зупинити лінію, якщо відхилення перевищують допустимі межі. Це запобігає пошкодженню обладнання та знижує витрати на сировину.

1.4 Обґрунтування вибору технологічного процесу для автоматизації

У процесі виробництва сигарет існує велика кількість технологічних операцій, які виконуються з високою швидкістю та вимагають високої точності. Усі ці операції умовно поділяються на групи відповідно до етапів виробництва: підготовка тютюну, формування стрижня, накладення обгортки, нанесення клею, фільтрування, різання, маркування та пакування. Кожен з етапів має свій власний рівень технологічної складності та динамічні характеристики, але не всі вони однаково чутливі до незначних відхилень, що виникають унаслідок збурень чи неточностей обладнання. У цьому контексті надзвичайно важливо провести порівняльний аналіз з точки зору технічної доцільності автоматизації конкретного процесу.

Процеси дозування клею, формування стрижня або пакування мають значну інерційність, але зазвичай оснащені добре відпрацьованими механічними модулями, які демонструють стабільну роботу. Натомість процес подачі тютюнової стрічки, попри його уявну простоту, є критично важливим і найбільш чутливим до нестабільності. У цьому процесі навіть невелика зміна швидкості чи натягу стрічки може призвести до деформації стрижня,

порушення геометрії виробу та зниження загальної якості продукції. Саме тому забезпечення сталої, рівномірної подачі тютюнової стрічки є однією з найважливіших задач автоматизації всієї виробничої лінії.

Перевага автоматизації саме цього етапу полягає в тому, що процес подачі тютюнової стрічки має безперервний характер, а отже, добре піддається побудові системи автоматичного регулювання. Динаміка об'єкта відносно передбачувана, а вплив зовнішніх збурень (наприклад, коливання опору стрічки, зміна маси або злипання тютюну) можна зафіксувати відповідними датчиками і компенсувати через регулятор швидкості або положення. Відтак, впровадження системи ПД-регулювання з відповідними датчиками положення і швидкості дозволяє оперативно реагувати на найменші відхилення, підтримуючи стабільність подачі, що безпосередньо впливає на геометрію сигарети.

Окрім того, саме процес вирівнювання стрічки дає можливість реалізувати алгоритми прогнозування або адаптивного регулювання, зважаючи на історію зміни параметрів. У разі розширення або оновлення виробничої лінії система автоматичного регулювання може бути масштабована або адаптована під нові вимоги без потреби кардинальної реконструкції всієї машини. Це забезпечує гнучкість виробництва, що є суттєвим у контексті сучасних тенденцій адаптивної автоматизації.

Практика показує, що при модернізації тютюнових фабрик в Україні та за кордоном значна частка уваги приділяється саме контролю та стабілізації стрічкового процесу. Наприклад, на підприємствах концерну Philip Morris та British American Tobacco було реалізовано кілька проєктів, де використання оптичних датчиків положення в поєднанні з серводвигунами дозволило значно зменшити відсоток бракованих виробів і підвищити швидкість формування стрижня до понад 8000 сигарет на хвилину. Це свідчить про високу ефективність саме таких автоматизованих рішень.

Таким чином, об'єктивний аналіз показує, що автоматизація процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки є технічно обґрунтованим та економічно доцільним кроком. З урахуванням його критичного впливу на подальші етапи виробництва, а також можливостей для впровадження сучасних сенсорних, приводних і керуючих систем, цей процес є найбільш придатним для подальшого дослідження та розробки системи автоматичного керування в межах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Технологічна суть процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки

У сучасному сигаретному виробництві подача та формування тютюнової стрічки є критично важливим процесом, від якого залежить однорідність продукції, стабільність маси стрижня та загальна якість сигарети. Цей етап реалізується на формуючому блоці, що є центральним елементом у структурі виробничої машини. Його завдання полягає у безперервному перетворенні сипучого тютюнового матеріалу у стрічку з постійною щільністю, шириною та товщиною, яка згодом загортається в обгортковий папір для утворення тютюнового стрижня. Великогабаритні машини для обробки тютюнової стрічки (HT/SH) показано на рис.2.1.

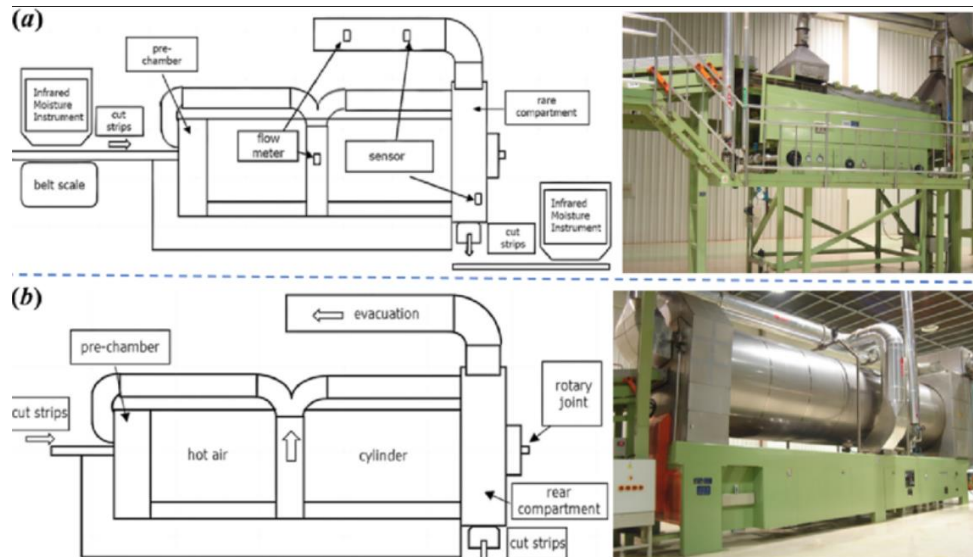


Рисунок 2.1 - Великогабаритні машини для обробки тютюнової стрічки (HT/SH)

Процес починається з надходження підготовленого тютюну до механізмів подачі, які забезпечують регульований і рівномірний потік сировини. У

конструкції подаючого механізму використовуються шнеки та живильники [12-13], що обертаються з оптимізованою швидкістю, завдяки чому тютюн поступово й дозовано транспортується в напрямку формуючої зони. Шнеки дозволяють контролювати об'ємний потік за рахунок зміни частоти обертання, а живильники підтримують стабільність подачі завдяки адаптивному регулюванню. Рис 2.2. ілюструє шнековий живильник.

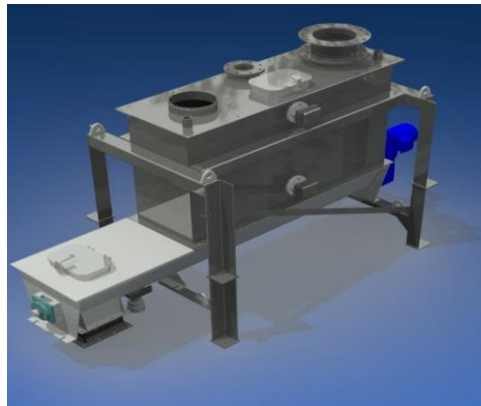


Рисунок 2.2 - Шнековий живильник (шнековий транспортер)

Однією з ключових технологій, що застосовується на цьому етапі, є пневмоподача. Вона використовується для перенесення тютюну повітряним потоком, що дозволяє досягати високої швидкості транспортування без механічного пошкодження сировини. Пневматична система подачі, обладнана регульованими соплами та повітряними каналами, забезпечує рівномірне осідання тютюну на рухомій транспортерній стрічці. Особлива увага приділяється стабільності тиску в повітропроводах, адже навіть незначні коливання можуть призвести до порушення рівномірності формування стрічки.

Після етапу пневмоподачі тютюн потрапляє у вирівнювальні механізми, функція яких полягає у знятті надлишків сировини та корекції товщини шару. Це досягається шляхом встановлення обертових валиків, скребків або вакуумних камер, які формують рівномірний профіль тютюнової стрічки. Контроль маси та геометрії стрічки здійснюється в реальному часі за допомогою оптичних або лазерних датчиків, що зчитують профіль та щільність

матеріалу. Дані сенсорів передаються до контролера, який в режимі реального часу коригує роботу подаючих пристроїв або системи пневмоподачі.

Стабільність подачі тютюнової стрічки є визначальним фактором якості сигаретного стрижня. Навіть незначні коливання у товщині або щільності стрічки призводять до нерівномірного заповнення обгорткового паперу, що, в свою чергу, впливає на щільність сигарети, її міцність та характеристики згоряння. У разі порушення стабільності подачі можуть спостерігатися дефекти, такі як порожнини, грудки, нерівномірна щільність, що знижує товарний вигляд продукції та ускладнює подальший процес пакування.

Устаткування, яке бере участь у формуванні тютюнової стрічки, повинно відповідати високим вимогам щодо надійності, точності та швидкодії. Основна складність полягає у необхідності забезпечення постійного режиму роботи при великій швидкості технологічного процесу. У типових сигаретних лініях швидкість виробництва може досягати 8000–12000 сигарет за хвилину, що потребує надзвичайно чутливої системи керування. Блокова схема процесу формування сигаретної стрічки показана на рис 2.3.

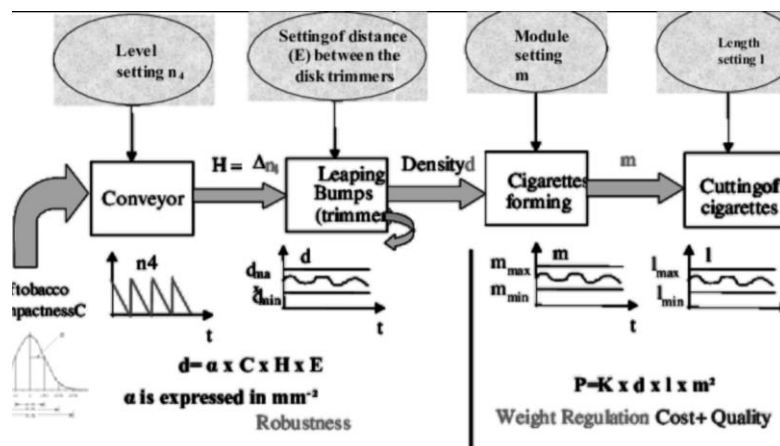


Рисунок 2.3 - Блокова схема процесу формування сигаретної стрічки

Ще однією важливою складовою процесу є система стабілізації форми та геометрії тютюнової стрічки безпосередньо перед її загортанням у папір. Цей етап включає додаткове вирівнювання за допомогою вакуумних каналів, які

втримують тютюнову масу у чітко визначеній формі. Завдяки цим заходам досягається відповідність розмірів та маси сигарет встановленим стандартам. Контроль рівномірності відбувається за допомогою масових датчиків, які вимірюють лінійну масу стрічки. У разі виявлення відхилень система автоматично регулює швидкість подачі тютюну або інтенсивність відсмоктування у вакуумній частині формуючого блока.

Принцип роботи формуючого блока базується на поєднанні механічних і пневматичних технологій. Спочатку транспортувальна система переносить сипучий тютюн у бункер, з якого живильники подають його на рухому стрічку. Далі через систему направляючих і вирівнювальних елементів формується попередня стрічка. Завдяки вакууму, створюваному під стрічкою, забезпечується стабільне притискання шару тютюну, що сприяє збереженню чіткої геометрії. Надлишки знімаються спеціальними ножами або заслінками, які можуть мати електричне або пневматичне регулювання. На рис 2.4. ілюстровано габаритний план шнекового транспортеру.

