

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»**

**на тему: «Автоматизація системи контролю якості виготовлення целюлозної
продукції»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПК-41мп
Демерза Н.В.

Науковий керівник:

Зав. кафедри АСНК, д.т.н., доцент
Киричук Ю.В.

Консультант з розділу розробки стартап проєкту:

Проф., д.е.н., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова К.О.

Рецензент:

Доцент, к.т.н.
Маркін М.О.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____ Демерза Н.В.

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Демерзі Назару Валерійовичу

1. Тема дисертації «Автоматизація системи контролю якості виготовлення целюлозної продукції», науковий керівник дисертації Киричук Юрій Володимирович, доцент затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: автоматизована система контролю якості.
4. Вихідні дані: предметом дослідження є наступні властивості та характеристики автоматизованої системи контролю якості виготовлення целюлозної продукції: точність, стабільність і швидкодія вимірювання основних параметрів; можливість інтеграції вимірювальних пристроїв (сканера, датчиків, засобів обробки сигналів) у діючу систему керування папероробною машиною; забезпечення безпеки персоналу при експлуатації обладнання, у тому числі при використанні джерел іонізуючого випромінювання; економічна ефективність впровадження системи, зокрема зменшення браку та витрат сировини й енергоносіїв; відповідність вимогам метрології, охорони праці та екологічного законодавства.
5. провести аналіз сучасного стану та проблематики контролю якості целюлозної продукції на папероробних машинах; виконати огляд існуючих автоматизованих систем і приладів контролю маси та вологості, визначити їх переваги й недоліки; проаналізувати технологічну схему базового підприємства та чинну систему

контролю якості; розробити концепцію автоматизованої системи контролю якості із застосуванням сканера поперечного профілю та засобів обробки даних; побудувати структурну й функціональну схеми системи, обґрунтувати вибір вимірювальних каналів, датчиків і засобів керування; виконати необхідні інженерні розрахунки параметрів системи ; оцінити очікуваний техніко-економічний ефект і підготувати рекомендації щодо впровадження розробленої системи на підприємстві.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 4 плакати А1.

7. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Бояринова К.О. завідувач кафедри економічної кібернетики		

8. Дата видачі завдання 01.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів дисертації	Примітка
1	Отримання теми	01.09.2025	
2	Пошук літератури	13.09.2025–19.09.2025	
3	Аналіз технологічного процесу виготовлення целюлозної продукції та існуючої системи контролю якості на базовому підприємстві	20.10.2025–25.10.2025	
4	Розробка концепції та структурно-функціональної схеми автоматизованої системи контролю якості	26.10.2025–02.11.2025	
5	Вибір і обґрунтування основних технічних засобів та розробка алгоритмів роботи системи	03.11.2025–10.11.2025	
6	Розрахунок параметрів автоматизованої системи контролю якості й обґрунтування вибору основного обладнання.	11.11.2025–17.11.2025	
7	Розробка стартап-проекту з комерціалізації системи «CelluScan»	18.11.2025-20.11.2025	
8	Підготовка ПЗ	20.11.2025–24.11.2025	

Студент

Назар ДЕМЕРЗА

Керівник

Юрій КИРИЧУК

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація присвячена розробленню та обґрунтуванню автоматизованої системи контролю якості виготовлення целюлозно-паперової продукції, орієнтованої на безперервні онлайн-вимірювання ключових параметрів паперового полотна та забезпечення оперативної стабілізації технологічних режимів. Роботу виконано на прикладі ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» як одного з провідних підприємств целюлозно-паперової галузі.

Метою дисертації є підвищення стабільності технологічного процесу та зменшення частки браку шляхом автоматизації контролю якості, зокрема параметрів маси 1 м^2 і вологості, з подальшою інтеграцією результатів вимірювань у контури керування виробництвом. Об'єктом дослідження є автоматизована система контролю якості. Предметом дослідження є її властивості та характеристики, що визначають точність, надійність і придатність до інтеграції в АСУ ТП папероробної машини.

У роботі виконано аналіз технологічного процесу та існуючих підходів до лабораторного й онлайн-контролю, визначено критичні параметри й точки контролю. Розроблено концепцію системи на базі сканувальної платформи поперечного профілю з вимірювальними каналами маси 1 м^2 і вологості, сформовано структурну та функціональну схеми, обґрунтовано вибір датчиків і програмно-технічних засобів. Окремим результатом є стартап-проект комерціалізації рішення у вигляді продукту «CelluScan» — модульної системи онлайн-контролю маси 1 м^2 і вологості з аналітикою для технологічних служб і підрозділів контролю якості.

Загальний обсяг роботи становить 126 сторінок, містить 11 рисунків, 34 таблиці, 11 формул, 4 додатки; список використаних джерел — 42.

Ключові слова: автоматизація, контроль якості, целюлозно-паперова промисловість, QCS, сканувальна платформа, маса 1 м^2 , вологість, папероробна машина, онлайн-вимірювання, CelluScan.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the development and substantiation of an automated quality control system for pulp-and-paper products, focused on continuous online measurements of key paper web parameters and ensuring prompt stabilization of operating regimes. The study was conducted using PJSC “Kyiv Cardboard and Paper Mill” as a case study, as one of the leading enterprises in the pulp-and-paper industry.

The aim of the thesis is to increase the stability of the technological process and reduce the share of defective products by automating quality control, in particular the basis weight (g/m^2) and moisture content, with subsequent integration of measurement results into production control loops. The object of the research is an automated quality control system. The subject of the research is its properties and characteristics that determine accuracy, reliability, and suitability for integration into the paper machine's process control system.

The thesis includes an analysis of the technological process and existing approaches to laboratory and online control, and identifies critical parameters and control points. A system concept is developed based on a cross-direction profiling scanning platform with measurement channels for basis weight (g/m^2) and moisture; structural and functional diagrams are prepared, and the selection of sensors and hardware/software tools is justified. A separate outcome is a startup project for commercializing the proposed solution as the “CelluScan” product—a modular online system for basis weight and moisture control with analytics for process engineers and quality control departments.

The total volume of the thesis is 126 pages and includes 11 figures, 32 tables, 11 equations, and 4 appendices; the list of references contains 42 sources.

Keywords: automation, quality control, pulp and paper industry, QCS, scanning platform, basis weight (g/m^2), moisture, paper machine, online measurement, CelluScan.

ЗМІСТ

Вступ	8
1. Теоретичні основи та аналіз існуючих систем контролю якості целюлозної продукції.....	10
1.1. Загальна характеристика целюлозно-паперової промисловості та технологія виробництва целюлози	11
1.2. Основні параметри та вимоги якості целюлозної продукції	13
1.3. Автоматизовані методи контролю якості та їх розвиток.....	15
1.3.1 Переваги автоматизованих методів контролю якості	16
1.3.2 Недоліки та обмеження автоматизованих систем контролю	17
1.4. Сучасні автоматизовані системи контролю якості на основі сканувальних платформ	18
1.5. Переваги та недоліки існуючих підходів до контролю якості: порівняння та типові проблеми	28
Висновки до першого розділу	31
2. Аналіз об'єкта автоматизації та концепція системи автоматизованого контролю якості целюлозної продукції на ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат».....	34
2.1 Загальна характеристика ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» та об'єкта автоматизації	34
2.2 Аналіз технологічного процесу виготовлення паперу-основи для туалетного паперу на ПрАТ «ККПК»	37
2.3 Характеристика показників якості паперу-основи та існуюча система контролю на ПрАТ «ККПК»	41
2.3.1 Показники якості паперу-основи для туалетного паперу.....	41
2.3.2 Існуюча система контролю показників якості на лінії виготовлення паперу-основи.....	43
2.4 Недоліки існуючої системи контролю якості та постановка задачі автоматизації.....	45
2.4.1 Недоліки існуючої системи контролю якості	46
2.4.2 Постановка задачі автоматизованого контролю якості	48
2.5 Концепція та загальна структура системи автоматизованого контролю якості паперу-основи на ПрАТ «ККПК»	50
2.5.1 Узагальнені вимоги до системи автоматизованого контролю якості..	50
2.5.2 Загальна структурна схема та принцип роботи системи	52
Висновки до розділу	55
3. Розробка системи автоматизованого контролю якості виготовлення паперу-основи	57
3.1 Вихідні дані та вибір параметрів контролю	57
3.2 Вибір та обґрунтування конструкції сканера поперечного профілю	58

3.2.1 Аналіз промислових аналогів	59
3.2.2 Обґрунтування прийнятої конструкції сканера	61
3.3 Вибір датчиків маси 1 м ² та вологості	62
3.3.1 Вибір датчика маси 1 м ²	63
3.3.2 Вибір датчика вологості полотна	65
3.4 Розрахунок параметрів сканування та часових характеристик вимірювання.....	67
3.4.1 Геометричні параметри поперечного сканування	67
3.4.2 Час сканування та «крок» за часом	67
3.4.3 Кількість відліків для усереднення в одній CD-точці.....	68
3.4.4 Оцінка зменшення випадкової похибки за рахунок усереднення	69
3.5 Розрахунок діапазонів, чутливості та похибок вимірювальних каналів	71
3.5.1 Канал маси 1 м ²	71
3.5.2 Канал вологості	74
3.6 Перевірка досягнення вимог до якості та техніко-економічне узагальнення.....	76
3.6.1 Перевірка виконання метрологічних вимог	76
3.6.2 Техніко-економічне узагальнення очікуваного ефекту	77
Висновки до розділу	79
4. Розробка стартап-проєкту «CelluScan».....	80
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту.....	80
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту «CelluScan» ..	87
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту ..	102
4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту «CelluScan» та оцінювання його економічної ефективності	110
Висновки до розділу	118
Висновок	120
Література	122

Вступ

Сучасні целюлозно-паперові підприємства працюють в умовах зростаючого тиску щодо забезпечення стабільної якості продукції, що є необхідною передумовою збереження конкурентних позицій на ринку. Якість целюлози безпосередньо визначає технічні характеристики кінцевих виробів (паперу та картону) і, відповідно, впливає на рівень задоволеності споживачів. У цьому контексті контроль якості виступає ключовим елементом управління виробництвом, оскільки дає змогу запобігати виникненню браку та зменшувати витрати, пов'язані з переробленням або утилізацією неякісної продукції. Водночас посилення вимог до екологічної безпеки й енергоефективності актуалізує перегляд підходів до контролю: традиційні методи, для яких характерна значна частка ручної праці, дедалі частіше не забезпечують необхідної оперативності та точності. Це негативно позначається на результативності виробничих процесів і підвищує ризики технологічних втрат.

Упровадження автоматизованих систем контролю якості створює можливості для істотного підвищення точності вимірювань, організації безперервного моніторингу параметрів процесу та своєчасного реагування на відхилення технологічного режиму. За таких умов автоматизація у целюлозній промисловості набуває характеру актуального й стратегічно важливого напрямку розвитку.

Метою роботи є розроблення та обґрунтування автоматизованої системи контролю якості виготовлення целюлозної продукції, орієнтованої на підвищення стабільності технологічного процесу та зменшення частки браку.

Для досягнення поставленої мети у дипломній роботі передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати сучасні методи та технічні засоби контролю якості целюлозної продукції;

- дослідити особливості технологічного процесу виробництва целюлози та визначити критичні параметри контролю;
- розробити структурну та функціональну схеми автоматизованої системи контролю якості;
- обґрунтувати вибір датчиків, вимірювального обладнання та програмно-технічних засобів;
- виконати моделювання роботи системи та оцінити її ефективність;
- здійснити економічне обґрунтування доцільності впровадження системи.

Актуальність теми зумовлена потребою підвищення конкурентоспроможності підприємств у сучасних умовах, зростанням вимог до якості продукції, а також необхідністю впровадження енергоефективних технологічних рішень.

1. Теоретичні основи та аналіз існуючих систем контролю якості целюлозної продукції

У цьому розділі подано теоретичні засади дослідження, що стосується автоматизації системи контролю якості виготовлення целюлозної продукції. Якість целюлозної маси та паперових виробів є визначальним чинником конкурентоспроможності підприємства, оскільки вона формує експлуатаційні властивості продукції, впливає на стабільність технологічного процесу, рівень витрат сировини та енергоресурсів, а також забезпечує відповідність вимогам національних і міжнародних стандартів. У зв'язку з цим на початковому етапі роботи доцільним є узагальнення й аналіз сучасних підходів до контролю якості, що застосовуються у целюлозно-паперовій промисловості, з подальшим визначенням аспектів, які потребують удосконалення шляхом автоматизації.

Виробництво целюлозної продукції характеризується багатостадійністю технологічного процесу, що охоплює підготовку волокнистої сировини, формування полотна, пресування, сушіння, а також можливі операції калібрування й оздоблення. На кожній стадії змінюються фізико-хімічні властивості маси та напівфабрикатів, що безпосередньо відображається на показниках якості кінцевого продукту. Відповідно, система контролю якості повинна забезпечувати не лише оцінювання готової продукції, але й моніторинг проміжних стадій із можливістю оперативного коригування режимів роботи обладнання.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про технологічний процес виробництва целюлозної продукції та основні показники якості волокнистої маси, які є критичними для подальшого перетворення маси у паперове полотно. Окремий акцент зроблено на характеристиці параметрів, що можуть виступати об'єктами автоматизованого контролю, а також на

аналізі їх впливу на стабільність роботи машинного обладнання та якість готової продукції.

Далі здійснюється аналіз традиційних і автоматизованих методів контролю якості, що застосовуються в галузі. Порівнюються можливості лабораторного контролю та онлайн-вимірювань, визначаються їх переваги й обмеження, а також обґрунтовується доцільність комбінованого підходу, за якого лабораторні дані виконують роль еталонних значень для калібрування та верифікації автоматизованих систем. На підставі наведеного аналізу розглядаються сучасні автоматизовані системи контролю якості, зокрема рішення на основі сканувальних платформ, що забезпечують безперервний моніторинг параметрів полотна у машинному та поперечному напрямках.

Узагальнення теоретичних положень, викладених у розділі, формує необхідне підґрунтя для вибору об'єкта автоматизації та визначення вимог до системи контролю якості, яку передбачається розробити в магістерській роботі. Отримані результати буде використано в наступних розділах для аналізу технологічного процесу на конкретному підприємстві, оцінювання стану чинної системи контролю якості та обґрунтування напрямів її модернізації.

1.1. Загальна характеристика целюлозно-паперової промисловості та технологія виробництва целюлози

Целюлозно-паперова промисловість є галуззю, що забезпечує хімічну або механічну переробку деревини (а також інших видів рослинних волокон — соломи, очерету, трав тощо) у волокнисту масу (пульпу). Надалі з пульпи отримують целюлозу, папір, картон, штучні волокна та інші матеріали. Як основна сировина, як правило, використовується деревина у вигляді тріски або стружки [1].