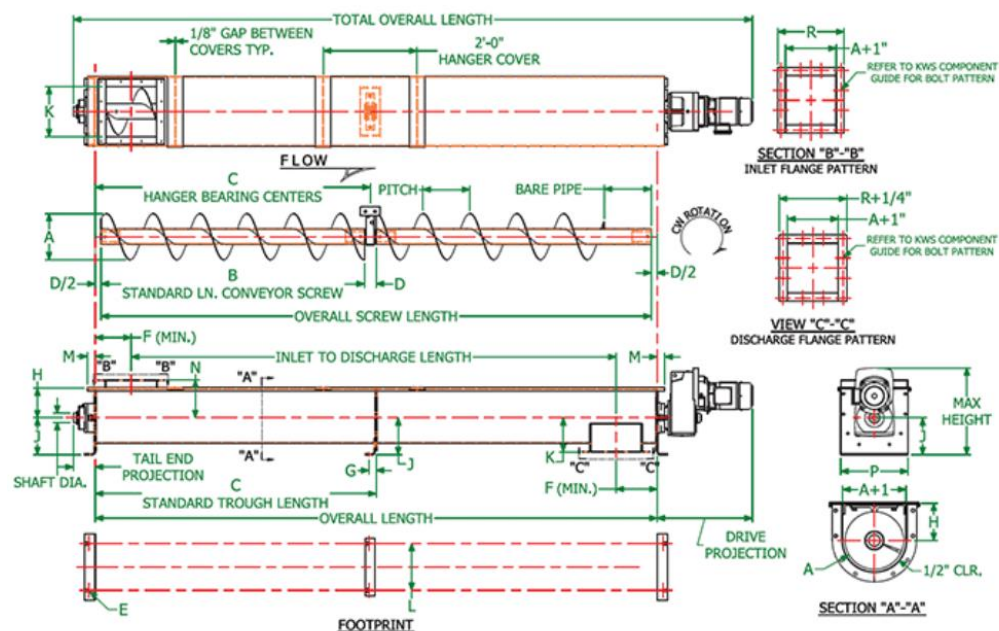


Рисунок 2.4 - Габаритний план шнекового транспортеру

Формуючий блок тісно взаємодіє з системою автоматичного регулювання, що ґрунтується на зворотному зв'язку. Основним параметром, який підлягає регулюванню, є маса одиниці довжини стрічки, що вимірюється онлайн за допомогою прецизійних сенсорів, наприклад, гамма-променевих або оптичних. Зчитана інформація надходить до контролера, який аналізує поточні значення і приймає рішення про зміну положення шибера, регулювання обертів живильника або потужності вакууму. Це дозволяє підтримувати оптимальні значення у процесі навіть за зміни умов подачі тютюну або його фізичних характеристик. Рис. 2.5. ілюструє лінію виробництва сировинного тютюнового листа.

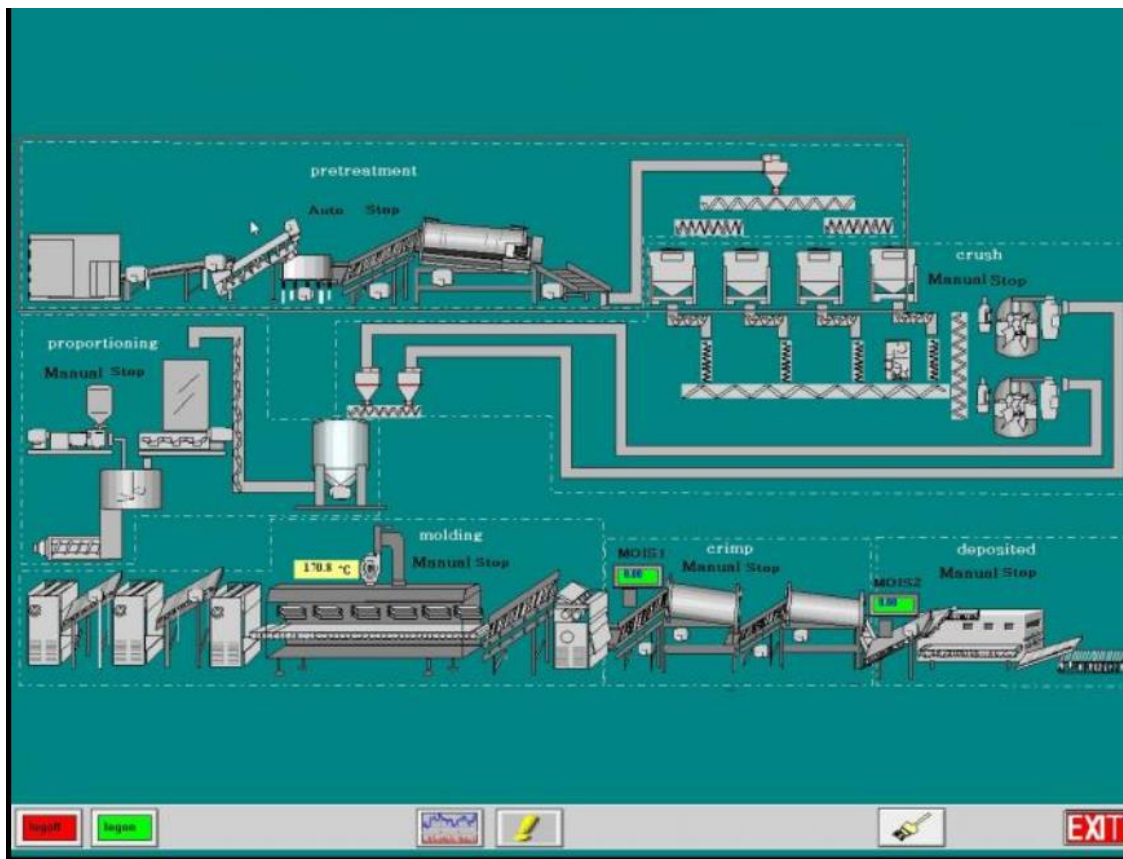


Рисунок 2.5 - Лінія виробництва сировинного тютюнового листа

Одним із найважливіших чинників, що впливають на ефективність і точність формування стрічки, є взаємодія усіх механізмів у режимі реального

часу. Враховуючи високу інерційність окремих частин системи (особливо при зміні режимів роботи), використовуються алгоритми попереднього прогнозування, зокрема ПД-регулятори з адаптивним налаштуванням параметрів. Це дозволяє уникати перерегулювань, перевищення або недоподачі тютюну, що є критичним для продуктивності лінії. На рис 2.6. видно, схему формування і обрізки тютюнового шару.

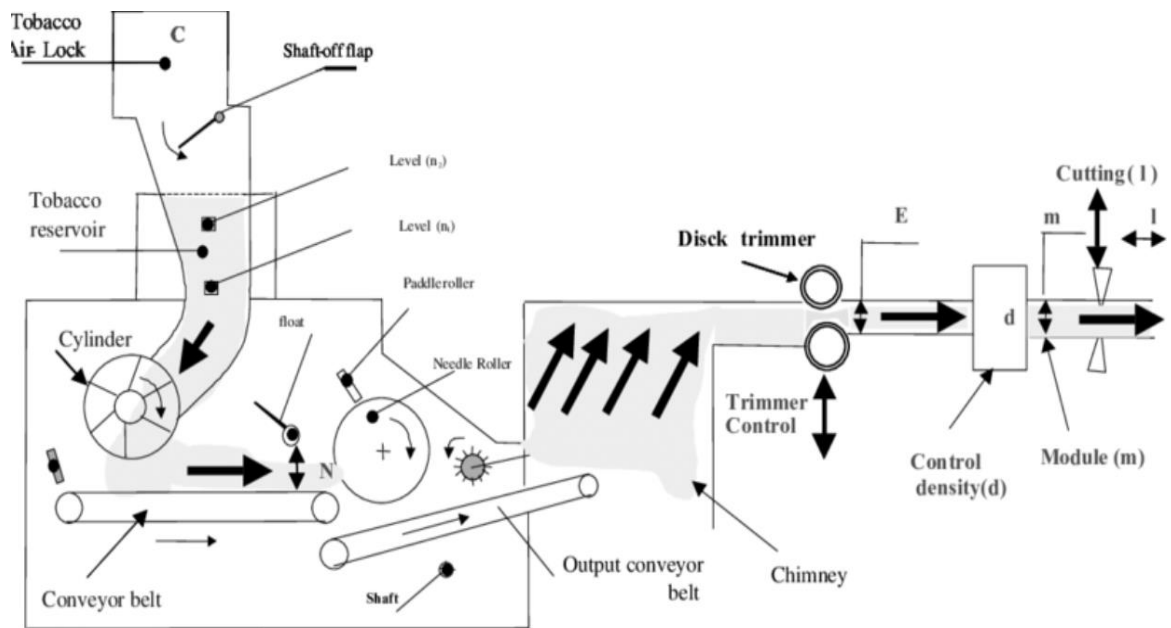


Рисунок 2.6 - Схема формування і обрізки тютюнового шару

Вирівнювання стрічки також має вирішальне значення для подальших етапів обгортання та різання сигарет. Будь-яке відхилення від норми тягне за собою погіршення точності різача, що веде до збільшення кількості браку. Тому кінцевий етап вирівнювання зазвичай супроводжується візуальним або цифровим контролем за допомогою високошвидкісних камер або сенсорів кольору, які аналізують рівномірність заповнення паперу до його остаточного загортання. Приклад схеми формуючого блоку подано на рис. 2.7.

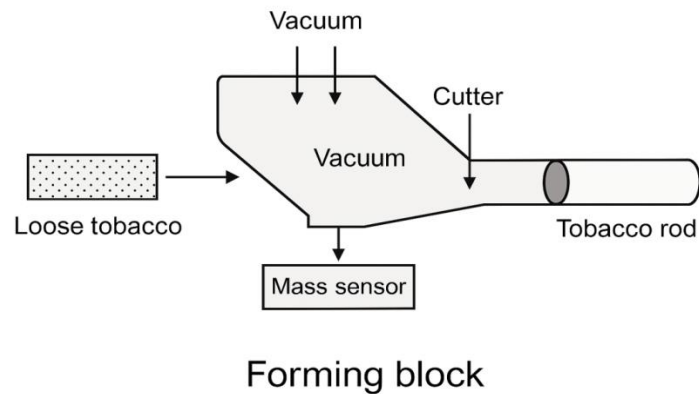


Рисунок 2.7 - Схема формуючого блока

У підсумку, процес подачі та вирівнювання тютюнової стрічки є одним із найбільш відповідальних у виробництві сигарет. Його реалізація потребує точного механічного налаштування, стабільної автоматичної системи регулювання, надійної сенсорики та ефективного контролю якості. Порушення стабільності на цьому етапі неодмінно призводять до зниження загальної якості продукції, збільшення кількості відходів та зменшення рентабельності виробництва.

2.2 Огляд типових порушень і нестабільностей у процесі та їх наслідки

Процес подачі та вирівнювання тютюнової стрічки у виробництві сигарет є надзвичайно динамічним і чутливим до впливу навіть незначних зовнішніх або внутрішніх факторів. Будь-які технологічні порушення, які виникають на цій ділянці, можуть суттєво вплинути на якість кінцевого продукту, стабільність роботи машин, а також викликати економічні втрати через зупинки, переробки [10] або відбраковану продукцію. Для забезпечення високого рівня надійності функціонування формуючого блоку необхідно глибоко аналізувати характерні нестабільності, що виникають у процесі, їхню природу, а також способи виявлення і подолання.

Із найпоширеніших типів відхилень є коливання щільності тютюнової стрічки. У більшості випадків це пов'язано з нерівномірною подачею тютюнової сировини до формуючого блока. Якщо швидкість подачі змінюється внаслідок механічних збоїв або коливань продуктивності живильних елементів, утворюється стрічка зі змінною масою на одиницю довжини. Це може призвести до формування сигарет із відмінною щільністю набивки, що, у свою чергу, впливає на швидкість тління, інтенсивність диму, смакові властивості й навіть безпеку споживання. Контроль щільності є критично важливим параметром як у процесі формування, так і під час фінального контролю якості.

Ще одним значущим порушенням є проскакування тютюнової стрічки. Це явище зазвичай спостерігається внаслідок поганого зчеплення стрічки з конвеєрною системою або порушень синхронізації між подаючими та формуючими механізмами. У випадку, якщо стрічка проскакує або рветься, виникають порожні ділянки, що призводить до нерівномірного формування стрижня. Це не лише погіршує естетичні й фізичні властивості сигарет, але й викликає зупинки автоматизованої лінії через необхідність ручного втручання.

Окрему увагу слід приділити ефекту переповнення подачі. Цей процес може бути викликаний накопиченням тютюну в зоні шнека або пневмопроводу внаслідок надмірного тиску подачі чи затримок у формуванні. При переповненні виникає підвищене стискання сировини, що призводить до її деформації, підвищеного навантаження на механізми, а також до закупорення каналів. Крім того, надлишкова маса тютюну спричиняє перерозподіл у щільності стрічки й порушує точність формування. У більшості випадків переповнення вимагає втручання оператора для очищення або перезапуску блоку.

Важливо також розглядати вібраційні впливи, які здатні змінювати стабільність подачі тютюнової стрічки. Джерелом вібрацій можуть бути як механічні несправності в приводах і підшипниках, так і неправильне балансування обертових частин. Наявність постійних або імпульсних вібрацій

спричиняє дестабілізацію тютюнового потоку, що проявляється у формі несиметричної стрічки, зміщення її положення, коливань у щільності та порушення точності подальшого нарізання. Крім того, вібрації можуть посилювати зношування вузлів і приводити до прискореного виходу з ладу окремих елементів.

З технологічної точки зору, усі вищезгадані порушення мають спільну характеристику – вони генерують змінні параметри, що негативно впливають на стабільність процесу і якість кінцевої продукції. Це можуть бути амплітудні коливання маси стрічки, фазові зсуви в роботі механізмів або температурні відхилення у зонах подачі. Наявність нестабільних або неадекватно керованих параметрів створює умови для формування сигарет з дефектами, що неприпустимо в умовах високої конкуренції та підвищених вимог до стандартів якості.

Порушення в системі можуть виникати як через апаратні несправності (зношення деталей, недосконала конструкція окремих вузлів, збої у приводах), так і через зовнішні фактори – зміна вологості тютюну, вплив температурного середовища, вібрації від сусідніх машин або похибки у програмному забезпеченні. Такі мультифакторні впливи створюють складну картину взаємозалежностей, яку необхідно враховувати при розробці систем автоматичного керування.

Виявлення й діагностика типових нестабільностей повинні бути інтегровані в загальну архітектуру контролю процесу. В умовах сучасного виробництва ефективним підходом є використання систем збору й аналізу даних, які в реальному часі відстежують параметри подачі, вібрації, швидкість руху стрічки, густину сировини. За допомогою сенсорики й обробки сигналів можна своєчасно виявити початок відхилення й адаптувати керуючі сигнали так, щоб запобігти погіршенню ситуації або автоматично здійснити компенсаційні дії.

І ще одним важливим аспектом у контексті порушень є тимчасові збої або мікрозупинки подачі, які можуть бути спричинені програмними помилками в логіці керування, затримками в сигнальному обміні між сенсорами і контролером або перебоями в електроживленні приводів. Навіть мілісекундні затримки у процесі подачі тютюну викликають порушення рівномірності стрічки, що особливо критично на великих швидкостях роботи машини (до 8000 сигарет за хвилину). У таких умовах навіть короткочасна нестабільність спричиняє цілий ланцюг похибок: від порушення вирівнювання до втрати синхронізації з нарізною машиною. На рис. 2.8. показано лазерний або оптичний датчик положення/контролю якості.

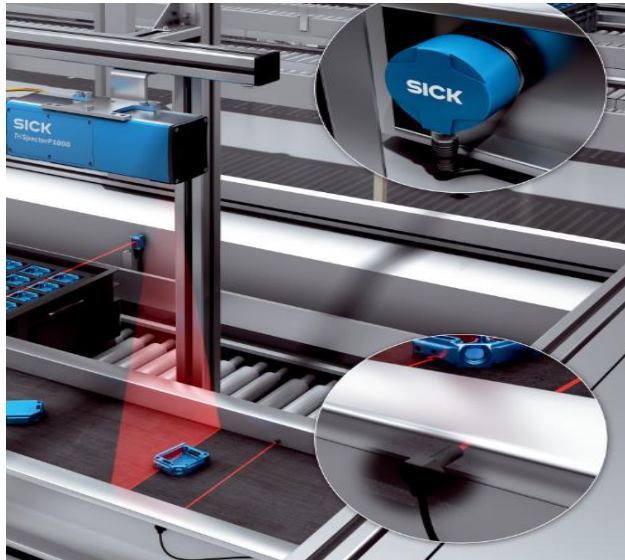


Рисунок 2.8 - Лазерний або оптичний датчик положення/контролю якості

Крім того, слід зважати на «довгострокові накопичувальні ефекти нестабільності». Якщо система не має ефективного моніторингу та регулювання параметрів подачі, дрібні коливання можуть акумулюватися й призводити до систематичного зміщення середніх значень (дрейфу) маси стрічки, температурного режиму або навантаження на механізми. Такий дрейф спричиняє поступове погіршення якості продукції, яке складно помітити в

реальному часі, але яке негативно впливає на статистичні показники партії продукції, збільшуючи частку дефектних виробів.

Наслідки цих порушень проявляються не лише у фізичній якості сигарет, а й у параметрах процесу пакування та транспортування. Наприклад, сигарети з надлишковою щільністю часто ламаються при автоматичному пакуванні або погано укладаються в пачку. Нерівномірна набивка викликає проблеми з вакуумним захватом і транспортуванням на наступних етапах. Такі порушення погіршують експлуатаційну ефективність усієї виробничої лінії та знижують загальну рентабельність.

З технічної точки зору, системи автоматизації [3] мають бути спроектовані так, щоб оперативно виявляти та компенсувати згадані збої. Наприклад, при виявленні аномального прискорення подачі стрічки контролер може автоматично зменшити оберти подаючого шнека, або в разі вібрацій — передати сигнал на частотний перетворювач для динамічного згладжування коливань. Такі реактивні стратегії вимагають наявності високоякісних сенсорів, швидкодіючих актуаторів та адаптивної логіки в програмному забезпеченні.

Також варто зазначити, що причини нестабільності можуть бути комплексними. Наприклад, коливання щільності стрічки можуть бути спричинені одночасно вологістю тютюну, зношенням лопатей подачі та розбалансуванням живильного мотора. Для виявлення таких взаємопов'язаних проблем необхідне використання методів багатоканального аналізу даних та машинного навчання, що дозволяє розрізняти першопричини і вторинні ефекти.

У підсумку, якість процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки визначає загальну якість готового продукту, і тому виявлення, аналіз і усунення типових нестабільностей має бути інтегрованою частиною всієї системи керування виробничою лінією. Завдяки застосуванню сучасних засобів автоматизації, включаючи ПЛК, сенсори, частотні приводи, ШІ-алгоритми та системи технічного зору, можливо досягти суттєвого зниження частоти виникнення порушень, підвищити стабільність процесу та забезпечити

відповідність кінцевої продукції встановленим стандартам. Типові порушення у процесі подачі тютюнової стрічки та їх наслідки подано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 -Типові порушення у процесі подачі тютюнової стрічки та їх наслідки

№	Тип порушення	Причина виникнення	Вияв у процесі	Наслідки для готової продукції
1	Коливання щільності стрічки	Нерівномірна подача тютюну, зміна вологості	Періодичне збільшення/зменшення маси	Порушення смаку, труднощі при затягуванні
2	Проскакування або затримка стрічки	Механічний знос шнека, збій у частотному приводі	Раптова втрата подачі	Утворення порожнин у сигареті, обрив обгортки
3	Надлишкове накопичення тютюну	Неправильне дозування або повільне транспортування	Збільшення об'єму стрічки	Сигарети надмірно щільні або деформовані
4	Вібрації механізмів подачі	Дисбаланс у валах, резонанс, погане кріплення	Механічні коливання, нерівномірна подача	Зниження точності вирівнювання, дефекти стрижня
5	Температурні коливання	Перевантаження приводу, перегрів системи	Зміна характеристик електроприводів	Нестабільність подачі, дрейф у параметрах
6	Несвоєчасна компенсація збурень	Недостатня швидкодія ПЛК, затримки в сенсорах	Повільна реакція на зміни умов	Запізніле вирівнювання, накопичення похибок

2.3 Функціональна структура об'єкта керування

Функціональна структура об'єкта керування у контексті подачі та вирівнювання тютюнової стрічки являє собою системне уявлення

технологічного процесу з точки зору автоматизації. Вона дозволяє чітко ідентифікувати параметри, які підлягають вимірюванню, зміні або впливу, а також ті зовнішні чинники, що можуть викликати нестабільність або збурення. Такий підхід є фундаментальним для розробки ефективної системи керування, яка забезпечить не тільки точність регулювання, але й адаптивність до змін умов роботи.

Основною метою формування функціональної структури є відображення динамічних взаємозв'язків між вхідними впливами, керованими сигналами, процесами усередині об'єкта та вихідними результатами, які піддаються контролю. У випадку з процесом подачі тютюнової стрічки це означає необхідність точного контролю за витратою тютюну, стабільністю швидкості стрічки, її рівномірністю та щільністю. Складність полягає в тому, що процес є швидкоплинним та інерційним, тобто має обмеження за часом реакції, затримки у системі, а також фізичні межі регулювання.

З точки зору автоматизованої системи керування (АСК), формуючий блок і всі його допоміжні механізми є технічним об'єктом з конкретним набором вхідних і вихідних параметрів. Вхідними сигналами можуть бути як керуючі дії оператора або контролера (наприклад, команди запуску або коригування швидкості подачі), так і зовнішні збурення, зумовлені, наприклад, коливаннями напруги, зміною властивостей тютюну чи механічними коливаннями. Вихідними параметрами є ті характеристики, які безпосередньо впливають на якість сигарети – щільність стрічки, швидкість подачі, наявність провисання або напруження.

З функціонального погляду, всередині об'єкта існує набір фізичних параметрів, які можуть бути виміряні з допомогою відповідних сенсорів. До таких належать швидкість обертання подаючих валів, момент сили на приводі, густина тютюнового шару, напруга або струм у виконавчих механізмах, положення шнека або стрічки. Додатково система може спостерігати за

температурою приводів або датчиків, що забезпечує профілактику перегріву або зниження точності вимірювань.

На основі цих параметрів визначаються типові сигнали в системі. Керуючі сигнали формуються контролером на основі алгоритму регулювання і передаються на виконавчі елементи, наприклад, частотні перетворювачі або електроприводи, які впливають на швидкість подачі чи положення механізмів.

Один із ключових сенсорних елементів у системі подачі тютюнової стрічки — індукційний датчик положення [16], який дозволяє з високою точністю визначати наявність або положення рухомих частин механізмів, зокрема шиберів чи заслінок. Його безконтактна дія забезпечує надійність роботи в умовах запиленості та вібрацій, що характерні для тютюнового виробництва. Рис. 2.9. ілюструє індукційний датчик положення.

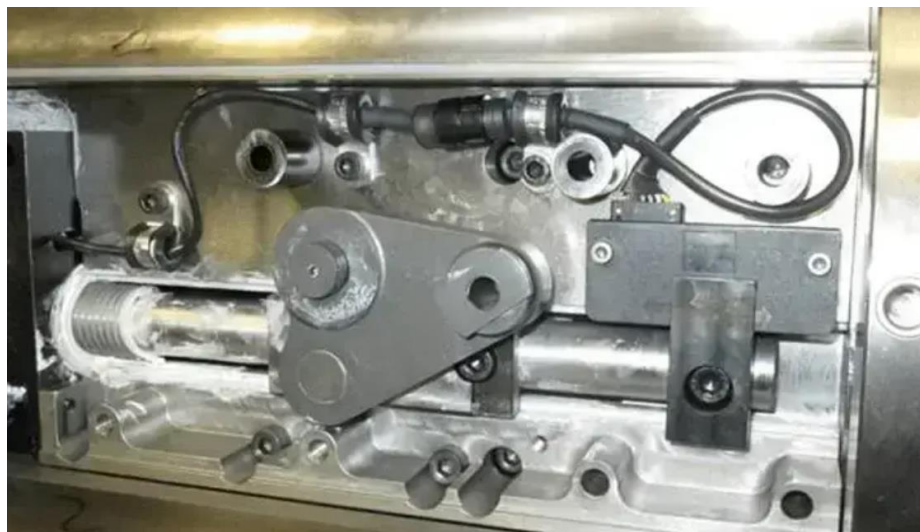


Рисунок 2.9 - Індукційний датчик положення

Вимірювані сигнали надходять від сенсорів, які відслідковують поточний стан процесу. Ці дані повертаються до контролера і дозволяють реалізувати принцип зворотного зв'язку, що є критично важливим у випадку швидкоплинних процесів. Нарешті, збурюючі сигнали – це випадкові або систематичні зміни в середовищі або у фізичних властивостях об'єкта, які не

можуть бути напряду контрольовані, але повинні бути враховані в алгоритмах керування.

Узагальнюючи, функціональна структура подачі та вирівнювання тютюнової стрічки може бути представлена у вигляді моделі «вхід – об’єкт – вихід». На вхід надходять сигнали від контролера або зовнішніх чинників, об’єкт (механізми подачі, вирівнювання, шнеки, приводи) здійснює фізичне перетворення, а на виході формується тютюнова стрічка з відповідними параметрами, які можна зафіксувати й проаналізувати. У цьому ланцюгу важливо забезпечити мінімальні втрати, зниження інерційності та стабільність регулювання, що й обумовлює необхідність автоматизації процесу на базі ПЛК і сенсорної системи.