Технологічний процес виробництва целюлози зазвичай включає такі основні стадії: заготівля сировини → підготовка (подрібнення) → хімічна або

механічна обробка (делігніфікація / подрібнення) → очищення / відмивання → формування пульпи → сушіння / подальша обробка.

Одним із найбільш поширених методів отримання целюлози є сульфатний процес (kraft-процес). У межах цього процесу деревну щепу обробляють варильним розчином, до складу якого входять гідроксид і сульфід натрію (NaOH та Na_2S). Метою є розчинення лігніну та частини геміцелюлоз із подальшим вивільненням целюлозних волокон. Сульфатний процес нині є домінуючим у світовій практиці, оскільки придатний для широкого спектра порід деревини та забезпечує формування волокон із належними механічними властивостями [2].

Хімічна обробка у складі процесу передбачає кілька послідовних операцій. На початковому етапі відбувається просочення щепи варильним розчином, після чого здійснюється хімічний гідроліз: лігнін і геміцелюлози переходять у розчин, тоді як целюлозні волокна переважно зберігаються. Після завершення варіння виконують промивання та відділення пульпи від відпрацьованого розчину, очищення, а за потреби — додаткові операції, зокрема відбілювання або стабілізацію [3].

Поряд із сульфатним процесом застосовуються й інші технології, зокрема кислотні/сульфітні процеси (для певних видів пульпи), а також методи із використанням органічних розчинників. Останні розглядаються як підхід, що може забезпечувати отримання пульпи з меншим вмістом домішок і потенційно нижчим екологічним навантаженням [4].

Вибір конкретного методу визначається призначенням целюлози (папір, картон, високоякісні волокна, розчинна пульпа тощо), вимогами до чистоти, міцності та структури волокон, а також критеріями економічної доцільності й дотриманням екологічних нормативів [5].

Виробництво пульпи належить до енерго- та ресурсомістких процесів, що потребують значних обсягів реагентів, води й енергії. Досягнення заданих показників якості та відтворюваності продукції потребує стабільного

контролю технологічних параметрів (температури, концентрації варильного розчину, тривалості варіння тощо). Порушення режимів або нестабільність на етапі варіння (неповна делігніфікація, надмірне розщеплення компонентів, недостатнє промивання) здатні погіршувати механічні та фізико-хімічні властивості целюлози, що, у свою чергу, негативно відображається на якості паперу чи іншої кінцевої продукції [6].

1.2. Основні параметри та вимоги якості целюлозної продукції

Якість целюлозної продукції (пульпи) оцінюється за набором фізико-хімічних та технологічних характеристик, від яких залежать властивості кінцевого продукту (паперу, картону тощо). До ключових параметрів належать:

Таблиця 1.1 Основні якісні показники пульпи

Параметр / показник	Значення / вимога / роль
Вміст альфа-целюлози (α -cellulose)	Для розчинної пульпи (для волокон, целюлозних ниток тощо) α -целюлоза має бути дуже високою — зазвичай $> 90\%$.
Вміст геміцелюлоз та лігніну	Низький — для чистої пульпи, щоб підвищити однорідність, стабільність властивостей.
Ступінь делігніфікації / параметр, що характеризує залишковий лігнін (наприклад, число Карра)	Типово для пульпи з оптимальним балансом «якість — вихід» число Карра $\approx 45\text{--}46$.
Молекулярна маса, ступінь полімеризації (DP), розподіл молекулярної ваги	Важливі для целюлози, яка буде використовуватись як розчинна пульпа або для спеціальних волокон — впливають на міцність, однорідність, реакційну здатність.
Вологість пульпи / вологоутримання	Важливо для подальшої обробки, сушіння, зберігання — зайва волога може погіршити властивості або спровокувати дефекти. (методи вимірювання можуть бути стандартні; для сучасного контролю — онлайн-методи).
Щільність, рівномірність структури волокон, однорідність маси	Визначає механічні властивості кінцевого паперу / картону: міцність, стійкість, водовіддачу тощо.
Освітлення / білизна, чистота, відсутність домішок (лігнін, залишки хімікатів, частинок недовареної сировини)	Важливо для кінцевих паперових продуктів — особливо для друкарського, письмового, картонного паперу, де потрібні стабільні оптичні та механічні властивості.

- Наприклад, для «розчинних» пульп, призначених для виробництва волокон (віскози, целюлозних ниток), висуваються підвищені вимоги до складу та структури: вміст α -целюлози має перевищувати 90%, тоді як частка геміцелюлоз і лігніну повинна бути мінімальною; додатково важливими є вузький розподіл молекулярної маси та висока ступінь полімеризації.

- Для пульп, що використовуються у виробництві паперу та картону, ключового значення набуває забезпечення раціонального балансу показників. Збереження певної частки геміцелюлоз і залишкових компонентів може підвищувати вихід продукту з деревини (yield), однак їх надмірний вміст здатний негативно впливати на міцнісні характеристики та технологічну стабільність.

- Якість паперу або картону є похідною від якості пульпи. Зокрема, якість пульпи визначає такі характеристики кінцевого продукту [7]:

- **механічні властивості паперу:** міцність на розрив, характер формування волоконної структури, опір роздиранню, стійкість до експлуатаційних навантажень;

- **внутрішню однорідність:** рівномірність товщини, щільності та структури волокон, що впливає на гладкість, стабільність геометричних розмірів, а також якість друку чи нанесення покриттів;

- **хімічну чистоту та оптичні показники:** білизну, відсутність дефектів і домішок, що є критичним для паперу письмового, друкарського, пакувального призначення, а також для волоконних і спеціальних продуктів.

- З огляду на складність процесу та високу чутливість якості до коливань технологічних режимів, у сучасних виробництвах дедалі ширше застосовуються автоматизовані й інструментальні методи контролю. До таких рішень, зокрема, належать:

- **Near Infrared Spectroscopy (NIRS)** — спектроскопічний метод, який забезпечує швидке, неруйнівне визначення комплексу параметрів (вмісту целюлози, геміцелюлоз, лігніну, вологості тощо). Порівняно з традиційними

«мокрими» лабораторними методами це дає змогу істотно скоротити тривалість контролю та підвищити його оперативність [8].

•**автоматизовані системи контролю якості**, що поєднують датчики, онлайн-моніторинг і цифрову обробку даних, забезпечуючи безперервний контроль у процесі виробництва. Такий підхід сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу та однорідності готової продукції [9].

1.3. Автоматизовані методи контролю якості та їх розвиток

Розвиток целюлозно-паперової промисловості супроводжується посиленням вимог до стабільності показників якості, зниженням варіабельності параметрів полотна та підвищенням ефективності використання сировини й енергоресурсів. За таких умов традиційні лабораторні методи контролю дедалі частіше не забезпечують необхідної оперативності та достатньої повноти інформації про перебіг процесу. Це зумовило перехід до автоматизованих методів контролю якості, які функціонують у режимі реального часу, інтегруються із системами керування технологічними процесами та створюють передумови для реалізації концепції «інтелектуального» виробництва.

Ключовим елементом сучасних систем контролю якості є Quality Control System (QCS) — система, призначена для безперервного вимірювання та керування параметрами полотна у двох напрямках: машинному (MD) і поперечному (CD). На відміну від класичних систем автоматичного регулювання, що здебільшого оперують усередненими в часі значеннями, QCS формує профілі якості по ширині полотна та у часовому вимірі, забезпечуючи комплексне уявлення про стан процесу. У типовій конфігурації QCS містить сканувальну раму з набором онлайн-датчиків (маси на одиницю площі, вологості, товщини, зольності, білизни), контролер, модулі профільного керування (MD/CD-контролі) та операторську станцію для візуалізації і подальшого аналізу даних.

Провідні виробники обладнання (Valmet, ABB тощо) пропонують комплексні рішення, що поєднують вимірювальні модулі, профілювальні виконавчі механізми та програмні засоби оптимізації. Зокрема, Valmet IQ Quality Management System забезпечує повний комплекс контролю якості — від підготовки волокнистої маси до отримання готового паперового полотна — включаючи сканери, мультипараметричні датчики, CD/MD-контролі та інструменти візуалізації показників якості [10]. Аналогічно, ABB Ability™ Quality Management System (QMS) реалізує інтегроване керування якістю шляхом об'єднання QCS, DCS, MES і модулів аналізу якості, що дає змогу здійснювати керування процесом на основі єдиного інформаційного простору [11].

Важливою тенденцією розвитку автоматизованих методів контролю є застосування інтелектуальних алгоритмів — багатозмінного оптимального керування (MPC), адаптивних моделей, а також інструментів машинного навчання для прогнозування параметрів якості та виявлення прихованих закономірностей у масивах технологічних даних. Це забезпечує перехід від реактивного керування (реагування на вже наявні відхилення) до прогнозно-попереджувального підходу, за якого система коригує режими роботи ще до того, як відхилення набудуть критичного характеру.

1.3.1 Переваги автоматизованих методів контролю якості

Запровадження автоматизованих вимірювальних комплексів забезпечує виробництву низку суттєвих переваг, серед яких:

1) Безперервність і висока частота вимірювань. Системи функціонують у режимі онлайн, що дозволяє отримувати актуальні дані з мінімальною затримкою. Це особливо важливо у високошвидкісних папероробних машинах, де ситуація може змінюватися щосекунди.

2) Об'єктивність даних і мінімізація людського фактору. На відміну від лабораторних аналізів, результати яких можуть залежати від оператора,

автоматизовані системи працюють за стабільними алгоритмами й забезпечують високу повторюваність вимірювань.

3) Побудова профілів якості у двох напрямках (MD/CD). Сканувальні рамки дозволяють отримувати детальні карти розподілу параметрів полотна, що неможливо при вибіркового лабораторного контролю.

4) Можливість інтеграції з системами керування технологічними процесами. Завдяки обміну даними через промислові протоколи (Profibus, OPC UA, Modbus TCP тощо) системи можуть автоматично коригувати режими сушіння, подачу маси, положення регулювальних лопатей та ін.

5) Підвищення якості кінцевої продукції. Автоматизація дозволяє суттєво знизити варіабельність властивостей полотна, мінімізувати дефекти та стабілізувати випуск продукції у межах встановлених стандартів.

6) Економічні переваги. Завдяки зменшенню браку, зниженню витрат енергії та матеріалів, оптимізації роботи сушильної частини та зменшенню технологічних зупинок.

1.3.2 Недоліки та обмеження автоматизованих систем контролю

Попри істотні переваги, автоматизовані системи мають і низку обмежень, які необхідно враховувати при їх впровадженні та експлуатації:

1) Висока вартість обладнання та впровадження. Сканувальні рамки, датчики β -випромінювання, NIR-модулі та програмні компоненти належать до високотехнологічних систем, що потребують значних капітальних вкладень.

2) Потреба у регулярному обслуговуванні та калібруванні. Точність вимірювань залежить від стану датчиків, чистоти оптичних вікон, стабільності роботи електроніки та коректності калібрувальних кривих.

3) Чутливість до забруднень та умов довкілля. Наявність пилу, водяної пари, вібрацій або підвищених температур може негативно впливати на роботу вимірювальної головки.

4)Складність інтеграції з існуючими технологічними процесами. У разі модернізації старих виробництв можуть виникати проблеми з поєднанням різних типів обладнання, протоколів та контролерів.

5)Необхідність високої кваліфікації персоналу. Оператори повинні володіти знаннями щодо інтерпретації профілів MD/CD, роботи програмного забезпечення та принципів адаптивного регулювання.

6)Обмеження у вимірюваних параметрах. Більшість QCS-систем вимірюють фізичні параметри (вологість, масу, товщину), але не можуть визначати хімічний склад волокна або складні структурні характеристики без залучення додаткових лабораторних методів.

1.4. Сучасні автоматизовані системи контролю якості на основі сканувальних платформ

Сучасні системи контролю якості в целюлозно-паперовій промисловості ґрунтуються на сукупності вимірювальних і керувальних засобів, інтегрованих у єдину Quality Control System. На відміну від традиційних підходів, які здебільшого орієнтовані на контроль у часовому вимірі, QCS забезпечує безперервне вимірювання параметрів полотна одночасно в машинному та поперечному напрямках. Реалізація такого підходу здійснюється із застосуванням сканувальних платформ, на яких розміщуються багатопараметричні датчики.

Сканер виконує функцію рухомої вимірювальної платформи: вимірювальна головка з датчиками періодично переміщується від однієї крайки полотна до іншої, формуючи CD-профілі показників маси на одиницю площі, вологості, товщини, зольності, білизни, кольору тощо. У поєднанні з усередненням у часі це дає змогу отримати комплексне уявлення про розподіл показників якості по всій ширині полотна та вздовж його довжини. Зібрана інформація надходить до контролера QCS, у якому реалізуються алгоритми MD- та CD-керування; далі, через профілювальні

виконавчі механізми (розподільні елементи напірного ящика, парові або інфрачервоні зони сушіння, каландрові секції тощо), здійснюється автоматичне коригування технологічних режимів.

Отже, сканувальна платформа виступає центральною ланкою системи керування якістю, оскільки саме вона забезпечує надходження актуальних даних про фактичні параметри полотна. Це створює передумови для переходу від суто реактивного керування до прогностно-попереджувального підходу, коли корекція режимів виконується до того, як відхилення набудуть критичного характеру.

Valmet IQ. Характерним прикладом систем такого класу є Valmet IQ Quality Control System, у складі якої застосовується сімейство сканерів Valmet IQ Scanner (зокрема моделі IQ Scanner L, IQ Single-Sided Scanner тощо). Valmet IQ QCS орієнтована на комплексне керування показниками якості від «мокрого» до «сухого» кінця папероробної машини, інтегрується із системою керування Valmet DNA та підтримує концепцію Industrial Internet для віддаленого моніторингу й аналітики.

Сканери Valmet IQ Scanner конструктивно виконуються у вигляді жорстких рам (O-frame або C-frame) і забезпечують край-у-край сканування для ширини полотна приблизно від 1,5 до понад 10 м (залежно від модифікації). Модель IQ Scanner, наведена на рис. 1.1, позиціонується як базове рішення («робоча» конфігурація) системи та може комплектуватися до восьми вимірювальних модулів на одній рамі; при цьому конструкція забезпечує підвищену жорсткість, стійкість до впливу пилу й вологи, а також зручність сервісного доступу [12].



Рис. 1.1 – Загальний вигляд сканера Valmet IQ Scanner L.

Однією з визначальних характеристик сканерів **Valmet IQ** є реалізація адаптивного сканування: швидкість переміщення вимірювальної головки, час її перебування в зоні крайок полотна, а також профілі розгону й гальмування автоматично коригуються відповідно до поточного стану процесу (пуск, вихід після розриву полотна, перехід на іншу марку, стабілізований режим роботи). У перехідних режимах система підвищує частоту оновлення CD-профілів, тоді як у стаціонарних умовах забезпечується оптимальне усереднення MD-параметрів.