Побудова функціональної структури об’єкта керування у виробництві сигарет — це не лише сукупність компонентів, а й динамічний процес постійного аналізу й корекції стану технологічного середовища. На етапі подачі та вирівнювання тютюнової стрічки, коли система працює у швидкоплинному режимі, зберігаючи при цьому високу точність, критичним стає баланс між фізичними параметрами, які можна виміряти, і тими, на які можна впливати через регулятори.

Система вимірювання фактично формує віддзеркалення процесу в інформаційному просторі керуючої частини. Наприклад, виявлення незначних змін у масі тютюну або зміщення стрічки дозволяє в реальному часі перебудовувати керуючий сигнал. У той час як фізичні виконавчі механізми — це руки системи, контролер є її мозком, що адаптує поведінку до умов, які змінюються із мілісекундною частотою. Затримки в передачі даних, помилки вимірювання або обмеження в частоті оновлення сигналів можуть спричинити нестабільність, яка передається на вихід і проявляється у вигляді дефектів кінцевої продукції.

Сигнали, які циркулюють між компонентами, розподіляються на три основні типи: ті, що надходять ззовні як завади чи збурення, ті, що генеруються

системою як реакція, і ті, що контролюються та керують виконавчими пристроями. Фізичні межі між цими типами сигналів часто стираються, особливо у випадку замкнених систем з адаптивними або самоналаштовуваними алгоритмами. Наприклад, натяг тютюнової стрічки, який залежить не тільки від механіки шнекового механізму, а й від змін у в'язкості повітряного потоку в пневмосистемі, стає одночасно і збуренням, і регульованою величиною.

Це приводить до важливого методологічного принципу: об'єкт керування не можна розглядати окремо від системи керування. Будь-який фізичний процес у сучасному виробництві є частиною кібер-фізичної системи, де інформаційні потоки мають таке ж значення, як і матеріальні. Навіть проста на вигляд операція вирівнювання тютюнової стрічки є результатом складної комунікації між алгоритмами, датчиками, приводами й механікою. Таке ускладнення вимагає не лише побудови класичної функціональної структури «вхід–об'єкт–вихід», а й урахування часових характеристик усіх її елементів: затримок, інерційності, нелінійностей. Приклад структурної схеми “вхід – об'єкт – вихід” подано на рис. 2.10.

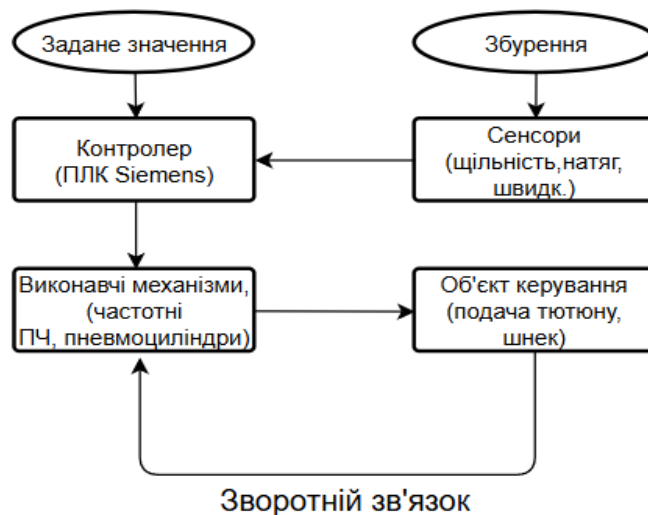


Рисунок 2.10 - Структурна схема “вхід – об’єкт – вихід”

У швидкоплинних процесах виробництва сигарет це особливо важливо. Наприклад, затримка реакції сервопривода на зміну положення стрічки навіть на кілька мілісекунд може призвести до формування нерівномірного шару, що в подальшому ускладнить стабільність горіння сигарети. В таких умовах системи мають бути надзвичайно чутливими до відхилень, а зворотній зв'язок — високодинамічним. Контролери повинні мати можливість не просто виконувати логіку, а й самостійно перебудовувати свій алгоритм у залежності від ситуації, в ідеалі — за допомогою інтелектуальних блоків або нейромережевих адаптивних моделей. На рис. 2.11. ілюстровано структурну схему керування процесом подачі тютюнової стрічки.

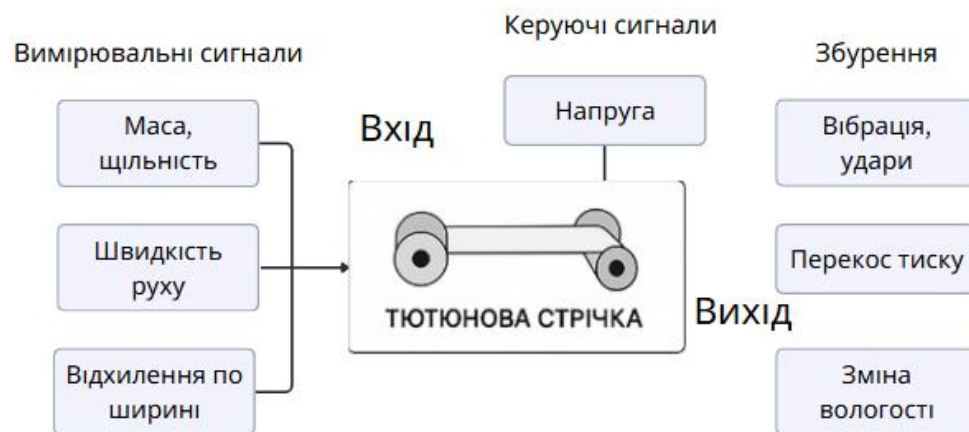


Рисунок 2.11 - Структурна схема керування процесом подачі тютюнової стрічки

Зміст функціональної структури тому переходить від статичного опису технічних компонентів до динамічного моделювання їх взаємодії. Усі елементи системи мають бути пов'язані в єдиний інформаційно-регулюючий контур, де процеси вимірювання, порівняння, керування та реалізації впливу є безперервними, логічно замкненими і часово узгодженими. Таблиця 2.2 демонструє характеристики сигналів та точок впливу в процесі подачі і вирівнювання тютюнової стрічки.

Таблиця 2.2 -Характеристики сигналів та точок впливу в процесі подачі і вирівнювання тютюнової стрічки.

№	Тип сигналу	Фізична природа	Джерело сигналу	Засіб впливу / обробки	Значення для процесу керування
1	Вимірювальний сигнал	Маса/щільність	Датчик маси, ваговий модуль	Подача/регулювання тютюну	Контроль рівномірності подачі тютюнової стрічки
2	Вимірювальний сигнал	Швидкість руху	Енкодер на валу подаючого ролика	Частотний перетворювач приводу	Стабілізація швидкості подачі стрічки
3	Вимірювальний сигнал	Відхилення по ширині	Візуальний сенсор / камера	Актюатор вирівнювального блоку	Автоматичне коригування положення стрічки
4	Керуючий сигнал	Напруга/ШІМ	ПЛК / контролер	Серводвигун/шнековий подавач	Регулювання інтенсивності подачі тютюну
5	Керуючий сигнал	Частота/напрямок	ПЛК / інвертор	Електропривод пневмосистеми	Контроль сили повітряної подачі
6	Збурення	Вібрації/удар	Вібросенсори або механіка	Немає прямого впливу	Може спричинити порушення стрічки, система має враховувати коливання
7	Збурення	Перепади тиску	Пневмолінія, компресор	Частотне регулювання компресора	Впливає на якість утримання тютюну повітрям
8	Збурення	Зміна вологості тютюну	Вологомір / лабораторна перевірка	Автоматичний режим компенсації	Змінює пружність і щільність стрічки, що впливає на стабільність

Функціональна структура об'єкта керування процесом подачі та вирівнювання тютюнової стрічки у сигаретному виробництві є складною інтеграцією інформаційних та фізичних компонентів. Вона включає сенсори, які реєструють ключові параметри процесу, контролер, що обробляє дані та формує керуючі впливи, а також виконавчі пристрої, які безпосередньо

реалізують регулювання. Важливим є не лише правильне структурне компонування цих елементів, а й урахування їхніх динамічних характеристик, що визначає ефективність у швидкоплинному виробничому середовищі.

Узагальнена модель «вхід–об’єкт–вихід» є основою побудови системи керування, але для сучасних умов її необхідно доповнювати механізмами адаптації, самодіагностики й відмовостійкості. Відтак, ефективне керування об’єктом можливе лише за умов точного вимірювання, швидкого реагування, гнучкого регулювання та високої інтегрованості всіх компонентів системи.

2.4 Особливості об’єкта з точки зору автоматизації

Технологічний процес подачі та вирівнювання тютюнової стрічки є складною динамічною системою з властивостями інерційності, високої швидкодії та нелінійної поведінки, що вимагає ретельного підходу до його автоматизації. Для забезпечення стабільної якості продукції важливо враховувати всі особливості об’єкта з позиції автоматичного керування, в тому числі його фізичну природу, поведінку в перехідних режимах, чутливість до збурень і здатність до компенсації відхилень через зворотний зв’язок.

Однією з ключових характеристик системи подачі тютюну є інерційність, тобто затримка між зміною керуючого сигналу (наприклад, частоти обертання приводу подачі) та реакцією об’єкта (зміною лінійної швидкості руху стрічки). Ця затримка обумовлюється механічною інерцією привідних валів, масою тютюну та моментами тертя в транспортуючих механізмах. Унаслідок цього швидкі зміни навантаження або параметрів системи можуть викликати короткочасні коливання швидкості або збої в рівномірності подачі.

Водночас система демонструє й високу швидкодію, оскільки має справу з великою кількістю матеріалу, що проходить через вузол подачі за одиницю часу. Порушення в керуванні, навіть короткочасні, одразу впливають на якість формування тютюнового стрижня, знижуючи однорідність щільності, маси або

ширини стрічки. Це особливо критично у високошвидкісних виробничих лініях, де час на корекцію параметрів є обмеженим.

Ще однією характерною особливістю є нелінійність об'єкта керування. Наприклад, залежність між напругою на приводі та фактичною швидкістю подачі не є строго лінійною через нелінійні властивості тертя, ковзання тютюну, зношування стрічки, а також зміну опору пневмосистеми за температури та вологості. В таких умовах використання простих моделей може бути недостатнім для точного регулювання. Це зумовлює необхідність застосування адаптивного регулювання або використання ПД-контролерів із попередньою лінеаризацією.

Зворотний зв'язок у таких системах реалізується на основі даних від сенсорів, що вимірюють швидкість руху, ширину тютюнової стрічки, її масу, а також відхилення від номінального положення. Завдяки цьому можливе оперативне коригування параметрів подачі, що дозволяє підтримувати стабільну роботу навіть при зміні вхідних умов – наприклад, вологості сировини або коливаннях у потоці тютюну на вході.

Одним із найбільш ефективних методів підтримання стабільної роботи механізмів подачі та вирівнювання тютюнової стрічки є використання ПД-регулювання. Пропорційно-інтегро-диференціальне керування дозволяє компенсувати вплив збурень, що виникають у технологічному середовищі, та оперативно коригувати відхилення параметрів стрічки від заданого режиму. Наприклад, якщо сенсори фіксують коливання ширини стрічки або зміни швидкості руху, ПД-регулятор може сформувати відповідний сигнал для зміни обертів приводу шнека, живильника або вакуумного транспортера.

Важливо зазначити, що налаштування параметрів ПД-регулятора має враховувати інерційність і затримку об'єкта. Неправильно підібрані коефіцієнти можуть призвести до автоколивань або нестійкої роботи системи. Тому на практиці застосовують модифіковані ПД-регулятори з обмеженням

інтегральної складової, функцією анти-windup, а також з урахуванням зовнішніх збурень (наприклад, зміни вологості або щільності тютюну).

У ряді технологічних вузлів, зокрема при пневмоподачі тютюну або у системах з великою інерційністю, ефективнішим виявляється логічне керування, засноване на умовах вмикання та вимикання механізмів або перемикання між режимами. Наприклад, логіка роботи пневмоподачі може передбачати короткочасне включення повітряного імпульсу при перевищенні порогового значення на масовому датчику або датчику положення стрічки. Таке керування просте у реалізації та добре підходить для дискретних задач, де не потрібна плавна регуляція.

Для реалізації як аналогового (ПД), так і дискретного (логічного) керування, на практиці зазвичай застосовуються програмовані логічні контролери (ПЛК), серед яких найпоширенішими у тютюновій промисловості є (Siemens S7-1200 та S7-1500). Ці контролери забезпечують необхідну швидкодію, можливість обробки аналогових і цифрових сигналів, а також підтримку сучасних протоколів обміну даними (Profinet, Profibus, OPC UA). Рис. 2.12. ілюструє структуру зв'язків між ПЛК Siemens, приводами, сенсорами та НМІ.

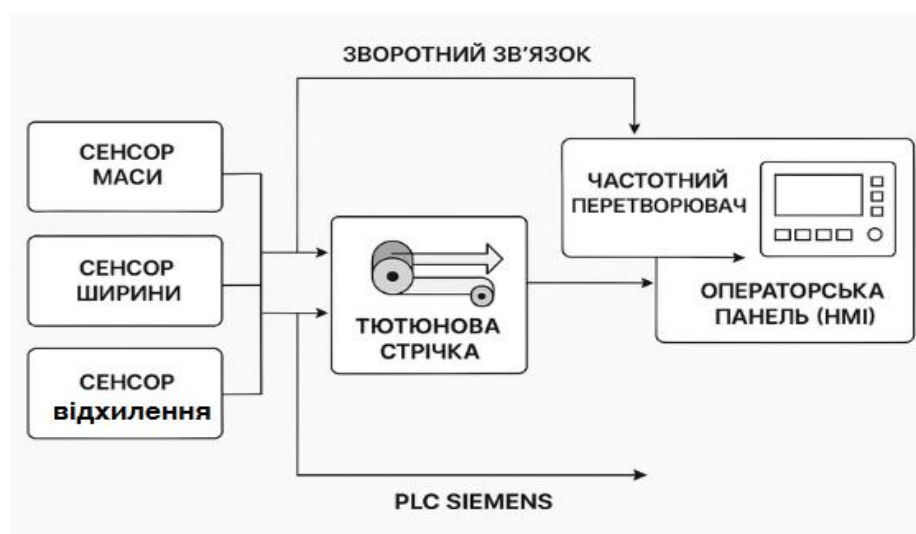


Рисунок 2.12 - Структура зв'язків між ПЛК Siemens, приводами, сенсорами та НМІ

На фізичному рівні ПЛК Siemens забезпечують з'єднання з такими елементами:

- частотними перетворювачами, які керують обертами електродвигунів подачі тютюну;
- аналого-цифровими модулями, до яких підключаються сенсори маси, ширини, швидкості;
- модулями дискретного введення/виведення, що зчитують сигнали з позиційних або контактних датчиків і формують сигнали на пускачі або соленоїдні клапани.

Для візуалізації процесу і контролю параметрів на сучасних фабриках застосовуються панелі оператора НМІ, які з'єднані з ПЛК по внутрішній мережі. Це дозволяє оператору в реальному часі бачити стан кожного вузла подачі, швидкість, тиск у пневмосистемі, частоту обертання приводів, а також повідомлення про збої чи попередження.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ТА ВИРІВНЮВАННЯ ТЮТЮНОВОЇ СТРІЧКИ

3.1 Формалізація та математичне моделювання об'єкта керування

Процес подачі та вирівнювання тютюнової стрічки у сигаретному виробництві є складною динамічною системою, яка поєднує механічні, пневматичні та електромеханічні складові. Для розробки системи автоматичного керування необхідно побудувати математичну модель об'єкта, яка дозволить аналізувати його поведінку у часі, вивчати перехідні процеси та підбирати параметри регулятора. Метою цього етапу є формалізація об'єкта у вигляді диференціального рівняння або передавальної функції з подальшим чисельним моделюванням у середовищі Python або MATLAB.

На практиці подача тютюну здійснюється за допомогою живильників (зазвичай стрічкових або шнекових), що приводяться в дію електроприводами з частотним регулюванням. Контроль вирівнювання тютюнової стрічки здійснюється за допомогою пневматичних або механічних стабілізаторів, які забезпечують однакову товщину та щільність шару тютюну перед подачею у формуючу камеру. У процесі руху тютюн піддається дії зовнішніх збурень, таких як вібрації, коливання навантаження, нерівномірне надходження сировини. Ці фактори зумовлюють необхідність побудови моделі з урахуванням інерційності, затримок та можливих нелінійностей.

Основною керованою величиною є швидкість подачі тютюну або густина тютюнової стрічки, яку контролюють за допомогою сенсорів. На цю величину впливає керуючий сигнал, що подається на електропривод або частотний перетворювач. З огляду на це, модель можна представити як класичний інерційний об'єкт першого порядку з одним входом (керуюча напруга або частота) та одним виходом (швидкість стрічки або густина шару).

Виходячи з припущення про лінійність у робочому діапазоні та відсутність значних запізнень, об'єкт можна описати аперіодичною передавальною функцією першого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3.1)$$

$W(s)$ — передавальна функція в операторній формі (оператор Лапласа),

K — коефіцієнт підсилення системи (залежить від типу приводу і передаточного числа механізмів),

T — постійна часу системи, що характеризує інерційність.

В загальному випадку можна також врахувати запізнення (наприклад, внаслідок затримки обробки сигналу чи інерції стрічки). Тоді модель набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.2)$$

L — час запізнення.

На етапі формалізації модель може бути отримана також із застосуванням методу диференціальних рівнянь. Якщо позначити вхідну дію як $u(t)$ — це, наприклад, керуюча напруга, а вихідну дію як $y(t)$ — густина тютюнової стрічки, то для системи першого порядку отримаємо:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K u(t) \quad (3.3)$$

Це рівняння описує реакцію виходу на зміну вхідної величини та відображає основні властивості інерційної системи — поступову реакцію із затуханням до сталого значення.

Параметри K та T можуть бути визначені експериментально або за допомогою ідентифікації. Для цього проводиться подача одиничного сигналу на вхід (наприклад, короткий приріст частоти) та фіксується реакція системи.

Аналізуючи графік реакції, можна оцінити час наростання, сталий рівень, час стабілізації, що дозволяє обчислити постійну часу та підсилення. У подальшому розглянемо одиничну перехідну характеристику об'єкта, поданий на рис. 3.1.

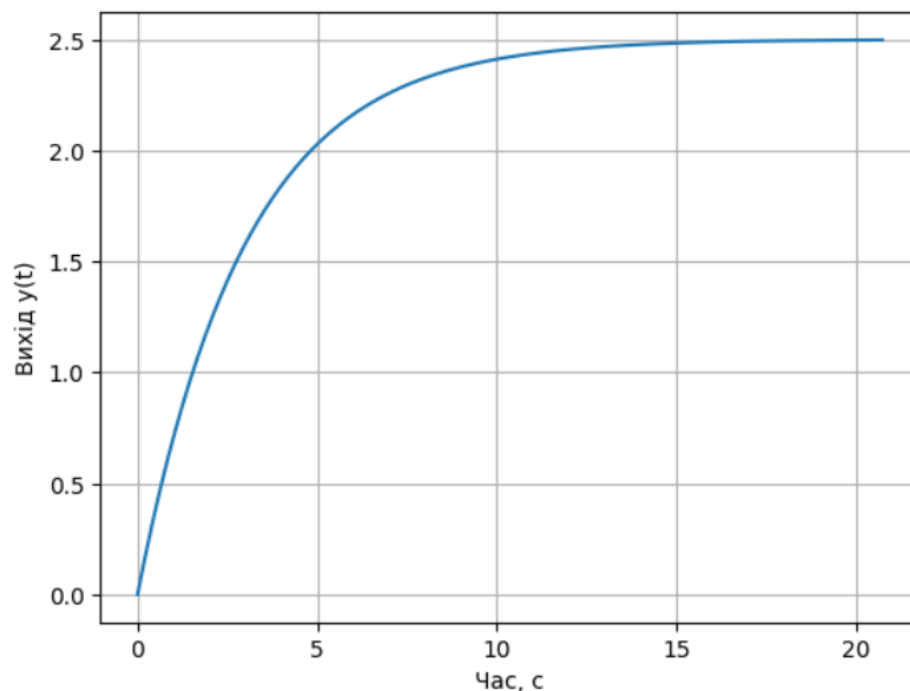


Рисунок 3.1 – Одинична перехідна характеристика об'єкта

У разі, якщо система містить механічні передаточні ланки — наприклад, між мотором та подаючим механізмом існує ремінна передача або редуктор — у модель можна додати додаткову інерційну ланку. У цьому випадку об'єкт буде описано передавальною функцією другого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{2.5}{(1.2s + 1)(0.8s + 1)} = 0.6s \quad (3.4)$$

Така модель дозволяє точніше описати поведінку об'єкта, особливо на початку перехідного процесу, коли інерційність приводної частини грає ключову роль. Передавальна функція другого порядку показана на рис. 3.2.

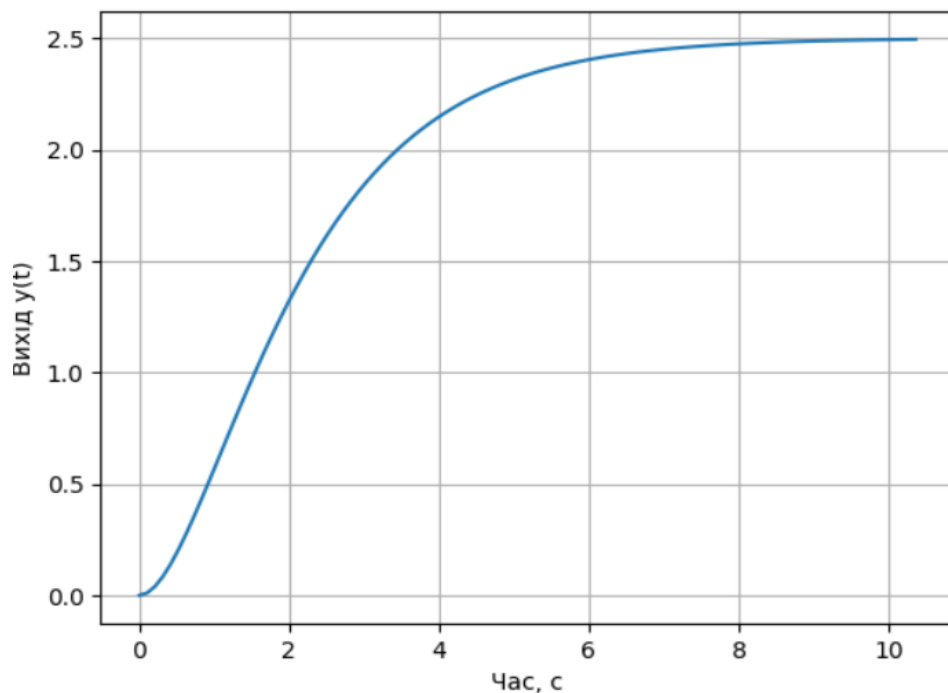


Рисунок 3.2 – Передавальна функція другого порядку

Деякі фізичні елементи, наприклад пневмотранспортери або обробка сигналу в ПЛК, можуть спричиняти фіксоване запізнення у реакції системи. У моделюванні це враховується за допомогою апроксимації запізнення. Найпоширеніший підхід — апроксимація Паде:

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - 2Ls}{1 + 2Ls} = \frac{1 - 2L * 0.3s}{1 + 2L * 0.3s} = 0.25 \quad (3.5)$$

На рис 3.3. наведено систему з урахуванням запізнення (Паде апроксимація)

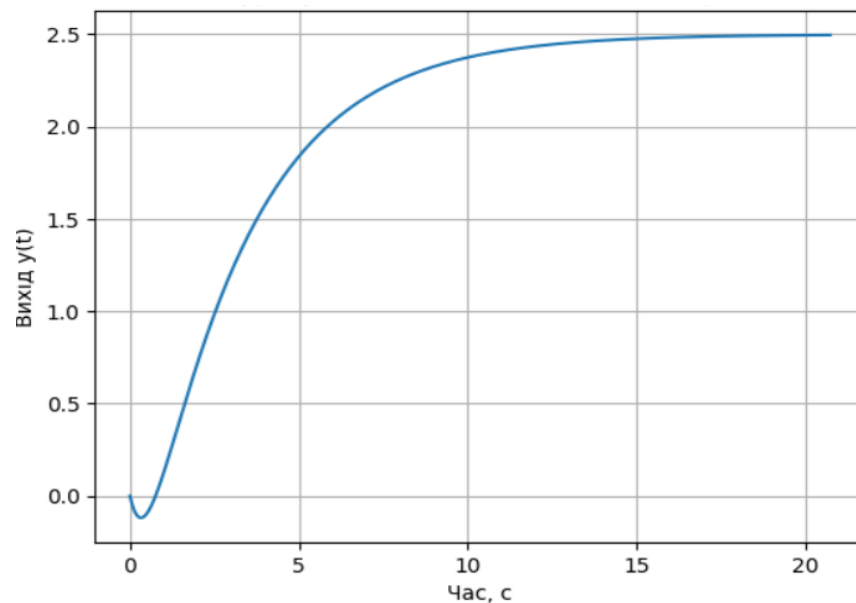


Рисунок 3.3 – Система з урахуванням запізнення (Паде апроксимація)

Після побудови основної моделі на основі передавальної функції, важливо розглянути фізичний сенс цієї моделі в контексті автоматизованого процесу подачі та вирівнювання тютюнової стрічки. Всі елементи, що беруть участь у цьому процесі — мотор-редуктор, шнековий або пневматичний живильник, механізми вирівнювання — можна уявити як динамічну систему із затримкою, інерційністю та обмеженою швидкістю. Це й обумовлює вибір моделі з першою або другою інерційною ланкою.