Вимірювальні модулі, що встановлюються на Valmet IQ Scanner, охоплюють широкий перелік контрольованих показників, зокрема:

- маса на одиницю площі (включно з безрадіаційними датчиками волокнистої маси);
- вологість (NIR-, мікрохвильові та інші методи);
- товщина (caliper-датчики різних типів);
- зольність, білизна, колір, оптичні характеристики;
- параметри покриттів (coat weight, товщина бар'єрних шарів тощо).

Завдяки модульній побудові платформи на одній рамі може бути змонтовано декілька датчиків, що дає змогу формувати мультипараметричний профіль якості. У такому випадку кожен контрольований параметр відображається окремою кривою, а оператор отримує можливість оцінювати їх взаємозв'язки та характер спільних відхилень.

У частині інтеграції сканувальні платформи Valmet IQ Scanner функціонують як складова комплексного рішення: сформовані профілі передаються до модулів MD/CD-керування, результати візуалізуються в інтерфейсі Valmet DNA User Interface, а дані можуть архівуватися та передаватися до хмарних сервісів для поглибленої аналітики й формування рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи обладнання. Таким чином, Valmet IQ Scanner є показовим прикладом сучасної сканувальної платформи, що поєднує механічну надійність, гнучкість конфігурації вимірювань, адаптивні режими сканування та глибоку інтеграцію із системами керування.

Аналогічним прикладом комплексного підходу до контролю якості є ABB Ability™ Quality Management System, орієнтована на целюлозно-паперові підприємства. Система забезпечує моніторинг, вимірювання, керування та оптимізацію показників якості в межах усього виробничого ланцюга — від підготовки волокнистої маси до випуску готового полотна. Її архітектура передбачає тісну взаємодію онлайн-вимірювань, процесних і якісних контурів регулювання, а також модулів виявлення та корекції дефектів.

У складі ABB Ability™ QMS ключову роль відіграє Quality Control System, що об'єднує сканери, датчики та виконавчі механізми. QCS забезпечує формування CD- та MD-профілів основних параметрів (маси, вологості, товщини та інших властивостей полотна). На основі цих даних реалізуються алгоритми профільного керування, зменшується варіабельність

показників і забезпечується відповідність продукції заданим специфікаціям за умови мінімізації витрат.

Якщо потрібно, може також зробити варіант із більш “щільною” науковою подачею (менше описовості, більше термінологічної компактності) або, навпаки, трохи розширити фрагмент зв'язками між Valmet/ABB та вимогами до алгоритмів MD/CD-регулювання в межах вашої системи.

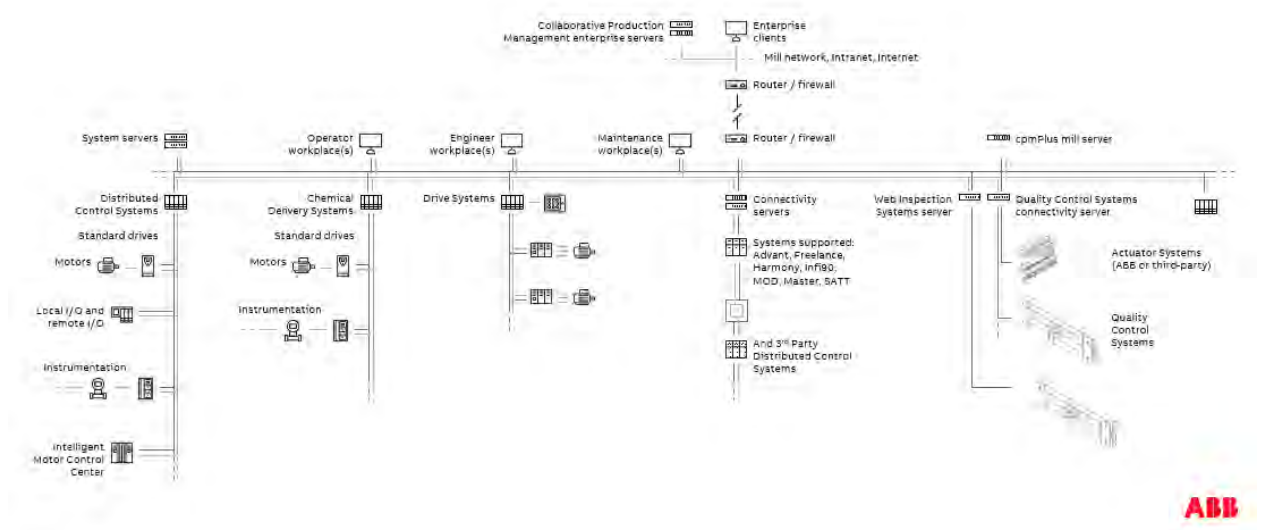


Рис. 1.2 – Загальний вигляд системи ABB Ability™ Quality Management System для целюлозно-паперового виробництва.

Особливістю ABB Ability™ QMS є глибока інтеграція з рівнями керування DCS та MES, що дозволяє:

- одержувати повну картину стану процесу й якості продукції;
- швидко встановлювати причини виникнення відхилень;
- скорочувати час реакції на проблеми за рахунок єдиного інформаційного простору;
- оптимізувати перехідні режими та зменшувати кількість розривів полотна.

Додатково ABB пропонує модулі розширеної аналітики та оптимізації, які дозволяють оцінювати ефективність роботи папероробної машини, налаштовувати регулятори та впроваджувати покращення без масштабних змін апаратної частини.

Ще одним показовим прикладом сучасної системи керування якістю є **Voith OnQuality** зображену на рис. 1.3, яка включає в себе OnQuality.Scanners, OnQuality.Sensors та OnQuality.Controls. Вона розроблена з урахуванням жорстких умов експлуатації на паперових машинах і вже застосована на сотнях об'єктів по всьому світу [13].

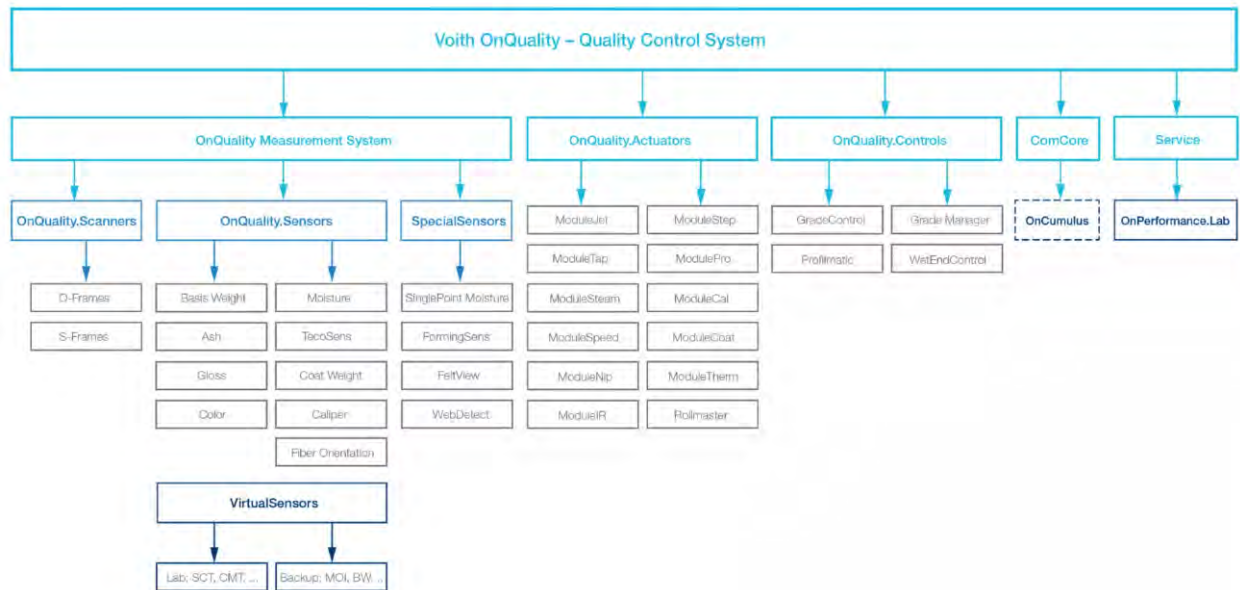


Рис. 1.3 – Система керування якістю Voith OnQuality.

Сканери OnQuality.Scanner характеризуються масивними рамами, високою жорсткістю та компактними габаритами як на рис 1.4, що дозволяє інтегрувати їх навіть у тісні монтажні зони та при підвищених температурах. Доступні як стандартні O-frame, так і односторонні конструкції (C-frame), причому ширина рам може досягати понад 11 м для стандартних виконань. Для підвищення надійності сенсорні модулі можуть монтуватися безпосередньо на рамі (SEB-концепція), а опціональна «гаражна» функція забезпечує захист датчиків у неробочих режимах.



Рис. 1.4 – Загальний вигляд сканера OnQuality.Scanner.

Модульність OnQuality дозволяє комбінувати різні датчики маси, вологості, товщини, зольності та інших параметрів у складі однієї сканувальної системи. Це забезпечує гнучке налаштування під різні види продукції – від тарного картону до спеціальних паперів. На базі платформи ComCore Voith реалізує інтеграцію QCS із загальною системою автоматизації підприємства, включно з візуалізацією, аналітичними панелями та сервісними інструментами.

Практичні приклади впровадження OnQuality (зокрема, на підприємствах Green Bay Packaging, Smurfit Kappa, WEPA та ін.) демонструють зростання операційної ефективності, зменшення варіабельності параметрів та скорочення витрат після заміни старих QCS-систем на нове покоління OnQuality.

Система **Honeywell Experion MX** є прикладом тісно інтегрованого рішення, у якому модулі контролю якості безпосередньо включені до платформи керування Experion. У центрі цієї системи лежить концепція “process and quality in one” – оператор отримує єдиний інтерфейс для

керування технологічними параметрами та параметрами якості, без поділу на окремі системи [14].

Особливу увагу в Experion MX приділено керуванню в машинному напрямку (MD), де Honeywell застосовує мультиваріантне модельно-прогнозне керування (MPC). Алгоритм Alpha MPC призначений спеціально для керування складними папероробними процесами з урахуванням обмежень та взаємозалежностей змінних. Такий підхід дозволяє:

- зменшувати варіабельність маси та вологості по довжині полотна;
- знижувати витрати пари, енергії та хімікатів;
- скорочувати обсяги браку під час переходів між марками;
- підтримувати стабільність процесу при змінних умовах.



Рис. 1.5 – Загальний вигляд сканерів Honeywell Experion.

У складі **Honeywell Experion MX** застосовуються сканувальні платформи (рис. 1.5) та лінійка інтелектуальних датчиків, що забезпечують

вимірювання ключових властивостей паперу. Система підтримує модельно-прогнознi контури CD- та MD-керування, сервіси діагностики сканерів і датчиків, а також інструменти налаштування й оптимізації регуляторів. Усі зазначені компоненти інтегровані в єдину інфраструктуру DCS із підтримкою стандартних OPC-інтерфейсів, засобів віртуалізації та сервісного супроводу.

За результатами аналізу сучасних промислових рішень для автоматизованого контролю якості целюлозної продукції можна зробити висновок, що розглянуті системи — Valmet IQ Quality Control System, ABB Ability™ QMS, Voith OnQuality та Honeywell Experion MX — реалізують спільну концептуальну основу. Вона передбачає використання сканувальних платформ із багатопараметричними датчиками, поєднання онлайн-вимірювань з алгоритмами MD/CD-керування, а також тісну інтеграцію з системами автоматизації вищого рівня (DCS, MES, аналітичні інструменти).

Водночас кожен виробник застосовує власні підходи до конструкції сканувальних платформ, конфігурації вимірювальних модулів, архітектури програмного забезпечення та реалізації алгоритмів оптимізації. Зокрема, у рішеннях Valmet акцент робиться на глибокій інтеграції з Valmet DNA та можливостях Industrial Internet; ABB орієнтується на платформу Ability™ з розширеними засобами аналітики та інтеграцією з 800xA; Voith пропонує OnQuality у межах єдиної екосистеми OnPlatform; Honeywell реалізує концепцію об'єднання процесного керування та керування якістю в межах Experion MX, зокрема із застосуванням розвинених MPC-алгоритмів для керування в машинному напрямку.

З огляду на наведене, порівняльний аналіз ключових характеристик зазначених систем є важливим етапом формування вимог до системи контролю якості, що розробляється у межах магістерської роботи. Для підвищення наочності доцільно узагальнити спільні риси та відмінності основних рішень у вигляді порівняльної таблиці.

Таблиця 1.2 – Порівняння сучасних систем автоматизованого контролю

Система	Виробник	Основні функції та вимірювання	Особливості сканувальної платформи	Інтеграція та ПЗ
Valmet IQ Quality Control System	Valmet	Онлайн-вимірювання маси, вологості, товщини, зольності, білизни, параметрів покриттів; MD/CD-керування, профільний контроль, аналітика якості.	Сканери Valmet IQ Scanner (L, Single-Sided, Converting); адаптивне edge-to-edge сканування, до 8 датчиків на рамі, підготовка до Industrial Internet.	Повна інтеграція з Valmet DNA, підтримка веб-інтерфейсу, хмарних сервісів та аналітики VII.
ABB Ability™ QMS	ABB	Комплексний контроль якості: QCS (сканери, датчики, приводи), онлайн-вимірювання профілів, дефектоскопія, підтримка MD/CD-контролів.	QCS включає сканувальні рами з датчиками маси, вологості, температури, з можливістю розширення; використання датчика HPIR-FW для одночасного вимірювання вологості й маси.	Тісна інтеграція з DCS 800xA, MES та сервісами ABB Ability; підтримка аналітики переходів та оптимізації процесу.
Voith OnQuality	Voith	Вимірювання маси, вологості, товщини, зольності, кольору, глянце, профільне керування якості, оптимізація поперечного та машинного профілів.	Сканери OnQuality.Scanners з високою швидкістю сканування (до ~600 мм/с), рамами до ~14,6 м; підтримка широкого набору датчиків OnQuality.Sensors.	Побудова на платформі ComCore, інтеграція з іншими рішеннями Voith (OnEfficiency, OnCare) та хмарними сервісами.
Experion MX QCS	Honeywell	Контроль якості паперу з акцентом на MD-оптимізацію: модельно-прогнозне керування ваговмістом, вологістю, енергоспоживанням, швидкісні переходи між марками.	Сканувальні системи інтегровані в платформу Experion MX; акцент на високій швидкості оновлення профілів та стабільності MPC-алгоритмів.	Повна інтеграція з DCS Experion, єдиний операторський інтерфейс для процесу та якості, підтримка інструментів оптимізації.

1.5. Переваги та недоліки існуючих підходів до контролю якості: порівняння та типові проблеми

У целюлозно-паперовій промисловості склалося кілька основних підходів до контролю якості:

- 1) традиційний лабораторний контроль;
- 2) автоматизований онлайн-контроль на основі QCS-систем;
- 3) комбіновані схеми, що поєднують лабораторний та онлайн-контроль.