Для створення реалістичної моделі потрібно провести ідентифікацію параметрів системи. Це означає, що необхідно виміряти (або апроксимувати за даними експлуатації)

K — коефіцієнт підсилення, який відображає співвідношення між поданим керуючим сигналом (наприклад, швидкість обертання двигуна) і результатом (швидкість руху або масовий потік тютюнової стрічки);

T — постійна часу, що характеризує швидкість реакції системи на зміну сигналу;

— додаткові параметри, такі як запізнення L , інерційність другого порядку T_1, T_2 тощо.

У лабораторних або виробничих умовах параметри можна отримати з відгуку системи на одиничний сигнал або шляхом зняття амплітудно-фазових характеристик.

При наявності даних із реального виробництва (наприклад, часові ряди вимірюваної густини тютюну на виході стрічки після зміни швидкості подачі) можна застосувати ідентифікацію моделі за допомогою методу найменших квадратів, або функції `sysid` у MATLAB. Це дозволяє побудувати класичну систему:

$$\text{Об'єкт} = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-Ls} = \frac{2.5}{1.5s + 1} \cdot e^{-0.3s} \quad (3.6)$$

Або

$$\text{Об'єкт} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \cdot e^{-Ls} = \frac{2.5}{(1.2s + 1)(0.8s + 1)} \cdot e^{-0.3s} \quad (3.7)$$

— K, T_1, T_2, L — налаштовувані параметри, що підлягають уточненню в процесі експериментальної ідентифікації або моделювання.

Отримана модель є вихідною точкою для наступних етапів (значення формалізованої моделі):

— синтезу регулятора (підрозділ 3.2), оскільки тип моделі визначає доцільність П, ІІ або ПІД-регулятора;

— аналізу стабільності та оптимізації (перевищення, осциляції, час стабілізації);

— реалізації алгоритмів керування на ПЛК, де з моделі можна взяти знання про затримку або інерційність при розробці логіки.

У процесі автоматизації виготовлення сигарет особливу увагу необхідно приділити механізму транспортування тютюнової стрічки, її формуванню та дозуванню. На підставі аналізу конструкції сигаретної машини було виконано попередній розрахунок параметрів тютюнової стрічки, з урахуванням геометричних розмірів тютюнового каналу та типових характеристик готової продукції.

Встановлено, що діаметр тютюнового каналу становить 7,62 мм, що відповідає внутрішньому діаметру сигарети без фільтра. Довжина забитої частини сигарети становить 69 мм, а повна довжина сигарети — 84 мм. Висота шару тютюну в каналі, який транспортується, визначається із співвідношення площі поперечного перерізу та довжини транспортованого відрізка. Використовуючи формулу площі поперечного перерізу $S = \frac{\pi d^2}{4}$ (3.9) і нормалізуючи її на довжину стрічки, отримано орієнтовне значення об'єму тютюну, який формує один виріб.

Обчислення показують, що при діаметрі 7,62 мм висота шару тютюну $h = \frac{d}{4} = 1,905$ мм, що забезпечує рівномірне заповнення гільзи при стабільному русі стрічки. При середній продуктивності машини 5000 сигарет на хвилину, це відповідає приблизно 83 одиницям за секунду. Таким чином, система повинна забезпечувати стабільну та безперервну подачу тютюнової стрічки з точним контролем швидкості на рівні близько 2 м/с.

Наведений розрахунок дозволяє реалізувати алгоритм керування, який враховує динаміку подачі тютюнового матеріалу, геометрію виробу та необхідну продуктивність. Це, у свою чергу, слугує основою для вибору відповідних датчиків, виконавчих механізмів і регуляторів, які забезпечують контрольоване формування тютюнової стрічки на високошвидкісному обладнанні.

3.2 Синтез та налаштування системи автоматичного регулювання

Для ефективного керування процесом подачі та вирівнювання тютюнової стрічки доцільно застосувати класичний підхід автоматичного регулювання із замкненим контуром, де регулятор компенсує відхилення параметрів за рахунок коригування впливу на виконавчі механізми. Враховуючи інерційність об'єкта, можливу наявність збурень та вимоги до динаміки, як-от мінімізація перехідного процесу, стабілізація параметрів у межах допусків, слід обґрунтовано обрати тип регулятора.

У випадку з технологічним процесом, де спостерігаються як повільні (плавна зміна густини стрічки), так і швидкі (коливання тиску, вібрації) збурення, П-регулятор буде недостатнім — він забезпечує пропорційну реакцію, але не усуває статичну похибку. ПІ-регулятор здатен нівелювати цю похибку, але вносить інерційність, що може спричинити коливання. Найбільш доцільним вибором у більшості промислових випадків є ПІД-регулятор, який поєднує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові для швидкої та точної реакції.

Математично ПІД-регулятор описується як:

$$GPID(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kds = 0.36 + \frac{1.0}{s} + 0.25s \quad (3.10)$$

— Kp — коефіцієнт пропорційності, Ki — інтегральний коефіцієнт, Kd — диференціальний коефіцієнт. Передавальна функція регулятора у зображенні Лапласа має вигляд:

$$GPID(s) = \frac{Kds^2 + Kps + Ki}{s} = \frac{0.25s^2 + 0.36s + 1.0}{s} \quad (3.11)$$

Налаштування ПД-регулятора виконується за різними методами, серед яких один із найуживаніших — метод Зіглера-Ніколса. Суть цього методу полягає в попередньому знаходженні критичного коефіцієнта підсилення K_{cr} , при якому система починає коливатися з постійною амплітудою. Фіксується також період цих коливань T_{cr} , після чого параметри регулятора встановлюються за емпіричними формулами. Налаштування ПД-регулятора подано у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Налаштування ПД-регулятора

Тип регулятора	K_p	T_i	T_d
П	$0.5K_{cr} = 0.3$	—	—
ПІ	$0.45K_{cr} = 0.27$	$T_{cr}/1.2 = 0.6$	—
ПД	$0.6K_{cr} = 0.36$	$T_{cr}/2 = 1.0$	$T_{cr}/0.125 = 0.25$

Перехідна характеристика замкненої системи показана на рис. 3.4.

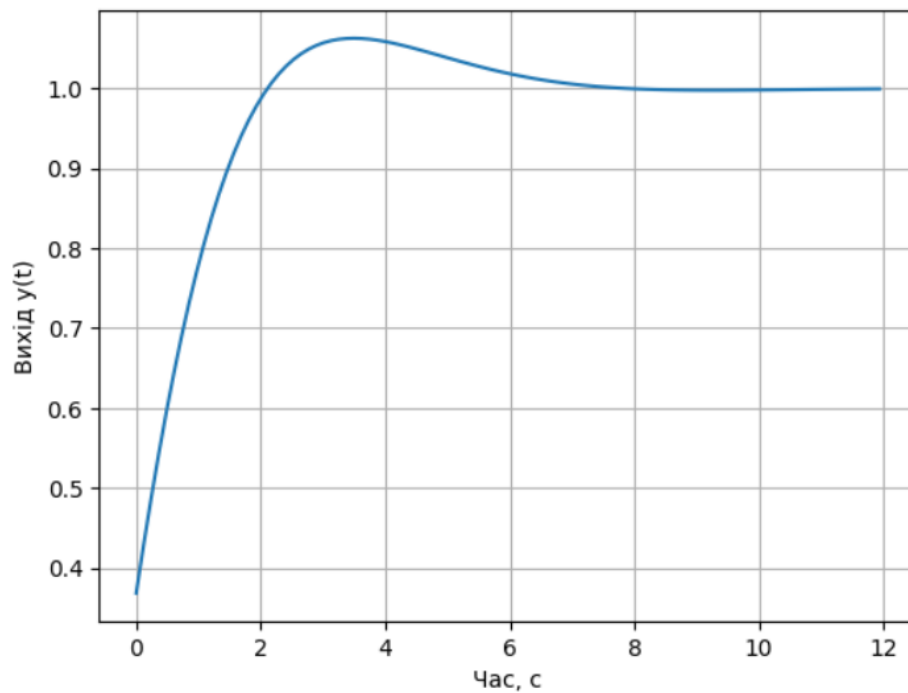


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика замкненої системи

Отримана перехідна характеристика аналізується за такими критеріями:

- Час стабілізації — момент, коли система входить у межі $\pm 5\%$ від сталого значення.
- Перерегулювання — максимум понад бажане значення.
- Статична похибка — різниця між бажаним і фактичним значенням виходу.

Якщо система має надлишкове перерегулювання, слід зменшити K_p або K_d , а у разі надмірної повільності — збільшити K_p чи зменшити T_i . У реальному виробництві також враховуються обмеження по швидкості обертання шнеків, реакції частотного перетворювача та інерційність механіки, тому симуляції доповнюються експериментальними калібруваннями. З урахуванням вимог до безперервності подачі, мінімізації зміни густини та чутливості до коливань, правильно налаштований ПД-регулятор дозволяє стабілізувати процес, знизити втрати матеріалу та підвищити якість готової продукції. У наступному розділі ці моделі будуть апробовані на прикладі в середовищі моделювання.

3.3 Моделювання системи автоматичного керування в MATLAB

Моделювання системи автоматичного регулювання у MATLAB є одним з ключових етапів перевірки працездатності обраної структури керування ще до впровадження її у реальний технологічний процес. Це дозволяє в безпечному віртуальному середовищі перевірити реакцію системи на різноманітні збурення, підібрати оптимальні параметри регулятора, оцінити стійкість та ефективність регулювання, враховуючи динаміку як об'єкта, так і обраного типу регулятора.

У нашому випадку, об'єктом керування є система подачі та вирівнювання тютюнової стрічки, що характеризується інерційністю, з можливим відгуком на

зміну щільності, механічних навантажень, коливань подачі та ін. Як було змодельовано раніше, передавальна функція об'єкта має вигляд:

$$G_o(s) = \frac{K}{T s + 1} \quad (3.12)$$

— $K = 2.5$ — коефіцієнт підсилення, $T = 1.5$ — стала часу. Цей об'єкт належить до класу аперіодичних елементів першого порядку, які добре піддаються регулюванню за допомогою ПІ або ПІД-регуляторів.

Отримано типовий вигляд відгуку системи з регулятором: плавне зростання до встановленого значення із невеликим перерегулюванням (менше 10%), стабілізація за 5–7 секунд та нульова статична похибка. Такий перехідний процес відповідає сучасним критеріям якості: швидкість реакції, точність та відсутність коливань.

Для глибшого аналізу було проведено моделювання впливу зовнішніх збурень. У середовищі Simulink це реалізується шляхом введення перешкод у точку після регулятора або безпосередньо вхідну змінну. У результаті реакція системи на перешкоду мала вигляд згасаючих коливань із подальшим поверненням до встановленого значення, що свідчить про стійкість системи.

Також було змодельовано поведінку системи з П-регулятором, передавальна функція якого:

$$G_p(s) = K_p \quad (3.13)$$

— $K_p = 1.2$

При підключенні П-регулятора перехідна характеристика демонструє швидкий початковий відгук, проте наявна статична похибка, що не зникає навіть після завершення перехідного процесу. Такий підхід є неприйнятним для

систем, де важливо забезпечити точне дозування або підтримання щільності стрічки.

З точки зору частотного аналізу, було побудовано графік амплітудно-фазової характеристики (Bode plot), який показав наявність запасу стійкості понад 45° та запасу за амплітудою понад 10 дБ, що свідчить про стійкість системи в межах припустимих збурень.

Порівнюючи типи регуляторів, можна зробити висновок, що П-регулятор забезпечує лише грубе регулювання з помітною похибкою, ПІ — дозволяє усунути її, але може призвести до затягнутого перехідного процесу. Найбільш ефективним виявився ПІД-регулятор, який дозволив реалізувати швидке, точне і стійке керування в умовах змінних збурень. У практичному впровадженні така система зменшить втрати тютюнової сировини, підвищить точність формування стрічки та стабілізує продуктивність технологічної лінії.

Таким чином, моделювання підтвердило, що обрана структура керування з ПІД-регулятором є доцільною для реалізації в системі автоматизації подачі тютюнової стрічки, а також дозволяє враховувати особливості об'єкта та досягати високої якості регулювання.

3.4 Вибір технічних засобів реалізації системи

Для забезпечення ефективного функціонування системи автоматичного регулювання процесу подачі тютюнової стрічки необхідно обґрунтовано підійти до вибору технічних засобів, що становитимуть основу всієї автоматизованої структури. Зважаючи на високу швидкість виробничої лінії, яка може досягати кількох тисяч сигарет за хвилину, всі компоненти мають відповідати критеріям швидкодії, надійності, точності та інтеграційної сумісності.

Основна задача полягає у забезпеченні стабільного положення тютюнової стрічки на конвеєрі, її рівномірної подачі, точного дотримання товщини шару

тютюну та усунення можливих коливань густини матеріалу. Для цього застосовуються високоточні сенсори, що дозволяють у реальному часі відстежувати параметри стрічки. Зокрема, використовується лазерний датчик відстані SICK DT50-2 Pro, який завдяки своїм характеристикам дозволяє зчитувати положення тютюнової стрічки з високою точністю навіть за складних умов виробництва. Також для контролю краю стрічки застосовується оптичний сенсор Keyence серії GV, що забезпечує стабільну роботу при високих швидкостях переміщення матеріалу. Крім того, для оцінки товщини шару тютюну може використовуватись інфрачервоний аналоговий датчик Micro-Epsilon, що дозволяє аналізувати густину шляхом безконтактного вимірювання.

Щодо виконавчих механізмів, основним елементом для приводу транспортеру подачі тютюнової стрічки виступає серводвигун SIMOTICS серії 1FK2 у поєднанні з приводом SINAMICS S210. Такий комплект забезпечує не лише швидке реагування на сигнали регулятора, а й точність позиціонування та плавне регулювання швидкості руху. Для реалізації функції зворотного зв'язку в контурі ПІД-регулювання використовується високоточний інкрементальний енкодер SICK DFS60, який зчитує реальні параметри руху стрічки та передає їх до контролера. У разі необхідності тонкої корекції подачі тютюну з бункера в систему може бути включений пневмоклапан Festo VUVG, який дає змогу оперативно коригувати об'єм потоку або здійснювати швидке розвантаження.

Центральним елементом системи керування виступає програмований логічний контролер Siemens S7-1200, модель CPU 1214C, який має інтегровані аналогові входи/виходи, цифрові інтерфейси зв'язку та можливість реалізації ПІД-регулятора у середовищі TIA Portal. Такий контролер дозволяє не лише керувати всіма виконавчими елементами, а й обробляти сигнали з сенсорів, реалізовувати алгоритми адаптивного регулювання, а також забезпечувати гнучке налаштування параметрів безпосередньо в процесі роботи. Для взаємодії з оператором та візуалізації даних доцільно використати панель оператора

КТР400, яка підтримує введення у реальному часі, індикацію аварій, графічне відображення поточних параметрів і статусу системи.

Запропонована конфігурація дозволяє досягти високого рівня стабільності в роботі системи подачі тютюнової стрічки, ефективно реагувати на зовнішні збурення та оперативно адаптуватись до змін технологічних умов, таких як варіації вологості тютюну або механічні коливання. Використання промислово перевірених компонентів компаній Siemens, SICK, Festo та Micro-Epsilon гарантує надійність системи, її стійкість до навантажень і можливість інтеграції у більш широку архітектуру керування виробництвом із застосуванням SCADA або MES-рішень [8]. На рис 3.5. приклад структурної схеми автоматичного регулювання процесу подачі тютюнової стрічки.

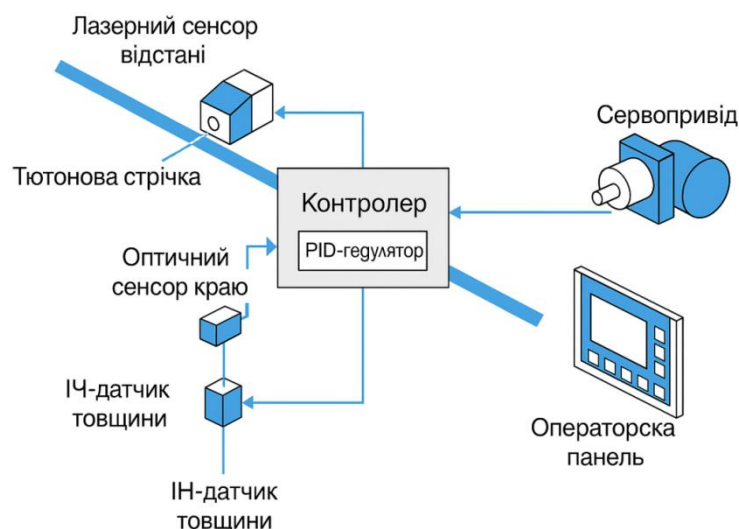


Рисунок 3.5 – Структурна схема автоматичного регулювання процесу подачі тютюнової стрічки

Таким чином, технічні засоби, підібрані для реалізації системи, повністю відповідають вимогам автоматизації швидкоплинних виробничих процесів, дозволяючи забезпечити точність, динамічність та надійність роботи всієї системи подачі тютюнової стрічки в умовах інерційної дії та високої продуктивності.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У процесі автоматизації швидкоплинних виробничих процесів, таких як подача та вирівнювання тютюнової стрічки, необхідно враховувати не лише технічну ефективність, а й питання охорони праці та екологічної безпеки. Сучасне виробництво передбачає впровадження високих стандартів безпеки, зниження ризиків шкідливого впливу на здоров'я персоналу, а також контроль за впливом на довкілля.

Однією з ключових особливостей роботи з тютюновою сировиною є наявність великої кількості дрібнодисперсного пилу, який утворюється під час її транспортування, дозування та вирівнювання. При високій концентрації та недостатній вентиляції тютюновий пил може бути шкідливим для органів дихання, спричиняти алергічні реакції, а у разі довготривалого впливу — хронічні професійні захворювання. Саме тому організація систем аспірації, пиловловлювання та очищення повітря відіграє фундаментальну роль в охороні праці на тютюнових підприємствах.

Особливу увагу слід приділяти ергономіці робочих місць та організації зон обслуговування автоматизованих ділянок. Умови праці повинні забезпечувати мінімальне фізичне навантаження на оператора, вільний доступ до елементів керування і технічного обслуговування, а також відповідність нормативним вимогам щодо висоти, освітлення, шуму та мікроклімату. Оскільки значна частина обладнання працює в напіваавтоматичному або автоматичному режимі, важливо уникати необхідності прямого контакту людини з рухомими елементами механізмів.

Додаткову небезпеку становлять електричні мережі та елементи систем керування — особливо у випадку високої напруги та струмів, які використовуються для приводу електродвигунів, частотних перетворювачів або

систем ПЛК. Тому критично важливим є дотримання правил електробезпеки, належне заземлення обладнання, а також регулярна перевірка справності кабелів, з'єднань і засобів індикації. Електрообладнання повинно мати ступінь захисту не нижче IP54, а у зонах з високою запиленістю або вологістю — IP65.

Особливості роботи зі швидкоплинними процесами передбачають також ризики механічних травм, пов'язаних із високошвидкісним обертанням валів, шнеків та роликів. Контакт з такими механізмами може спричинити серйозні пошкодження. Для цього використовуються механічні захисти (екрани, кожухи), кінцеві вимикачі відкриття/доступу, а також аварійні кнопки екстреної зупинки, розміщені в межах досяжності персоналу.

Одним із критичних аспектів забезпечення безпеки тютюнового виробництва є протипожежна безпека. Тютюн і його пил відносяться до легкозаймистих речовин, які за певних умов (наявність відкритого полум'я, перегрітих поверхонь, електричних іскр тощо) можуть стати джерелом займання. У виробничих приміщеннях, де відбувається транспортування, подрібнення, вирівнювання або пресування тютюнової стрічки, встановлюються системи контролю температури, димовидалення та вогнегасіння. Автоматичні системи пожежогасіння повинні бути інтегровані з основною лінією управління, забезпечуючи екстрену зупинку обладнання при спрацюванні датчиків диму або температури.

Під час проєктування виробничих ділянок також враховується необхідність виділення зон із підвищеною пожежною небезпекою, обмеження доступу персоналу до них без належного захисту, а також розміщення вогнегасників, пожежних щитів та аварійних виходів відповідно до норм ДБН В.1.1-7:2016 і правил пожежної безпеки України. Навчання персоналу правилам поведіння у разі пожежі, евакуації та правильного використання засобів пожежогасіння є обов'язковим і проводиться регулярно.

Ще одним важливим чинником, що супроводжує тютюнове виробництво, є екологічна безпека. Залишки тютюнового пилу, відходи обгорткових

матеріалів, використані фільтри, мастильні матеріали та упаковка утворюють техногенне навантаження на довкілля. Тому передбачаються заходи щодо утилізації відходів відповідно до їхнього класу небезпеки. Тютюнові відходи, які містять нікотин, не можуть бути вивезені на звичайні полігони побутових відходів, а повинні знешкоджуватись у спеціалізованих установках (термічна утилізація або хімічна нейтралізація).

Особливу увагу приділено зменшенню викидів у повітря — пилових, газових або ароматичних компонентів. Для цього встановлюються системи локального відсмоктування повітря, аспірації та фільтрації, які дозволяють зменшити концентрацію шкідливих речовин до рівня, допустимого згідно з ГДК, визначених у нормативних документах МОЗ та Міндовкілля. Додатково, вентиляційні системи обладнуються фільтрами грубого та тонкого очищення, які підлягають регламентованій заміні.

З правової точки зору, вся діяльність у сфері виробництва тютюнової продукції повинна відповідати нормативно-правовій базі, зокрема Закону України «Про охорону праці», Закону «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», Державним санітарним нормам та правилам, а також вимогам екологічного законодавства. Проведення атестації робочих місць, перевірка рівня шуму, освітлення, вібрації, а також контроль за умовами праці — усе це входить у перелік обов'язкових заходів, які підтверджуються актами технічного аудиту та екологічного моніторингу.

У контексті автоматизації швидкоплинних процесів слід особливо зазначити, що впровадження інтелектуальних систем керування дозволяє значно знизити вплив людського фактора, попередити аварійні ситуації, мінімізувати контакт з небезпечними речовинами і забезпечити дотримання норм охорони праці на всіх етапах виробничого циклу.

Система охорони праці та захисту навколишнього середовища у виробництві тютюнової стрічки є невід'ємною складовою безпечного та сталого функціонування технологічного процесу. Враховуючи специфіку

роботи з легкозаймистими матеріалами, пиловими середовищами та високошвидкісним обладнанням, важливими аспектами є забезпечення пожежної безпеки, організація ефективної вентиляції, контроль рівня шуму, вібрацій та температурного режиму.

Впровадження автоматизованих систем управління дозволяє не лише підвищити продуктивність, а й значно знизити рівень професійних ризиків для персоналу, зменшити негативний вплив на довкілля та покращити умови праці. Дотримання вимог чинного законодавства України, стандартів безпеки та екології створює передумови для сталого розвитку підприємства, а також забезпечує соціальну відповідальність перед працівниками та суспільством.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У сучасних умовах стрімкого технічного прогресу підприємства, які прагнуть зберігати конкурентоспроможність, змушені постійно шукати шляхи зниження виробничих витрат, підвищення продуктивності праці та стабілізації якості продукції. Одним із найефективніших напрямів у цьому контексті є впровадження систем автоматизації, зокрема для таких динамічних ділянок, як процес подачі та вирівнювання тютюнової стрічки у виробництві сигарет. Економічна ефективність автоматизації полягає не лише у скороченні трудових витрат, а й у стабілізації випуску продукції відповідної якості, зменшенні кількості браку, втрат сировини, енерговитрат і зниженні ризиків простоїв.