Кожен із підходів має свої переваги й обмеження, від яких залежить точність оцінки параметрів, швидкість реагування на відхилення, а також вартість впровадження та експлуатації системи контролю.

Традиційний лабораторний контроль. Традиційний підхід ґрунтується на періодичному відборі зразків паперу або целюлозної пульпи та їх подальшому аналізі в лабораторії. Використовуються стандартизовані методики визначення маси 1 м², товщини, міцнісних показників, зольності, вологості, білизни, а також хімічної чистоти волокна. Такі вимірювання забезпечують високу точність та повторюваність, дозволяють визначати параметри, які принципово складно або неможливо виміряти онлайн (ступінь делігніфікації, детальна зольність, специфічні домішки тощо) [15].

Основні переваги лабораторного контролю:

- 1) Висока точність і чутливість – застосування еталонних методик та каліброваного обладнання забезпечує невелику похибку вимірювань.
- 2) Можливість визначення широкого спектра параметрів, у тому числі хімічних і структурних характеристик волокна.
- 3) Підтримка та калібрування онлайн-систем – лабораторні дані використовуються як еталон при налаштуванні та перевірці автоматизованих засобів контролю.

Водночас лабораторний контроль має істотні **недоліки**:

1) Неоперативність – між відбором проби, проведенням аналізу й отриманням результатів минає значний час; за цей період машина може виробити значний обсяг продукції змінної якості.

2) Відсутність повної картини по ширині полотна – аналізуються окремі зразки, які не відображають просторову неоднорідність параметрів.

3) Залежність від людського фактору – точність може знижуватися через порушення методики відбору проб, помилки персоналу, недотримання умов зберігання зразків.

Автоматизований онлайн-контроль (QCS-системи). Автоматизовані системи контролю якості (QCS, QMS) базуються на безперервних вимірюваннях параметрів полотна за допомогою сканувальних рам із набором датчиків, інтегрованих у систему керування папероробною машиною. Дані щодо маси на одиницю площі, вологості, товщини, зольності, білизни тощо збираються в реальному часі, формуючи MD/CD-профілі, які використовуються для автоматичного регулювання процесу [16].

Основні переваги автоматизованого онлайн-контролю:

1) Безперервність вимірювань – система отримує дані в режимі реального часу по всій ширині полотна, що забезпечує своєчасне виявлення відхилень.

2) Можливість одержання двовимірних профілів якості – дозволяє побачити неоднорідності, локальні дефекти, перекоси профілю, які неможливо виявити лише лабораторними вимірюваннями.

3) Інтеграція з системою керування – результати вимірювань одразу використовуються для формування керуючих впливів (регулювання подачі маси, температури сушіння, тиску в пресах тощо).

4) Скорочення обсягів браку та перехідних втрат – завдяки швидкій реакції на зміну режимів і можливості оптимізації процесу.

Разом з тим, автоматизований онлайн-контроль має свої **обмеження**:

1)Висока вартість придбання та впровадження сканерів, датчиків, контролерів і програмного забезпечення.

2)Потреба в регулярному обслуговуванні і калібруванні – необхідно контролювати стан датчиків, чистоту оптичних вікон, точність калібрувальних кривих.

3)Чутливість до виробничих умов – пил, вологість, вібрації та температурні коливання можуть впливати на точність показників.

4)Обмежений набір параметрів – більшість QCS-систем вимірюють фізичні властивості полотна; детальний аналіз хімічного складу та структури волокна все одно потребує лабораторних методів.

Комбіновані схеми контролю якості та типові проблеми. Найбільш раціональним у сучасних умовах є комбінований підхід, коли лабораторні методи й автоматизований онлайн-контроль взаємодоповнюють один одного. Лабораторні вимірювання у цьому випадку виконують роль еталонних та використовуються:

- для калібрування датчиків і перевірки правильності показань сканерів;
- для поглибленого аналізу специфічних властивостей, які не контролюються онлайн;
- для періодичної верифікації системи контролю якості.

Автоматизовані системи, у свою чергу, забезпечують:

- оперативний контроль і стабілізацію процесу;
- зменшення коливань параметрів між лабораторними перевірками;
- збирання великих масивів даних для аналітики та оптимізації режимів.

Попри очевидні переваги комбінованого підходу, на практиці виникає низка типових проблем:

- Невідповідність між лабораторними даними та онлайн-вимірюваннями. Причинами можуть бути відмінності умов вимірювання (рухоме полотно vs. підготовлений зразок), похибки калібрування, часові зсуви між відбором проби та показаннями сканера.

- Складність інтеграції різних систем і джерел даних. На підприємстві можуть працювати системи різних виробників (Valmet, ABB, Voith, Honeywell), лабораторні інформаційні системи та корпоративні бази даних, що ускладнює уніфікацію форматів даних та алгоритмів аналізу.

- Недостатня якість або частота лабораторного контролю. За відсутності регулярних еталонних вимірювань онлайн-система може працювати з некоректними калібрувальними параметрами, що призводить до накопичення систематичних похибок.

- Низький рівень підготовки персоналу. Відсутність навичок роботи з профілями MD/CD, інтерпретації даних та налаштування регуляторів призводить до неефективного використання потенціалу системи.

Узагальнюючи, можна зазначити, що жоден із підходів (суто лабораторний чи суто автоматизований) не є достатнім сам по собі. Ефективна система контролю якості целюлозної продукції має будуватися на поєднанні переваг обох методів із урахуванням можливостей конкретного підприємства, його технічного оснащення та вимог до продукції. Саме на такому комбінованому підході й базується подальший вибір об'єкта автоматизації та розробка системи вдосконаленого контролю якості у наступних розділах магістерської роботи.

Висновки до першого розділу

У першому розділі розглянуто теоретичні засади, необхідні для подальшого розроблення та обґрунтування системи автоматизованого контролю якості виготовлення целюлозної продукції. Проаналізовано загальні особливості технологічного процесу виробництва целюлози та паперу — від підготовки волокнистої сировини до формування й оздоблення паперового полотна. Показано, що багатостадійність процесу, значна кількість керованих параметрів і тісний взаємозв'язок між окремими технологічними операціями зумовлюють підвищені вимоги до системи

контролю якості, яка повинна не лише фіксувати відхилення, але й забезпечувати можливість оперативної стабілізації технологічних режимів.

Встановлено, що якість целюлозної маси та паперової продукції визначається сукупністю параметрів, зокрема масою 1 м², вологістю, товщиною, зольністю, міцнісними характеристиками, оптичними та структурними показниками. Частина з них може контролюватися безпосередньо в технологічному потоці, тоді як інші потребують лабораторних умов і застосування спеціалізованих методик. Це обумовлює доцільність раціонального розподілу функцій між лабораторним контролем і автоматизованими засобами вимірювання, а також використання комбінованих схем оцінювання якості.

Проведений аналіз засвідчив, що традиційний лабораторний контроль, попри високу точність і можливість визначення широкого спектра показників, не забезпечує достатньої оперативності та повноти інформації щодо поточного стану процесу. Водночас автоматизовані онлайн-системи контролю, побудовані на основі сканувальних платформ і багатопараметричних датчиків, дають змогу здійснювати безперервний моніторинг показників якості в машинному та поперечному напрямках, знижувати варіабельність параметрів, зменшувати обсяги браку та підвищувати стабільність роботи обладнання. Разом із тим їх упровадження пов'язане зі значними капітальними витратами, необхідністю регулярного технічного обслуговування та забезпеченням коректного калібрування.

У розділі також розглянуто сучасні промислові системи контролю якості на основі сканувальних платформ (Valmet IQ, ABB Ability™ QMS, Voith OnQuality, Honeywell Experion MX), які реалізують комплексний підхід до вимірювання та керування параметрами целюлозної продукції. Показано, що, незважаючи на відмінності в реалізації апаратної та програмної складових, усі ці системи базуються на спільних принципах: застосуванні сканерів для формування MD/CD-профілів, інтеграції із системами

автоматизації вищого рівня та використанні розвинених алгоритмів керування й аналітики. Наведений огляд підтверджує доцільність орієнтації на подібні технічні рішення під час розроблення або модернізації систем контролю якості.

Узагальнюючи результати теоретичного аналізу, можна зробити висновок, що ефективна система контролю якості виготовлення целюлозної продукції має ґрунтуватися на поєднанні можливостей лабораторних методів і автоматизованих онлайн-засобів вимірювання, із використанням сучасних підходів до побудови QCS-систем. Отримані у першому розділі висновки формують необхідне науково-методичне підґрунтя для переходу до прикладної частини роботи — аналізу реального технологічного процесу на конкретному підприємстві, оцінювання чинної системи контролю якості та визначення вимог до її подальшої автоматизації й удосконалення в наступних розділах магістерської дисертації.

2. Аналіз об'єкта автоматизації та концепція системи автоматизованого контролю якості целюлозної продукції на ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат»

2.1 Загальна характеристика ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» та об'єкта автоматизації

Приватне акціонерне товариство «Київський картонно-паперовий комбінат» (ПрАТ «ККПК») – одне з найбільших підприємств Східної Європи у целюлозно-паперовій галузі, що здійснює повний цикл виробництва картонно-паперової продукції. Комбінат розташований у місті Обухів Київської області, поблизу Києва, що забезпечує зручну логістичну прив'язку до основних транспортних артерій і споживчих ринків України [17]. Зовнішній вигляд ККПК зображено на рис. 2.1.



Рис. 2.1 – Вигляд ПрАТ “Київський картонно-паперовий комбінат”.

Підприємство входить до австрійської групи компаній Pulp Mill Holding і функціонує як багатoproфільний виробничий комплекс. Структурно комбінат включає картонне виробництво, паперове (tissue) виробництво та виробництво гофротари й формованого пакування. Картонне виробництво спеціалізується на випуску пакувального крейдованого й некрейдованого картону, тарного картону та паперу для гофрування із сумарною потужністю близько 240 тис. т на рік. Паперове виробництво (санітарно-гігієнічний сегмент) випускає папір-основу для товарів масового споживання (туалетний папір, серветки, рушники) та готові вироби із загальною потужністю до 70 тис. т паперу-основи на рік.

Значна частка продукції комбінату – це товари повсякденного попиту: туалетний папір, паперові рушники, серветки, а також пакувальний картон і гофротара. За обсягами виробництва паперових виробів ККПК забезпечує орієнтовно третину ринку паперової продукції України та активно експортує продукцію в інші країни.

У виробництві широко застосовуються як первинна волокниста сировина (целюлоза), так і макулатурна сировина, що забезпечує високий рівень ресурсоефективності та екологічності, зменшуючи навантаження на лісові ресурси й обсяги відходів паперу.

Технологічне обладнання підприємства представлене сучасними паперовими та картоноробними машинами провідних світових виробників (Voith, Gambini, Futura, TMC тощо), лініями переробки макулатури, устаткуванням для виробництва гофрокартону та пакувальних виробів. Значна частина технологічних ліній має високий рівень автоматизації, включаючи застосування промислових контролерів, частотних перетворювачів, систем візуалізації та спеціалізованих систем керування якістю.

У межах даної магістерської роботи як об'єкт автоматизації розглядається ділянка виробництва целюлозної продукції для санітарно-

гігієнічних виробів, що включає підготовку макулатурної маси та виготовлення паперу-основи для туалетного паперу. Технологічно ця ділянка представляє собою послідовність операцій підготовки волокнистої суспензії (розпускання макулатури, очищення від механічних домішок, сортування, згущення, диспергування, розмелювання, акумулювання в басейнах) та подальшого формування паперового полотна на папероробній машині. Структура процесу визначається технологічними схемами підготовчо-розмельного відділення (РПВ) та папероробної машини (ПРМ), які регламентують склад обладнання, послідовність проходження потоків маси і води, а також параметри режимів роботи окремих агрегатів.

Підготовка макулатурної маси здійснюється за багатоступеневою схемою, що включає гідророзбивачі, системи грубого та тонкого очищення, сортувалки, згущувачі, пропарювальні камери, диспергатори, бакові ємності та допоміжні насосні агрегати. На кожній стадії контролюються специфічні параметри: масова частка волокна, ступінь млива, температура, тиск, сухість, концентрація завислих речовин у системі зворотної води тощо. Від стабільності цих показників залежить не лише якість паперу-основи, а й енергоємність процесу, знос обладнання та рівень технологічних втрат.

Папероробна машина (ПРМ-2) перетворює підготовлену волокнисту суспензію на безперервне паперове полотно, яке далі слугує базою для виготовлення туалетного паперу. Згідно з технологічною схемою, до її складу входять вузли формування полотна, пресування, сушіння, можливі елементи каландрування та намотування, а також система обробки й повернення зворотної води. На цій стадії визначальними для якості є маса 1 м² (граматура), поперечна та поздовжня рівномірність, вологість, структурні й міцнісні характеристики.

Особливістю обраного об'єкта є те, що він ґрунтується переважно на макулатурній сировині, а отже, характеризується високою варіабельністю властивостей вихідної маси. Це вимагає від системи керування не тільки

підтримання заданих режимів, а й активного контролю якості на проміжних та кінцевих стадіях з можливістю швидкого коригування параметрів процесу. У той же час, вимоги до якості санітарно-гігієнічної продукції є досить жорсткими: споживчі властивості (м'якість, міцність, водопоглинання), гігієнічна безпечність, стабільність розмірів та маси рулончиків, відповідність національним та європейським стандартам.

Таким чином, ПрАТ «ККПК» виступає високотехнологічним підприємством із розвиненою інфраструктурою переробки макулатури та виробництва целюлозної продукції, а обраний об'єкт автоматизації – ділянка підготовки макулатурної маси та виробництва паперу-основи для туалетного паперу – є критично важливим з точки зору забезпечення якості готових виробів. Саме на цій ділянці зосереджена значна частина факторів, що визначають якість целюлозної продукції, і саме тут доцільно впроваджувати системи автоматизованого контролю, здатні забезпечити безперервний моніторинг ключових параметрів та оперативне управління технологічним процесом. У подальших підрозділах розділу 2 буде детально розглянуто технологічний процес на зазначеній ділянці, існуючу систему контролю якості, її обмеження та сформульовано вимоги до перспективної системи автоматизованого контролю.

2.2 Аналіз технологічного процесу виготовлення паперу-основи для туалетного паперу на ПрАТ «ККПК»

Технологічний процес виготовлення паперу-основи для туалетного паперу на ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» базується переважно на переробці макулатурної сировини та охоплює послідовність операцій підготовки волокнистої суспензії у розмельно-підготовчому відділенні (РПВ-2) і формування паперового полотна на папероробній машині ПРМ-2. Загальну структуру РПВ-2 наведено на технологічній схемі

(додаток А, [22]), а компоновку та принцип роботи ПРМ-2а — на принциповій схемі (додаток Б, [23]).

На етапі підготовки волокнистої суспензії макулатура різних марок (тарна, гофрокартон, біловолокнисті відходи тощо) подається до гідророзбивачів типу ГРГм-40, де відбувається її розпуск у водному середовищі з отриманням суспензії заданої концентрації [19]. Під час розпускання руйнуються міжволоконні зв'язки, частково відокремлюються домішки, а великі включення додатково подрібнюються. Робочі параметри гідророзбивача (температура, концентрація, тривалість розпускання, швидкість обертання ротора) встановлюються технічним регламентом і підлягають постійному контролю з боку операторів та засобів АСУ ТП.

Далі суспензія надходить до системи грубого та тонкого очищення, яка включає гідроциклони, очисники важких і легких домішок, турбосортувалки та ситові апарати. На цій ділянці вилучаються металеві частинки, пісок, скло, пластмаси, клейові та інші сторонні включення, здатні спричиняти забивання сит, прискорений знос обладнання й дефекти поверхні паперу. Якість очищення безпосередньо впливає на стабільність роботи папероробної машини, частоту обривів полотна та рівень якості готової продукції. Режим роботи очисників (тиск, витрата, розрідження) задаються з урахуванням рекомендацій виробників і відображені у специфікації технологічного устаткування [21].

Наступною стадією є згущення та диспергування волокнистої маси. У згущувачах зменшується вміст води до рівня, необхідного для подальшої інтенсивної механічної обробки волокна, а також вилучається частина забрудненої зворотної води з подачею її на систему очищення. Диспергування спрямоване на руйнування клейових і смолистих включень, дрібного сміття та їх рівномірний розподіл у об'ємі суспензії, що знижує ризик локальних дефектів поверхні паперу. Для підвищення ефективності операції застосовуються пропарювальні камери з нагріванням маси до

заданої температури, а також вводяться хімічні реагенти, які поліпшують властивості волокна та зменшують забрудненість системи [20].

Після очищення, згущення та диспергування маса подається на розмелювання. У розмелювальних агрегатах волокна зазнають інтенсивної механічної дії з метою досягнення ступеня млива, встановленого технічним регламентом для відповідної марки продукції. Ступінь млива визначає формувальні та міцнісні властивості паперу-основи, його м'якість, водопоглинання та інші експлуатаційні характеристики. Перемливання призводить до зростання енерговитрат і може погіршувати зневоднення на формувальній частині, тоді як недостатній млів зумовлює зниження міцності та однорідності полотна [18].

Відрозмелена маса надходить до проміжних і машинних басейнів, де відбуваються акумулювання та усереднення за концентрацією, температурою і складом. У цих ємностях формують робочу суміш із заданою часткою макулатурної та, за потреби, первинної целюлозної сировини; додатково вводять наповнювачі, проклеювальні, пом'якшувальні та інші реагенти. Стабільність параметрів у басейнах є визначальною умовою відтворюваності властивостей маси, що подається на папероробну машину, і значною мірою визначає коливання маси 1 м², товщини та вологості готового полотна.

З басейнів маса через напірну систему (насоси, колектори, напірні баки, сортувалка тонкого очищення) подається на розподільну коробку ПРМ-2. У ній формуються необхідні гідродинамічні умови (тиск, турбулентність, рівномірність потоку), які забезпечують рівномірний розподіл суспензії по ширині формувальної частини. Далі суспензія надходить на сітку, де внаслідок гравітаційного стікання, вакуумного відсмоктування та механічних коливань утворюється безперервне волокнисте полотно з частковим видаленням вільної води (додаток Б).

Після формування полотна проходить пресову частину, де стискується між пресовими валами у відповідних секціях, що забезпечує додаткове

зневоднення, підвищення сухості та механічної міцності. Режим пресування (лінійний тиск, швидкість полотна, конструкція пресових сукон) істотно впливають на масу 1 м^2 , товщину та внутрішню структуру паперу-основи.

На сушильній ділянці, яка включає ряд сушильних циліндрів, обдувні ящики та систему вентиляції, вологість доводиться до значень, визначених технічними умовами. Температура й тиск пари в циліндрах, швидкість полотна та параметри вентиляції визначають інтенсивність сушіння, рівномірність розподілу вологості по ширині й довжині полотна та енергоємність процесу.

Завершальним етапом є намотування полотна на машинному накаті в рулони-джамбо з подальшою подачею на конвертингові лінії для виготовлення готового туалетного паперу. На цій стадії контролюються геометричні параметри рулонів (діаметр, щільність намотування), стабільність маси 1 м^2 і вологості по ширині та довжині, а також відсутність обривів і поверхневих дефектів. Частина параметрів контролюється автоматизованими засобами та відображається в системі керування ПРМ, інша — визначається періодичними лабораторними вимірюваннями відповідно до карти контролю технологічного процесу [24].

Таким чином, процес виробництва паперу-основи для туалетного паперу на ПрАТ «ККПК» є багатостадійним, містить значну кількість взаємопов'язаних операцій і параметрів та характеризується високою чутливістю якості кінцевої продукції до змін технологічних режимів на різних ділянках. Це обґрунтовує необхідність створення ефективної автоматизованої системи контролю якості, здатної акумулювати дані з основних стадій виробництва, забезпечувати безперервний моніторинг ключових параметрів і формувати інформаційну основу для подальшої автоматизації керування процесом.

2.3 Характеристика показників якості паперу-основи та існуюча система контролю на ПрАТ «ККПК»

Якість паперу-основи для туалетного паперу на ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» визначається сукупністю фізико-механічних та гігієнічних показників, нормованих відповідно до вимог ДСТУ 4266:2003 «Папір туалетний» та внутрішнього технічного регламенту № 2 підприємства [26]. Для забезпечення відповідності цим вимогам на комбінаті реалізовано багаторівневу систему контролю, що включає лабораторні випробування готового паперу, контроль параметрів на проміжних стадіях технологічного процесу та частковий автоматизований контроль окремих параметрів на папероробній машині.

2.3.1 Показники якості паперу-основи для туалетного паперу

Згідно з технічним регламентом № 2 папір туалетний з макулатури для санітарно-гігієнічних виробів виготовляється за ДСТУ 4266:2003 і поділяється на марки ТМ-23, ТМ-27, ТМ-32, де числовий індекс відповідає **номінальній масі паперу площею 1 м²**. Для кожної марки встановлені допустимі відхилення маси, а також нормовані значення основних показників якості: міцності, капілярного всмоктування, вмісту золи, вологості тощо. Узагальнені вимоги до марок ТМ-23, ТМ-27 та ТМ-32 наведено у табл. 2.1 (на основі таблиці 2.1 технічного регламенту № 2 [25]).

Таблиця 2.1 – Основні показники якості паперу туалетного марок

Найменування показника	ТМ-23	ТМ-27	ТМ-32
Маса паперу площею 1 м ² , г	23,0 ± 2,0 / -2,0	27,0 ± 2,0 / -2,0	32,0 ± 5,0 / -3,0
Ступінь крепування, %, не менше	10,0	10,0	10,0
Руйнівне зусилля, Н, не менше:			
– у машинному напрямку	1,7	2,4	3,0

Продовження таблиці 2.1

– у поперечному напрямку	1,0	1,4	1,7
Капілярне всмоктування (усереднено по двох напр.), мм, не менше	30	30	22
Масова частка золи, %, не більше	4,0	4,0	4,0
Вологість, %	6,0 ± 2,0	6,0 ± 2,0	6,0 ± 2,0

У технічному регламенті для кожного з показників вказані стандартизовані методи випробувань, наприклад:

визначення маси 1 м² – за ДСТУ 2297-93, руйнівного зусилля – за ДСТУ 2334-94, капілярного всмоктування – за ГОСТ 12602-93, масової частки золи – за ГОСТ 7629-93, вологості – за ГОСТ 13525.19-91 [26]. Це забезпечує уніфікованість лабораторних методик та юридичну коректність результатів при прийманні продукції.

З точки зору функціонального значення для кінцевого споживача:

- Маса 1 м² визначає витрату волокнистої сировини, відчуття «щільності» та «повноти» паперу. Надмірна маса збільшує собівартість, недостатня – погіршує тактильні та міцнісні властивості.

- Ступінь крепування та руйнівне зусилля характеризують механічну міцність. Недостатні значення призводять до розриву полотна під час виробництва та до дискомфорту при використанні.

- Капілярне всмоктування відображає здатність паперу поглинати вологу. Занадто низьке всмоктування погіршує функціональні властивості, занадто високе може негативно позначатися на міцності.

- Масова частка золи впливає на м'якість, знос обладнання та чистоту системи; завищений вміст золи може призводити до надмірного абразивного впливу на сукна, сітки та ножі.

- Вологість готового паперу визначає його стабільність при зберіганні, поведінку при перемотуванні та комфорт використання. Вихід вологості за

регламентовані межі веде до деформацій рулонів, зміни маси, розшаровування тощо.

2.3.2 Існуюча система контролю показників якості на лінії виготовлення паперу-основи

Система контролю якості на ПрАТ «ККПК» побудована як поєднання:

- технологічного контролю за стадіями процесу згідно з інструкцією «Контроль технічного процесу по стадіях виробництва туалетного паперу» (форма 9.1) [27];
- лабораторних випробувань готового паперу та напівфабрикатів за стандартами ДСТУ та ГОСТ;
- часткового автоматизованого контролю окремих параметрів у складі АСУ ТП папероробної машини ПРМ-2 [28].

Карта контролю містить точки для кожної стадії. У табл. 2.2 узагальнено ключові точки контролю, що найбільше впливають на якість паперу-основи.

Таблиця 2.2 – Основні точки технологічного контролю якості при виробництві паперу-основи

Стадія / вузол	Контрольований показник	Робочий діапазон (норма)	Частота контролю	Засіб / метод контролю
Гідророзбивач ГРГм-40	Масова частка волокна, %	3,0–3,5	За вимогою	Лабораторний аналіз (методика «УкрНДІБ»)
Млини МДС-24	Масова частка волокна, %; ступінь млива, °ШР	3,5–4,5; 40–45	1 раз на зміну	Лабораторні методики «УкрНДІБ»
Басейн розмеленої маси	Масова частка волокна, %	3,5–4,5	За вимогою	Лабораторний аналіз
Басейн зворотної води	Масова частка волокна, %, не більше	≤ 0,3	За вимогою	Лабораторний аналіз, «УкрНДІБ»
Термодисперсійна установка (ТДУ)	Масова частка волокна до й після згущення, %	4,0–6,0; 16–18	За вимогою	Лабораторний аналіз

Продовження таблиці 2.2

Очисники «METSO» (ступені очищення)	Масова частка волокна у відходах, %	1,41; 1,25; 0,98 (для різних ступенів)	За вимогою	Лабораторний аналіз
Папероробна машина ПРМ-2	Маса 1 м ² , г; вологість полотна, %	Згідно ТМ-марки та регламенту	Періодично / за графіком	Лабораторні випробування та покази приладів АСУ ТП

Таким чином, основний акцент існуючої системи контролю якості зроблено на:

- дискретному лабораторному контролі концентрації волокна, ступеня млива, вмісту волокна у зворотній воді, ефективності очищення, а також показників якості готового паперу (маса 1 м², міцність, капілярне всмоктування, зольність, вологість);

- технологічному контролі параметрів режимів (тисків, температур, витрат, швидкості машини), що реалізується засобами АСУ ТП ПРМ-2 та локальними приладами.

На папероробній машині встановлені стандартні вимірювальні прилади та регулятори, які забезпечують автоматичну підтримку основних технологічних параметрів (швидкість полотна, витрату маси, параметри сушіння тощо). Разом з тим інформація про якість готового паперу в більшості випадків надходить із запізненням – у вигляді результатів лабораторних аналізів, які виконуються з періодичністю, заданою картою контролю. Це призводить до того, що між моментом виникнення відхилення параметрів якості та моментом прийняття коригувальних дій може проходити значний час, протягом якого виготовляється продукція з нестабільними характеристиками.

Окрім часових затримок, до недоліків чинної системи можна віднести:

- відсутність безперервного поперечного контролю маси 1 м^2 та вологості по ширині полотна – оцінка рівномірності виконується переважно за лабораторними зразками, що не відображають повну картину;

- обмежену можливість оперативної візуалізації трендів якості в машинному напрямку (MD) у режимі реального часу;

- значну залежність від людського фактору (правильність відбору проб, своєчасність проведення аналізів, інтерпретація результатів), що може призводити до суб'єктивних помилок.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що існуюча система контролю якості на ПрАТ «ККПК» забезпечує повноту контролю по стадіях виробництва і дозволяє підтверджувати відповідність готової продукції вимогам стандартів. Разом з тим відсутність безперервного онлайн-контролю ключових показників якості по ширині та довжині полотна, часові затримки, пов'язані з лабораторними вимірюваннями, та залежність від людського фактору створюють передумови для подальшої автоматизації системи контролю якості. Ці недоліки будуть детально проаналізовані й формально сформульовані у наступному підрозділі, присвяченому постановці задачі автоматизації.

2.4 Недоліки існуючої системи контролю якості та постановка задачі автоматизації

На основі аналізу технологічного процесу та чинної системи контролю показників якості можна зробити висновок, що на ПрАТ «ККПК» забезпечується виконання вимог нормативної документації щодо якості готової продукції. Водночас структура контролю побудована переважно на дискретних лабораторних вимірюваннях та окремих технологічних показниках, що обмежує можливості оперативного керування якістю у режимі реального часу. Це створює передумови для подальшої автоматизації системи контролю якості паперу-основи, зокрема шляхом запровадження

безперервного вимірювання ключових параметрів полотна та їх інтеграції в контури керування технологічним процесом.

2.4.1 Недоліки існуючої системи контролю якості

Аналіз карти контролю технічного процесу та вимог технічного регламенту дозволяє виділити низку системних недоліків діючої схеми контролю якості.

1) Домінування лабораторного контролю. Більшість критичних показників (концентрація волокна, ступінь млива, вміст волокна у зворотній воді, маса 1 м², міцнісні характеристики, зольність, капілярне всмоктування, вологість готового паперу) визначаються за результатами лабораторних аналізів, які виконуються з певною періодичністю або «за вимогою». Між моментом відбору проби, проведенням аналізу та отриманням результатів проходить час, протягом якого технологічний процес може суттєво змінитися. Це знижує ефективність коригувальних дій, оскільки управлінські рішення приймаються на основі запізненої інформації.

2) Відсутність безперервного поперечного контролю параметрів якості. Рівномірність розподілу маси 1 м² та вологості по ширині полотна оцінюється в основному за лабораторними зразками з обмеженої кількості точок, що не дає повної картини розподілу параметрів по ширині рулону. Можливі зональні відхилення (крайові ефекти, локальні ділянки з підвищеною чи зниженою масою або вологістю) можуть залишатися невиявленими в режимі реального часу та проявлятися вже на стадії переробки рулонів на конвертингових лініях.