Автоматизація дозволяє оптимізувати ресурси підприємства, зменшити залежність від людського фактора, унеможливити або мінімізувати технологічні помилки, що раніше виникали через втомлюваність персоналу, недоліки організації праці або нестачу часу на своєчасне реагування. Замість ручного втручання у процес вирівнювання тютюнової стрічки система автоматичного регулювання, яка використовує сенсори, ПЛК-контролери та виконавчі приводи, здатна забезпечити постійну підтримку заданих параметрів подачі. Це, у свою чергу, пряму впливає на стабільність формування сигарет і знижує ймовірність браку.

Слід також відзначити, що автоматизація дозволяє значно зменшити витрати на обслуговування та ремонт обладнання. Завдяки безперервному моніторингу технічного стану вузлів (наприклад, за допомогою вібраційних або температурних датчиків) можна завчасно виявити ознаки зносу або відхилення в роботі і запланувати профілактичний ремонт без необхідності аварійного зупинення виробничої лінії. Це безпосередньо впливає на зменшення простоїв

та забезпечення безперервності виробничого процесу, що з економічної точки зору дозволяє уникнути фінансових втрат, пов'язаних з незапланованими зупинками.

Наступною перевагою є підвищення коефіцієнта використання сировини. Тютюн, як основна сировина у виробництві сигарет, має значну вартість, тому його нераціональне використання (перевитрати або втрати внаслідок неякісної подачі) безпосередньо впливає на собівартість продукції. Завдяки точному дозуванню, синхронізації руху тютюнової стрічки та коригуванню подачі у реальному часі, автоматизована система дозволяє знизити ці втрати до мінімуму. Таким чином, навіть часткове зменшення відходів сировини при масовому виробництві означає відчутне скорочення фінансових витрат на одиницю продукції.

Автоматизація виробничих процесів [4] на підприємстві, яке займається виготовленням сигарет, також сприяє більш точному плануванню витрат і обсягів випуску продукції. Інформація, яку отримує система керування від сенсорів, частотних перетворювачів, індикаторів зусилля, тиску, температури або рівня, дозволяє не лише підтримувати стабільний технологічний режим, а й збирати статистику про продуктивність обладнання. Такі дані є надзвичайно важливими при ухваленні стратегічних управлінських рішень щодо модернізації окремих ділянок, закупівлі нових ліній, переобладнання або адаптації виробництва під нові марки продукції. Таким чином, система автоматизації фактично виступає не лише виконавчим, а й діагностично-аналітичним елементом, який сприяє гнучкому та своєчасному управлінню ресурсами підприємства.

Окрім технічних та організаційних переваг, економічна ефективність автоматизації значно зростає завдяки зменшенню витрат на оплату праці. Після впровадження автоматизованої подачі тютюнової стрічки з функцією саморегуляції потреба у постійному чергуванні обслуговуючого персоналу значно знижується. Замість трьох або чотирьох операторів достатньо одного

висококваліфікованого спеціаліста, який слідкує за роботою автоматизованої системи. При цьому підвищується якість робочого процесу — працівник більше не виконує рутинні фізичні дії, а натомість здійснює контроль, аналіз і, за потреби, втручання в роботу інтерфейсу системи. Зміна структури праці сприяє загальному підвищенню продуктивності персоналу й зменшенню плинності кадрів.

Автоматизоване регулювання дозволяє оперативно реагувати на зміни вхідних параметрів, таких як щільність, вологість або швидкість руху тютюнової стрічки. У традиційних умовах ці параметри контролювалися вручну, що часто призводило до затримок в адаптації процесу або помилок. У той час як навіть короткочасне відхилення у параметрах подачі може зумовити серію сигарет, які не відповідають стандарту, а отже — повинні бути утилізовані або повторно перероблені. Таким чином, автоматизація також безпосередньо знижує рівень технологічного браку, зменшуючи витрати на вторинну обробку та повторну упаковку, що в свою чергу позитивно впливає на фінансовий результат підприємства.

Впровадження автоматизованої системи, побудованої на базі ПЛК Siemens та відповідного комплексу сенсорів, дає змогу інтегрувати її з іншими ділянками виробництва. Це означає, що система не працює ізольовано, а стає частиною єдиної інформаційно-керуючої інфраструктури. Таким чином досягається ефект синергії, коли взаємодія між різними частинами обладнання забезпечує повну узгодженість і логічну послідовність дій. З економічної точки зору це означає зниження витрат, пов'язаних із помилками синхронізації, затримками в подачі компонентів і перевитратою енергетичних ресурсів.

Ще одним важливим економічним фактором є підвищення енергетичної ефективності. Завдяки впровадженню частотних перетворювачів у приводах шнекових живильників та транспортувальних механізмів, забезпечується регулювання швидкості обертання у відповідності до реального навантаження. Це дає змогу уникнути зайвих витрат енергії в моменти, коли обладнання не

працює на повну потужність. Крім того, такі частотні перетворювачі захищають механізми від перевантаження, що зменшує зношування і продовжує ресурс роботи. У підсумку — менше споживання електроенергії, нижчі рахунки за енергоносії, а також економія на ремонтах і технічному обслуговуванні. Добре, нижче викладено розгорнутий текстовий виклад розрахунків економічної ефективності впровадження автоматизованої системи керування для тютюнової лінії, з урахуванням усіх витрат, заощаджень і терміну окупності інвестицій.

З метою обґрунтування доцільності впровадження автоматизації було проведено аналіз капітальних витрат, операційних показників до та після модернізації, а також розрахунок економічного ефекту на основі щомісячних заощаджень. На першому етапі враховано вартість самого обладнання, яке включає датчики, контролери Siemens, частотні перетворювачі, вузли зв'язку, пневматичні виконавчі механізми та допоміжні елементи.

Капітальні витрати:

Вартість обладнання: 18 000 євро = 756 000 грн

Вартість програмного забезпечення та впровадження: 5 000 євро = 210 000 грн

Витрати на навчання персоналу: 2 000 євро = 84 000 грн

Монтаж та пусконаладження обладнання: 3 000 євро = 126 000 грн

Загальні капітальні витрати: 28 000 євро = 1 176 000 грн**

Операційні витрати до автоматизації:

Кількість працівників: 14 осіб

Заробітна плата одного працівника: 1 000 євро

Фонд оплати праці: 14 000 євро = 588 000 грн

Витрати на електроенергію: 2 500 євро = 105 000 грн

Загальні щомісячні витрати до автоматизації: 693 000 грн

Операційні витрати після автоматизації:

Кількість працівників: 7 осіб

Заробітна плата одного працівника: 1 000 євро

Фонд оплати праці: 7 000 євро = 294 000 грн

Витрати на електроенергію: 1 200 євро = 50 400 грн

Витрати на обслуговування обладнання: 500 євро = 21 000 грн

Загальні щомісячні витрати після автоматизації: 365 400 грн

Економічний ефект:

Економія на заробітній платі: 588 000 грн – 294 000 грн = 294 000 грн

Економія на електроенергії: 105 000 грн – 50 400 грн = 54 600 грн

Поточні витрати на обслуговування: –21 000 грн

Чиста щомісячна економія: 294 000 + 54 600 – 21 000 = 327 600 грн

Окупність інвестицій:

Загальні інвестиції: 1 176 000 грн

Щомісячна економія: 327 600 грн

Строк окупності: $1\,176\,000 / 327\,600 \approx 3,6$ місяця

За рахунок зменшення витрат на заробітну плату та енергоспоживання підприємство отримує щомісячну економію:

Щомісячна економія на заробітній платі становить 588 000 грн – 294 000 грн = 294 000 грн.

Щомісячна економія на енергоспоживанні становить 105 000 грн – 50 400 грн = 54 600 грн.

Разом щомісячна економія без урахування технічного обслуговування становить:

$$294\,000 \text{ грн} + 54\,600 \text{ грн} = 348\,600 \text{ грн.}$$

Після врахування витрат на обслуговування обладнання, що становлять 21 000 грн на місяць,

Остаточна щомісячна чиста економія:

$$348\,600 \text{ грн} - 21\,000 \text{ грн} = 327\,600 \text{ грн.}$$

Термін окупності інвестицій:

Загальні капітальні витрати становлять: 1 176 000 грн.

Остаточна щомісячна економія: 327 600 грн.

Термін окупності інвестицій розраховується так:

$$1\,176\,000 \text{ грн} \div 327\,600 \text{ грн} \approx 3,6 \text{ місяця.}$$

Якщо врахувати також зменшення браку, поліпшення стабільності продукції, уникнення аварій та можливість аналізу параметрів у реальному часі, то ефективність впровадження зростає ще більше, хоча ці показники не завжди легко виміряти грошовим еквівалентом. Проте суто з точки зору інвестиційного аналізу — впровадження системи автоматизації на тютюновій стрічковій лінії є повністю виправданим і дозволяє значно оптимізувати витрати підприємства вже в перші місяці експлуатації.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проаналізовано особливості швидкоплинних процесів у тютюновому виробництві та обґрунтовано необхідність їх автоматизації.

Розроблена система керування на базі сучасних програмно-апаратних засобів дозволила підвищити точність регулювання, зменшити втрати сировини, знизити енергоспоживання та скоротити чисельність обслуговуючого персоналу.

Запропоноване технічне рішення продемонструвало високу економічну ефективність: строк окупності становить менше чотирьох місяців.

Автоматизація сприяє не лише підвищенню продуктивності, а й покращенню якості готової продукції та стабільності виробничого процесу.

Отримані результати свідчать про доцільність впровадження подібних систем у сучасних умовах виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бровко М.Ф., Мазуренко І.П., Сидоренко Ю.О. Автоматизація технологічних процесів. — Київ: КНЕУ, 2020. — 328 с.
2. Петренко А.В. Теорія автоматичного керування. — Харків: НТУ «ХПІ», 2019. — 312 с.
3. Siemens AG. SIMATIC Automation Systems — системи автоматизації технологічних процесів. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems.html>
4. Вдовенко А.М., Кравчук Р.В. Автоматизація виробничих процесів у харчовій промисловості. — Львів: УАД, 2021. — 246 с.
5. Cigarette Manufacturing Technology Handbook / CORESTA. — Paris, 2018. — 182 р.
6. Виробництво тютюнових виробів: аналітика, процеси, контроль якості. URL: <https://www.tobaccoasia.com>
7. Allen-Bradley / Rockwell Automation. Sensors and Actuators for Industrial Automation. — URL: <https://www.rockwellautomation.com>
8. Огляд SCADA-систем та MES-рішень для тютюнової промисловості. — Журнал «Промислова Автоматизація», №4, 2023.
9. Керівництво користувача Siemens SIMATIC WinCC. — URL: <https://support.industry.siemens.com>
10. Tobacco Processing & Automation Technologies — URL: <https://www.automation.com>
11. Великогабаритні машини для обробки тютюнової стрічки (HT/SH) — URL: https://www.researchgate.net/figure/Major-machines-in-tobacco-strip-processing-a-HT-machine-and-b-SH-machine_fig1_372532558
12. Шнековий живильник (шнековий транспортер) — URL: kwsfmfg.com

13. Габаритний план шнекового транспортеру — URL: <https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/dimensional-layout-of-conveyor/>
14. Лінія виробництва сировинного тютюнового листа — URL: <https://www.tobaccosources.com/sale-469279-lb14-rolling-process-reconstituted-tobacco-sheet-production-line.htm>
15. Лазерний або оптичний датчик положення/контролю якості — URL: <https://www.sick.com/be/de/catalog/branchen/maschinen-und-material/maschinen/handhabungs-und-montagetechnik/qualitaets-und-lagekontrolle-auf-foerderbaendern/c/p409296?filters=Aufgabe%3C@%3E581035::BooleanFilter::%C3%9Cberwachen%20und%20kontrollieren%20-%20Qualit%C3%A4t&tab=overview>
16. Індукційний датчик положення — URL: <https://gillsc.com/position-sensors-in-tobacco-cutting-machine/>