3) Недостатній рівень інтеграції інформації про якість у систему керування процесом. АСУ ТП папероробної машини ПРМ-2 орієнтована переважно на підтримання технологічних режимів (тисків, температур, витрат, швидкості полотна), тоді як якісні показники продукції потрапляють до оператора й технолога здебільшого у вигляді окремих лабораторних

протоколів. Відсутній єдиний інформаційний простір, де були б зібрані та візуалізовані онлайн-показники процесу та результати контролю якості, що ускладнює причинно-наслідковий аналіз відхилень.

4)Обмежені можливості архівування та аналітики даних якості. У чинній системі результати лабораторних вимірювань, як правило, фіксуються у журналі або електронних таблицях, які не забезпечують розгорнутої статистичної оцінки стабільності процесу (аналіз трендів, побудова контрольних карт, оцінка варіацій у часі тощо). Це ускладнює роботу з виявлення систематичних причин відхилень, оцінку ефективності впроваджених заходів з удосконалення технології, а також підготовку доказової бази при розгляді рекламацій.

5)Висока залежність від людського фактору. На багатьох стадіях процесу частота контролю визначається формулюваннями «за вимогою» або «не рідше ніж...», що передбачає значну долю суб'єктивізму при прийнятті рішення про відбір проб. Крім того, на точність і відтворюваність результатів впливають кваліфікація лаборанта, дотримання методик, своєчасність занесення даних. У разі інтенсивної зміни режимів роботи машини така організація контролю може не забезпечувати достатньої оперативності реакції на відхилення.

6)Обмежені можливості прямого впливу на якість через контури автоматичного керування. У більшості випадків система керування реагує на відхилення технологічних параметрів (тиск, температура, витрата маси, швидкість полотна), але не на величини, що безпосередньо характеризують якість готової продукції (масу 1 м², вологість полотна, профіль показників по ширині). Тобто зворотний зв'язок за якістю реалізовано лише опосередковано, через лабораторні вимірювання і коригування рецептури або режимів вручну.

Для наочності основні виявлені недоліки узагальнено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні недоліки існуючої системи контролю якості та їх наслідки

Недолік системи контролю	Суть проблеми	Можливі наслідки для якості та виробництва
Домінування лабораторного контролю	Дані надходять із запізненням, між вимірюваннями – великі інтервали часу	Випуск нестабільної продукції протягом тривалого часу до корекції режимів
Відсутність CD-контролю маси та вологості	Немає повної картини розподілу параметрів по ширині полотна	Локальні дефекти якості, проблеми на конвертингу, рекламації
Обмежена інтеграція інформації про якість в АСУ ТП	Якість контролюється «окремо» від процесу	Ускладнений аналіз причин відхилень, неефективні коригуючі дії
Недостатнє архівування та аналітика	Дані розпорошені, обмежені можливості статистичної обробки	Складність виявлення систематичних проблем, оцінки ефективності заходів
Висока залежність від людського фактору	Відбір проб, інтерпретація результатів, своєчасність реагування	Ризик помилок, нерівномірність рівня контролю між змінами
Відсутність прямого зворотного зв'язку за якістю	Контури автоматичного керування не використовують показники якості як вхідні сигнали	Обмежена можливість стабілізації якості у реальному часі

Зазначені недоліки не означають невідповідності продукції нормативам – технічний регламент та стандарти виконуються. Однак існуюча організація контролю не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал автоматизації, зокрема у частині безперервного моніторингу якості, зменшення варіабельності параметрів і підвищення економічної ефективності виробництва.

2.4.2 Постановка задачі автоматизованого контролю якості

Виходячи з виявлених недоліків, можна сформулювати загальну мету автоматизації системи контролю якості:

забезпечити безперервний, інтегрований у АСУ ТП контроль ключових показників якості паперу-основи (насамперед маси 1 м² та вологості) в машинному та поперечному напрямках з можливістю оперативного впливу на технологічний процес.

Для досягнення цієї мети у межах магістерської роботи ставиться така **задача автоматизації**:

- розробити концепцію та структуру системи автоматизованого контролю якості виготовлення паперу-основи для туалетного паперу на ПРМ-2 ПрАТ «ККПК», яка забезпечує:

1. безперервне вимірювання маси 1 м² та вологості паперового полотна у процесі виробництва;
2. отримання та візуалізацію профілів показників у машинному та поперечному напрямках;
3. інтеграцію результатів вимірювань із чинною АСУ ТП папероробної машини для реалізації зворотних зв'язків з якості;
4. автоматизоване архівування та аналітику даних якості з можливістю аналізу трендів, статистичної оцінки стабільності процесу та формування звітів;
5. зменшення залежності від людського фактору при оцінюванні якості та прийнятті рішень щодо коригування режимів.

Формально задачу автоматизації можна сформулювати таким чином:

- **Об'єкт автоматизації** – процес контролю та керування якістю паперу-основи для туалетного паперу на папероробній машині ПРМ-2 ПрАТ «ККПК» (у частині параметрів маси 1 м², вологості та пов'язаних технологічних режимів).

- **Керовані змінні** – технологічні параметри, що впливають на масу та вологість полотна (витрата маси, концентрація, швидкість полотна, параметри пресової та сушильної частин, інтенсивність вентиляції тощо).

- **Керуючі дії** – зміна режимів роботи обладнання (регулювання витрат, тиску, температури, швидкості полотна), які виконуються через АСУ ТП на основі інформації про фактичний стан параметрів якості.

•**Вимірювані змінні** – маса 1 м², вологість полотна, температура, а також окремі технологічні параметри, що використовуються для побудови зворотних зв'язків.

На цій основі в подальших розділах роботи передбачається:

- виконати розробку структури системи автоматизованого контролю якості (вибір типів вимірювальних засобів, їх розташування в технологічній схемі, структура збору та обробки даних);
- обґрунтувати вимоги до точності, діапазонів вимірювань та динамічних характеристик засобів контролю;
- розробити пропозиції щодо інтеграції системи контролю якості з АСУ ТП ПРМ-2 та організації архівування/аналітики даних.

2.5 Концепція та загальна структура системи автоматизованого контролю якості паперу-основи на ПрАТ «ККПК»

З урахуванням виявлених у підпункті 2.4 недоліків діючої системи контролю якості та сформульованої задачі автоматизації виникає необхідність створення цілісної системи автоматизованого контролю якості, яка забезпечить безперервний моніторинг ключових показників паперу-основи (насамперед маси 1 м² та вологості) у режимі реального часу, їх інтеграцію з АСУ ТП ПРМ-2 та розширені можливості аналітики.

2.5.1 Узагальнені вимоги до системи автоматизованого контролю якості

На основі аналізу недоліків (табл. 2.3) та цільових показників якості (табл. 2.1), а також з урахуванням типових вимог до систем контролю якості в целюлозно-паперовій промисловості [30], систему автоматизованого контролю якості паперу-основи доцільно проектувати з урахуванням таких груп вимог:

1)Функціональні вимоги:

- а.безперервний вимір маси 1 м^2 та вологості паперового полотна в зоні виходу ПРМ-2;
- б.отримання поздовжніх та поперечних профілів маси й вологості;
- с.візуалізація профілів, трендів та усереднених значень параметрів у режимі реального часу;
- д.формування сигналів попереджувальної та аварійної сигналізації при виході параметрів за встановлені допуски;
- е.передача узагальненої інформації про якість у АСУ ТП для реалізації зворотних зв'язків за якістю.

2)Метрологічні вимоги:

- а.діапазони вимірювання маси 1 м^2 – з урахуванням марок ТМ-23, ТМ-27, ТМ-32 та можливих резервів (орієнтовно $15\text{--}40 \text{ г/м}^2$);
- б.діапазон вимірювання вологості – у межах, регламентованих технічними вимогами (приблизно $4\text{--}12 \%$ з запасом);
- с.основна похибка вимірювання маси й вологості – не гірше $1\text{--}2 \%$ від діапазону вимірювання (для забезпечення стабільності параметрів у межах допусків);
- д.просторово-часова дискретність вимірювань, достатня для реєстрації локальних неоднорідностей та динаміки процесу.

3)Інформаційні та інтерфейсні вимоги:

- а.сумісність із чинною АСУ ТП ПРМ-2 (промислові протоколи обміну, наприклад Profibus DP, Profinet, Modbus TCP тощо [29]);
- б.наявність зручного інтерфейсу оператора для перегляду профілів, трендів, журналів тривог і звітів;
- с.можливість експорту даних до зовнішніх систем (архіви, системи вищого рівня, служби якості).

4)Експлуатаційні та конструктивні вимоги:

- а.стійкість вимірювальних перетворювачів до запиленості, підвищеної вологості та температури у машинному залі;

б.зручність обслуговування (доступ до вузлів для очищення, калібрування, ремонту);

с.безпечна експлуатація з точки зору електробезпеки й промислової безпеки.

Узагальнено ці вимоги можна представити у вигляді табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Вимоги до системи контролю якості паперу-основи

Група вимог	Зміст вимог
Функціональні	Безперервний контроль маси 1 м ² і вологості; MD/CD-профілі; візуалізація; сигналізація; зв'язок з АСУ ТП
Метрологічні	Діапазони вимірювання, що охоплюють марки ТМ-23, ТМ-27, ТМ-32; похибка не гірше 1–2 %
Інформаційні	Підтримка промислових протоколів; інтеграція з існуючою АСУ ТП; можливість архівування й експорту даних
Експлуатаційні	Стійкість до умов машинного залу; зручність обслуговування; відповідність вимогам безпеки

2.5.2 Загальна структурна схема та принцип роботи системи

Виходячи з узагальнених вимог та з урахуванням типових рішень для папероробних машин [29], [30], систему автоматизованого контролю якості паперу-основи доцільно будувати за **модульним принципом**, виділивши такі основні підсистеми:

1)**Вимірювальна підсистема.** Призначена для безпосереднього вимірювання маси 1 м², вологості та, за потреби, температури паперового полотна у зоні виходу з ПРМ-2. До її складу входять:

- о вимірювальні перетворювачі (датчики) маси 1 м² та вологості;
- о механічні елементи встановлення (рамка, тримачі, захисні кожухи);
- о локальні засоби перетворення та попередньої обробки сигналів (усереднення, фільтрація, лінеаризація).

У найзагальнішому вигляді результатом роботи цієї підсистеми є **потік вимірних значень** маси, вологості (та інших параметрів) з прив'язкою до часу та просторового положення по ширині полотна.

2) Підсистема збору та первинної обробки даних забезпечує:

- о прийом сигналів від вимірювальної підсистеми (аналогових чи цифрових);
- о перетворення їх у технологічні величини (г/м^2 , %, $^{\circ}\text{C}$) з урахуванням калібрування;
- о формування **MD- та CD-профілів**, усереднення для різних часових інтервалів (зміна, година, рулон);
- о побудову статистичних показників (середнє, стандартне відхилення, мінімум/максимум, коефіцієнт варіації тощо).

Реалізується на базі промислового контролера або спеціалізованого обчислювального вузла, з'єднаного з вимірювальними перетворювачами та АСУ ТП.

3) **Інформаційно-візуалізаційна підсистема** призначена для взаємодії з оператором та технологом і включає:

- о панель оператора або робочу станцію з людино-машинним інтерфейсом (НМІ);
- о екрани для відображення:
 - поточних значень маси 1 м^2 та вологості;
 - MD- та CD-профілів;
 - трендів за обраний період;
 - журналів відхилень і тривог;
- о засоби формування та друку звітів по зміні/добі/партії.

На рівні цієї підсистеми оператор отримує комплексне уявлення про якість у режимі реального часу та може оцінювати ефективність своїх дій з коригування режимів.

4) Підсистема інтеграції з АСУ ТП та архівування. Забезпечує обмін даними між системою контролю якості та:

- о контролерами АСУ ТП ПРМ-2 (для реалізації зворотних зв'язків, передачі значень маси/вологості як вимірних змінних, формування коригувальних впливів);
- о центральним архівом даних або сервером історії;
- о системами вищого рівня (MES, системи управління якістю, ERP).

Структурно ця підсистема може бути реалізована на базі промислового мережевого інтерфейсу (Profibus, Profinet, Modbus TCP/IP тощо) та сервера баз даних. Вона забезпечує довготривале зберігання даних якості та доступ до них для аналізу.

- вимірювальну підсистему на виході ПРМ-2;
- зв'язок із підсистемою збору й обробки даних;
- інформаційно-візуалізаційний рівень (HMI, робоча станція технолога);
- інтеграцію з АСУ ТП ПРМ-2 та сервером архіву.
- «знизу вгору» – від датчиків до рівня аналізу (вимірні сигнали → профілі → звіти);
- «зверху вниз» – від системи контролю якості до АСУ ТП (коригуючі сигнали, зміна уставок, формування рекомендацій для оператора);
- «горизонтальні» – обміни з лабораторією та службою якості (порівняння онлайн-даних із результатами лабораторних аналізів, уточнення допусків і критеріїв бракування).

Таким чином, концепція системи автоматизованого контролю якості передбачає перехід від переважно лабораторно-орієнтованої схеми контролю до комбінованої схеми, де:

- лабораторний контроль зберігає роль еталонного та підтверджувального;

•основний акцент у поточному керуванні робиться на безперервних онлайн-вимірюваннях та їх безпосередньому використанні в системі керування технологічним процесом.

Висновки до розділу

У другому розділі розглянуто ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» як об'єкт дослідження та виділено ділянку підготовки макулатурної маси і виготовлення паперу-основи для туалетного паперу на папероробній машині ПРМ-2 як основний об'єкт автоматизації. Показано, що якість паперу-основи формується на всьому технологічному маршруті – від розпускання та очищення макулатури до формування, пресування, сушіння та намотування полотна – і визначається сукупністю параметрів процесу та властивостей волокнистої суспензії.

Проаналізовано нормативні вимоги до паперу туалетного з макулатури та наведено основні показники якості паперу-основи (маса 1 м², міцнісні характеристики, капілярне всмоктування, зольність, вологість), які забезпечують споживчі та експлуатаційні властивості готової продукції. Охарактеризовано чинну систему контролю якості, що базується на лабораторних випробуваннях, дискретному контролі параметрів на окремих стадіях технологічного процесу та частковому автоматизованому контролі в складі АСУ ТП папероробної машини. Встановлено, що така організація контролю не забезпечує безперервного отримання інформації про якість у реальному часі, не дає повної картини розподілу показників по ширині полотна, супроводжується часовими затримками та значною залежністю від людського фактору.

На основі виявлених недоліків сформульовано задачу автоматизації – створити систему автоматизованого контролю якості, яка забезпечить безперервний вимір ключових показників (насамперед маси 1 м² та вологості), формування поздовжніх і поперечних профілів, інтеграцію

інформації про якість з АСУ ТП папероробної машини, автоматизоване архівування та розширену аналітику даних. Запропоновано концепцію такої системи у вигляді модульної структури, що включає вимірювальну підсистему, підсистему збору й первинної обробки даних, інформаційно-візуалізаційний рівень та підсистему інтеграції з існуючими системами керування й архівування. Сформульовані функціональні, метрологічні, інформаційні та експлуатаційні вимоги до майбутньої системи створюють основу для подальшої деталізації технічних рішень і виконання розрахунків.

3. Розробка системи автоматизованого контролю якості виготовлення паперу-основи

3.1 Вихідні дані та вибір параметрів контролю

Автоматизована система контролю якості повинна забезпечити безперервний вимір маси 1 м^2 та поверхневої вологості целюлозного полотна в зоні після пресової частини папероробної машини. Аналіз промислових систем типу Valmet IQ QCS показує, що саме ці параметри є базовими для оперативного керування якістю й економією волокнистої сировини та енергоносіїв [31].

Для подальших розрахунків приймаємо такі вихідні дані:

- ширина полотна целюлози $B=6,0 \text{ м}$;
- швидкість папероробної машини $v_M = 400 \text{ м/хв}$;
- робочий діапазон маси 1 м^2 : $40 \dots 80 \text{ г/м}^2$;
- робочий діапазон вологості: $35 \dots 55 \%$;
- допустима приведена похибка вимірювання маси 1 м^2 не більше $\pm 2 \%$;
- допустима приведена похибка вимірювання вологості не більше $\pm 1 \%$;
- бажаний час оновлення повного поперечного профілю – не більше $t_{\text{проф}} = 20 \text{ с}$.

Для одержання поперечного профілю параметрів полотна вводимо **крок дискретизації** по ширині Δx . Тоді кількість точок профілю:

$$N_x = \frac{B}{\Delta x}$$

Якщо задати $\Delta x=0,1 \text{ м}$ (100 мм), то:

$$N_x = \frac{6}{0,1} = 60 \text{ точок по ширині.}$$

Такий крок відповідає рекомендаціям виробників QCS-систем, де типові значення становлять 50–150 мм залежно від ширини машини та вимог до точності керування профілем [32]. Менший крок дає більше просторове розрізнення, але збільшує час сканування та обсяг даних.

Час одного повного проходу вимірювальної головки по ширині полотна пов'язаний зі швидкістю сканування $v_{СК}$:

$$t_{СК} = \frac{B}{v_{СК}}$$

Щоб забезпечити оновлення профілю не рідше ніж раз на 20 с, повинна виконуватись умова:

$$t_{СК} \leq t_{проф} = 20 \text{ с.}$$

Звідси мінімально допустима швидкість переміщення сканера:

$$v_{СК} = \frac{B}{t_{проф}} = \frac{6}{20} = 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Надалі при розрахунках приймаємо конструктивно **швидкість сканування $v_{СК}=0,3$ м/с**, що забезпечує запас за часом (профіль оновлюється приблизно кожні 15 с).

3.2 Вибір та обґрунтування конструкції сканера поперечного профілю

Як показано в розділі 1, у сучасних системах контролю якості целюлозно-паперової продукції для формування поперечного профілю параметрів полотна (маси 1 м², вологості тощо) застосовують сканувальні мости (scanner frames) O-frame або C-frame типу, по яких переміщуються вимірювальні головки. Такі сканери є базовим елементом якісних систем (QCS) і забезпечують повний поперечний профіль листа з високою просторовою роздільною здатністю [31; 32].

У даній роботі для реалізації автоматизованої системи контролю якості приймається двосторонній O-frame-сканер, загальний вигляд якого наведено на рис. 3.1. Зображення відповідає промисловому сканеру, що експлуатується на целюлозно-паперовому комбінаті, і використовується як конструктивний прототип. Параметри та функціональні характеристики сканера, що розробляється, визначаються на основі аналізу відкритої технічної інформації провідних виробників QCS-систем [34].



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд O-frame-сканера поперечного профілю

3.2.1 Аналіз промислових аналогів

Для обґрунтування вибору конструкції сканера розглянуто типові рішення, що використовуються у промислових системах контролю якості (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння промислових сканерів систем контролю якості

Система / виробник	Тип сканера та призначення	Основні характеристики (узагальнено)	Особливості
Valmet IQ Scanner	Двосторонні O-frame- та однобічні сканери як основа Valmet IQ QCS	Ширина вимірювання до 10,5–12,5 м; edge-to-edge сканування; можливість встановлення кількох онлайн-сенсорів; адаптивна зміна швидкості сканування	Висока жорсткість рами, модульна конструкція, інтеграція з Valmet IQ QCS та Valmet DNA, підтримка Industrial Internet

Продовження таблиці 3.1

Valmet IQ Scanner L / XL	O-frame-сканери для паперу і картону, включно з надширокими машинами	Ширина до 10,5 м (L) та 11–12,5 м (XL); до 8 сенсорів; швидке сканування з адаптивним керуванням швидкістю	Оптимізовані для важких умов (пил, вологість, температура), забезпечують стабільну геометрію та точність по всій ширині полотна
Honeywell Experion MX O-Frame Scanners	O-frame-сканери в складі Experion MX QCS	Підтримка до 6 двосторонніх сенсорів; ширина листа до 10 м; швидкість сканування до 1200 мм/с; високоточне позиціонування головок	Сканери проектується для інтеграції з QCS Experion MX, мають розвинуту систему діагностики й термостабілізації, можливі компактні модифікації (Q4000, Q6088)
Tasowheel 1010 Scanner	Двосторонній сканер типу 1010 для паперових машин і ліній переробки	Максимальна ширина сканера до 12 000 мм; швидкість сканування 100–400 мм/с; до 4 сенсорів; жорстка зварна рама	Модульна конструкція, спеціальний приводний вузол, система очищення головок стисненим повітрям, орієнтація на повноцінні QCS-рішення

З аналізу табл. 3.1 видно, що для целюлозно-паперових машин де-факто стандартом є двосторонні O-frame-сканери, які:

- забезпечують повне охоплення ширини полотна (edge-to-edge сканування);
- дозволяють встановлювати декілька вимірювальних головок (маса 1 м², вологість, попіл, оптичні властивості тощо);
- працюють з адаптивною швидкістю сканування, забезпечуючи час оновлення поперечного профілю на рівні 10–30 с;
- мають жорстку металеву раму та захист від пилу, вологи й температурних впливів;
- інтегруються з АСУ ТП через стандартні промислові інтерфейси (Ethernet-з'єднання, OPC UA, протоколи промислових мереж).

Ця конструктивна концепція приймається як базова для сканера, що розробляється.

3.2.2 Обґрунтування прийнятої конструкції сканера

З урахуванням вихідних даних (ширина полотна $B=6\text{м}$, швидкість папероробної машини $v_m=400\text{ м/хв}$, допустимий час оновлення профілю $t_{\text{проф}}=20\text{ с}$) та аналізу промислових аналогів у роботі приймаються такі основні конструктивні та функціональні рішення:

- Тип рами: двосторонній O-frame-сканер, конструктивно подібний до рішень Valmet IQ Scanner L / XL та Honeywell Experion MX O-Frame Scanner, але адаптований під ширину 6 м та встановлення двох основних вимірювальних головок (маса 1 м^2 , вологість).

- Робоча ширина сканування: 6,0 м з невеликим запасом по краях полотна (зона вимірювання близько 5,8–6,0 м).

- Швидкість поперечного переміщення: для забезпечення періоду оновлення профілю не більше 20 с швидкість сканування $v_{СК} = 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

- Конфігурація вимірювальних головок:** дві незалежні головки –
– головка контролю маси 1 м^2 (двосторонній сенсор у верхньому та нижньому плечі рами);
– NIR-головка контролю поверхневої вологості, розташована з боку, що забезпечує мінімальне забруднення і допустимий тепловий режим. Концептуально така конфігурація відповідає підходам, реалізованим у QCS-системах Valmet, Honeywell і Tasowheel.

- Привід переміщення:** електропривід (сервомотор або асинхронний двигун із частотним перетворювачем) з енкодером положення, що забезпечує сталість швидкості сканування та точну прив'язку вимірювань до координати по ширині полотна. Подібні рішення застосовуються в сканерах Valmet IQ та Tasowheel 1010.

- Захисне виконання:** використання закритих кожухів, системи продувки повітрям у зоні вимірювальних головок і, за необхідності, термостабілізації рами, що відповідає практиці промислових реалізацій.

У результаті огляду прототипів сканерів та прийняття конструкції, головним претендентом для подальшої розробки став сканер Tasowheel 1010 Scanner показаний на рис. 3.2, який демонструє відповідність прийнятої конструктивної схеми реальним промисловим рішенням. Його схема наведена в додатку В.

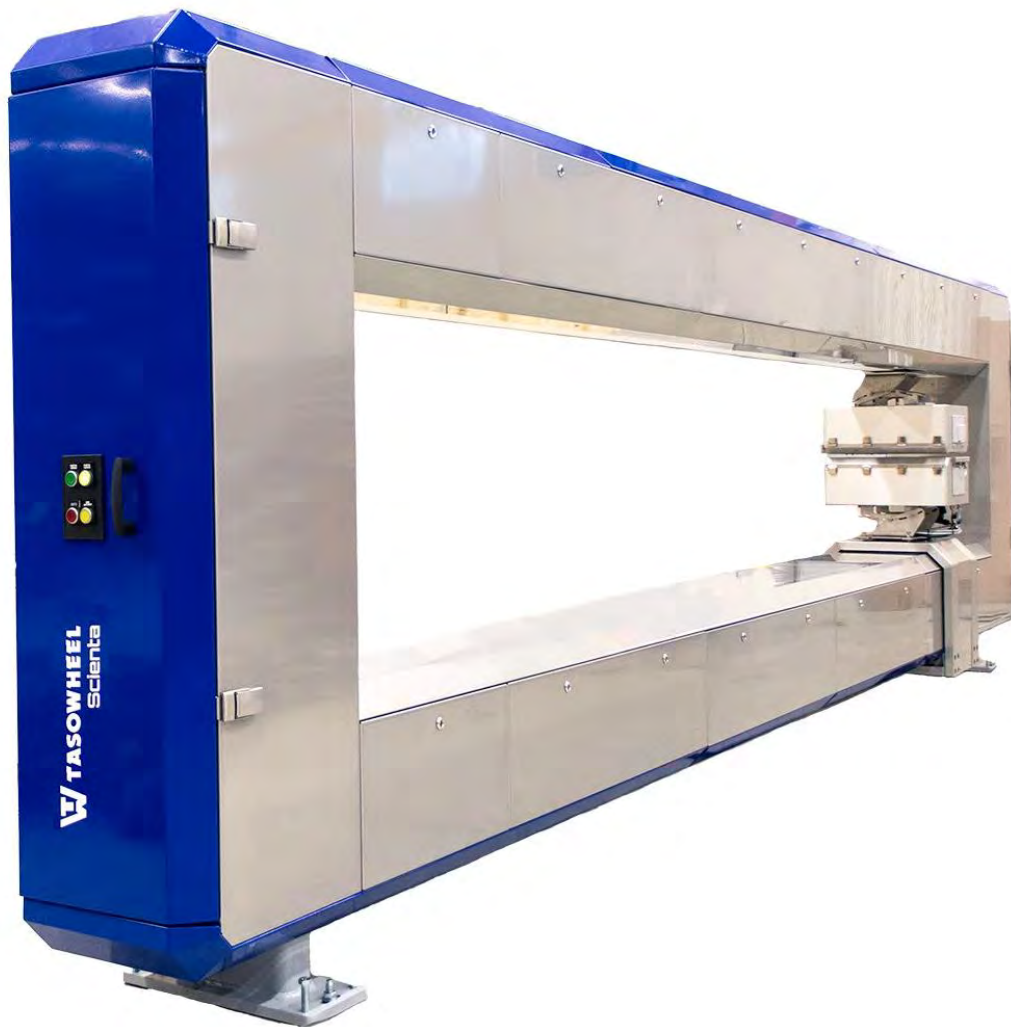


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд Tasowheel 1010 Scanner

3.3 Вибір датчиків маси 1 м² та вологості

У складі сканера поперечного профілю необхідно реалізувати два основні вимірювальні канали:

- канал маси 1 м²;
- канал поверхневої вологості полотна.

Вибір типів датчиків виконується на основі аналізу відкритих технічних характеристик промислових сенсорів, а отримані параметри використовуються далі для розрахунків.

3.3.1 Вибір датчика маси 1 м²

У промислових QCS-системах для вимірювання маси 1 м² найчастіше застосовуються радіаційні β -датчики, що працюють за принципом вимірювання ослаблення β -випромінювання при проходженні крізь паперовий або картонний лист. Типовим прикладом є датчик Valmet IQ Basis Weight Measurement зображений на рис. 3.3, який забезпечує високоточний онлайн-контроль граматури з формуванням MD/CD-профілів та внутрішню багатоточкову калібровку для компенсації температури, забруднення та розпаду джерела [35].



Рисунок 3.3 – Датчик Valmet IQ Basis Weight Measurement

Альтернативою є β -датчики основи компанії Tasowheel (Scienta). Зокрема, датчик Basis weight sensor, серія 7210/7211 (рис. 3.4) забезпечує подвійне (двостороннє) безконтактне вимірювання маси 1 м² у діапазоні 15–900 г/м² з типовою точністю 0,25 г/м² і повторюваністю 0,2 г/м². Він найкраще сумісний зі сканером (схема зображена в додатку Г), так як виробник один і той самий [36].



Рисунок 3.4 – Датчик Tasowheel Basis weight sensor

Для розроблюваної системи контролю якості приймемо наступні вимоги до каналу маси 1 м²:

- робочий діапазон маси 1 м²: **40–80 г/м²**;
- допустима приведена похибка: не більше **±2 %**.

Якщо орієнтуватися на параметри датчика Tasowheel 7210 то відносна похибка в нашому діапазоні буде:

- для нижньої межі $\varepsilon_{40} = \frac{0,25}{40} \cdot 100\% = 0,6 \%$

- для верхньої межі $\varepsilon_{80} = \frac{0,25}{80} \cdot 100\% = 0,3 \%$

Отже, навіть при використанні характеристик промислового β -датчика нашого класу допустима похибка суттєво менша за вимогу $\pm 2 \%$, що забезпечує необхідний запас точності для подальшої цифрової обробки й усереднення.

Для каналу маси 1 м² у розроблюваній системі доцільно прийняти конструктивні й метрологічні параметри, близькі до β -датчика типу Tasowheel 7210:

- принцип дії – двосторонній β -датчик з джерелом Kr-85 або Sr-90;
- діапазон маси: 15–900 г/м² (робочий діапазон системи 40–80 г/м² лежить у середині цього інтервалу);

- типова абсолютна похибка: не гірше 0,25 г/м²;
- час відгуку: одиниці–десятки мілісекунд;
- інтерфейси: Profibus, Modbus, Ethernet.

3.3.2 Вибір датчика вологості полотна

Для безконтактного онлайн-контролю вологості полотна целюлози широко застосовуються **інфрачервоні (IR/NIR) датчики**, що вимірюють поглинання інфрачервоного випромінювання водою в матеріалі. Такі сенсори можуть працювати як у складі сканера, так і як окремі точкові вимірювачі.

Компанія Valmet пропонує датчик Valmet IQ IR Moisture Measurement, який забезпечує високоточні профілі вологості по ширині полотна й використовується у складі сканерів IQ Scanner. Датчик є безконтактним, має високу швидкість дискретизації та реалізує багатохвильове вимірювання для компенсації впливу складу полотна і зовнішніх факторів [37].



Рисунок 3.5 – Датчик Tasowheel Moisture IR Sensor

Компанія Tasowheel розробляє серію Moisture IR Sensor [38] (Scienta 7230/7235) зображений на рис. 3.5, які призначені для онлайн-вимірювання поверхневої вологості паперу, картону та пульпи. Згідно з технічними характеристиками, сенсор серії 7230/7235 (схема зображена в додатку Г) забезпечує:

- діапазон вологості 1–35 % (для моделі 7230-2) або 1–70 % (для моделі 7235-2);
- діапазон маси полотна 5–350 г/м²;
- типову точність 0,1–0,2 % вологості;
- повторюваність 0,01 %;
- можливість сканувальної або фіксованої установки;
- інтерфейси Profibus / Modbus / Ethernet [38].

У розділі 3.1 для системи було прийнято орієнтовний робочий діапазон вологості полотна, що відповідає умовам після пресової / початкової сушильної частини. Якщо, наприклад, робочий інтервал складає **35–55 %**, він повністю потрапляє в діапазон 1–70 % датчика типу Scienta 7235-2. У цьому випадку:

- при абсолютній похибці 0,2 % відносна похибка в нижній частині діапазону (35 %), $\varepsilon_{35} = \frac{0,2}{4035} \cdot 100\% \approx 0,6 \%$
- для 55 %, $\varepsilon_{55} = \frac{0,2}{55} \cdot 100\% \approx 0,4 \%$

Отже, навіть при найгірших умовах точність IR-сенсора задовольняє вимогу до приведеної похибки вологості не гірше $\pm 1 \%$.

З урахуванням цього для каналу вологості в розроблюваній системі приймаються такі параметри NIR-датчика:

- тип – поверхневий IR/NIR-датчик на основі багатохвильового поглинання (аналог Scienta Moisture IR Sensor 7235-2);
- діапазон вологості: 1–70 %;
- діапазон маси полотна: 5–350 г/м²;

- типова похибка: до 0,2 %;
- час відгуку: не більше 10–20 мс;
- рекомендований зазор до полотна: 100 мм;
- інтерфейси: Profibus / Modbus / Ethernet.

3.4 Розрахунок параметрів сканування та часових характеристик вимірювання

3.4.1 Геометричні параметри поперечного сканування

У системах QCS поперечний (CD) профіль формують шляхом дискретизації ширини полотна на рівновіддалені точки, які «проходить» датчик під час руху сканера [39].

Кількість вимірювальних позицій по ширині полотна:

$$N_{CD} = \frac{B}{\Delta x} . \quad (3.1)$$

Підставляємо наші значення:

$$N_{CD} = \frac{5}{0,1} = 60.$$

Отже, один поперечний профіль маси 1 м² або вологості складається з **60 точок**, рівномірно розташованих через 0,1 м по ширині полотна.

3.4.2 Час сканування та «крок» за часом

Зв'язок між відстанню, швидкістю та часом для руху сканера прямолінійною траєкторією відповідає загальній кінематичній залежності:

$$t_{CK} = \frac{B}{v_{CK}} , \quad (3.2)$$

яка широко використовується при описі поперечного сканування як у промислових документаціях виробників QCS, так і в наукових публікаціях, що аналізують траєкторію руху датчика та формування CD-профілю [40].

Підставляємо:

$$t_{CK} = \frac{6}{0,3} = 20 \text{ с.}$$

Це час проходження сканера від одного краю полотна до іншого. У реальній системі профіль, як правило, формується при русі в обидві сторони (туди й назад), але для розрахунку просторових параметрів достатньо розглядати один «робочий» прохід.

Часовий інтервал між сусідніми CD-позиціями:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{CK}}. \quad (3.3)$$

$$\Delta t = \frac{0,1}{0,3} \approx 0,33 \text{ с.}$$

Отже, на кожній поперечній точці датчик знаходиться приблизно 0,33с.

За цей час полотно, яке рухається зі швидкістю $v_M = 6,67 \text{ м/с}$, проходить відстань у машинному напрямку:

$$L_{MD, \text{крок}} = v_M \cdot \Delta t = 6,67 \cdot 0,33 \approx 2,22 \text{ м.}$$

Це означає, що кожна CD-точка профілю фактично є усередненим значенням по ділянці $\sim 2,2 \text{ м}$ у MD-напрямку, що узгоджується з описами «зигзагоподібної» траєкторії сканера в літературі з CD-контролю маси.

3.4.3 Кількість відліків для усереднення в одній CD-точці

За час Δt датчик генерує:

$$N_s = f_s \cdot \Delta t. \quad (3.4)$$

Підставляємо:

$$N_s = 100 \text{ Гц} \cdot 0,33 \text{ с} \approx 33 \text{ вимірювання.}$$

Тобто для кожної просторової точки поперечного профілю ми можемо усереднити близько 30–33 миттєвих значень вимірюваної величини (маси 1 м^2 або вологості). Такий підхід (усереднення набору миттєвих відліків для кожної просторової комірки) застосовується в реальних QCS для відокремлення CD-профілю від MD-флуктуацій та випадкового шуму [41].

3.4.4 Оцінка зменшення випадкової похибки за рахунок усереднення

Згідно з рекомендаціями з оцінювання невизначеності вимірювань (NIST, ISO GUM), при усередненні N_s незалежних відліків випадкова складова стандартної невизначеності зменшується пропорційно $\frac{1}{\sqrt{N_s}}$ [42].

Стандартна невизначеність середнього:

$$u(\bar{y}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N_s}}, \quad (3.5)$$

де σ – стандартне відхилення одиничного вимірювання.

Канал маси 1 м². Для β -датчика маси 1 м² типу, подібного до промислових сенсорів Jasch / Tasowheel, типова точність одиничного вимірювання може становити $\pm 0,15$ г/м² [41].

Прийmemo для розрахунку:

$$\sigma_m \approx 0,15 \text{ г/м}^2.$$

Тоді для $N_s \approx 33$:

$$u(\bar{m}) = \frac{\sigma_m}{\sqrt{N_s}} \approx \frac{0,15}{\sqrt{33}} \approx 0,026 \text{ г/м}^2$$

Для номінальної маси $m_{\text{НОМ}} = 60$ г/м² відносна стандартна невизначеність:

$$\varepsilon_m^{\text{rel}} = \frac{u(\bar{m})}{m_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \approx \frac{0,026}{60} \cdot 100\% \approx 0,04\%, \quad (3.6)$$

Навіть якщо врахувати додаткові складові похибки (калібрування, дрейф, нестабільність джерела), підсумкова приведена похибка CD-профілю маси 1 м² залишиться **суттєво нижчою за вимогу ± 2 %**, що приймалась у п. 3.1. Це узгоджується з даними про точність сучасних β -сенсорів маси основи.

Канал вологості. Для NIR-датчика вологості типу Scienta 7230/7235 типова абсолютна похибка одиничного вимірювання становить **0,1–0,2 % вологості**. Прийmemo консервативно:

$$\sigma_w = 0,2\% \text{ вологи.}$$

Тоді:

$$u(\bar{W}) = \frac{\sigma_w}{\sqrt{N_s}} \approx \frac{0,2}{\sqrt{33}} \approx 0,035 \text{ вологи.}$$

Для робочого діапазону, наприклад, $W=40 - 60\%$, відносна стандартна невизначеність:

- при $W=40\%$:

$$\varepsilon_{W,40}^{rel} \approx \frac{0.035}{40} \cdot 100\% \approx 0,09\%$$

- при $W=60\%$:

$$\varepsilon_{W,60}^{rel} \approx \frac{0.035}{60} \cdot 100\% \approx 0,06\%$$

Навіть з урахуванням додаткових складових похибки (нестабільність випромінювача, забруднення вікна, температурні впливи) приведена похибка CD-профілю вологості залишиться нижчою за 1 %, що відповідає практичним вимогам до QCS-систем контролю вологості у папероробному виробництві.

Узагальнення результатів розрахунку:

1) При ширині полотна 6 м і кроці дискретизації 0,1 м поперечний профіль складається з 60 вимірювальних точок.

2) За швидкості сканера 0,3 м/с час одного робочого проходу становить 20 с, що узгоджується з типовими рекомендаціями для QCS,

3) Для кожної CD-позиції датчик перебуває у зоні вимірювання близько 0,33 с, за які при частоті дискретизації 100 Гц формується ~33 миттєвих відліки, що дозволяє ефективно усереднювати випадкові флуктуації.

4) Усереднення 30–33 відліків дає зменшення випадкової складової стандартної невизначеності приблизно в $\sqrt{30} = 5,5$ разів, що забезпечує приведену похибку CD-профілів суттєво нижчу, ніж задані у технічному завданні обмеження ($\pm 2\%$ по масі 1 м² та $\pm 1\%$ по вологості).

3.5 Розрахунок діапазонів, чутливості та похибок вимірювальних каналів

У попередніх підрозділах були визначені типи датчиків маси 1 м² та вологості, а також розраховані основні параметри поперечного сканування. У цьому підрозділі виконується оцінка:

- робочих діапазонів вимірювання;
- чутливості каналів;
- складових похибок і сумарної приведеної похибки.

Підхід до оцінювання невизначеності базується на рекомендаціях ISO GUM та відповідних документів NIST, де сумарна стандартна невизначеність розраховується як корінь квадратний із суми квадратів незалежних складових (квадратичне підсумовування) [41].

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}, \quad (3.7)$$

де u_i – стандартні невизначеності окремих складових (датчик, калібрування, квантування, усереднення тощо).

3.5.1 Канал маси 1 м²

Діапазон та чутливість. Для каналу маси 1 м² у системі контролю якості прийнято робочий діапазон:

$$m \in [40; 80] \text{ г/м}^2.$$

Діапазон вимірювання датчика значно ширший – орієнтовно 15...900 г/м².

Для цифрового представлення сигналу припустимо, що значення маси перетворюється в 16-розрядний код АЦП (типовий випадок для сучасних вимірювальних систем):

$$N_{ADC} = 2^{16} = 65536.$$

Тоді мінімальний крок квантування (LSB) по всьому діапазону датчика:

$$q = \frac{m_{\text{датч}}^{\text{max}} - m_{\text{датч}}^{\text{min}}}{N_{\text{ADC}}} = \frac{900 - 15}{65536} \approx 0,0135 \text{ г/м}^2, \quad (3.8)$$

У нашому робочому діапазоні 40–80 г/м² цей крок є суттєво меншим за допустиму похибку, тому квантування не є визначальною складовою.

Чутливість вимірювального каналу можна визначити як:

$$S_m = \frac{\Delta U}{\Delta m}, \quad (3.9)$$

де ΔU – зміна вихідного сигналу (напруга, цифровий код) при зміні маси на Δm . На практиці, при лінійній характеристиці й достатньо високій роздільній здатності, розрахунок чутливості виконується за калібрувальною характеристикою; тут достатньо зафіксувати, що ефективний крок подання 0,0135 г/м² забезпечує здатність «побачити» зміни маси значно менші за 0,25 г/м², які вказані як типова похибка датчика.

Складові похибки. Виділимо основні незалежні складові похибки каналу маси:

1) Похибка датчика (типова) – Δm_{sens} . Для аналогічних β -датчиків маси основи наведено типову похибку близько $\pm 0,25$ г/м². Вважатимемо цю величину розширеною похибкою при коефіцієнті розширення $k \approx 2$, тоді стандартна невизначеність:

$$u_{\text{sens}} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ г/м}^2.$$

2) Похибка квантування АЦП – Δm_q . Для рівномірного кроку квантування стандартна невизначеність оцінюється як [41]:

$$u_q = \frac{q}{\sqrt{12}} = \frac{0,0135}{\sqrt{12}} \approx 0,0039 \text{ г/м}^2.$$

3) Похибка усереднення. У п. 3.4 було показано, що при усередненні $N_s \approx 33$ відліків випадкова складова стандартної невизначеності одиничного вимірювання $\sigma_m \approx 0,15$ г/м² зменшується до:

$$u_{avg} = \frac{\sigma_m}{\sqrt{N_s}} \approx 0,026 \text{ г/м}^2.$$

4) **Похибка калібрування** – Δm_{cal} . Для промислових β -датчиків маси основи похибка калібрування, як правило, не перевищує 0,1–0,2 г/м². Приймемо консервативно $\Delta m_{cal} = 0,2 \text{ г/м}^2$, тоді:

$$u_{cal} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ г/м}^2$$

Сумарна стандартна невизначеність і приведена похибка. За правилом кореня квадратного із суми квадратів (RSS) [42]:

$$u_{c,m} = \sqrt{u_{sens}^2 + u_q^2 + u_{avg}^2 + u_{cal}^2}. \quad (3.10)$$

Підставляємо:

$$u_{c,m} = \sqrt{0,125^2 + 0,0039^2 + 0,026^2 + 0,1^2}.$$

Обчислимо окремо:

- $0,125^2 = 0,015625$;
- $0,0039^2 = 0,000015$
- $0,026^2 = 0,000676$;
- $0,1^2 = 0,01$;

Сума:

$$0,015625 + 0,000015 + 0,000676 + 0,01 \approx 0,026316.$$

Тоді:

$$u_{c,m} = \sqrt{0,026316} \approx 0,162 \text{ г/м}^2.$$

Розширена невизначеність при $k=2$:

$$U_m = k \cdot u_{c,m} = 2 \cdot 0,162 = 0,324 \frac{\text{г}}{\text{м}^2}.$$

Відносна розширена невизначеність для номінальної маси $m_{\text{НОМ}} = 60$:

$$\varepsilon_m^{rel} = \frac{U_m}{m_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \approx \frac{0,324}{60} \cdot 100\% = 0,54\%.$$

Отже, приведена похибка вимірювання маси 1 м² не перевищує 0,6 %, що значно краще за задану вимогу ± 2 %.

3.5.2 Канал вологості

Діапазон та чутливість. Для каналу вологості (NIR-датчик типу Scienta 7230/7235) прийнято робочий діапазон:

$$W \in [35; 55] \% \text{ вологості,}$$

який повністю лежить у технічному діапазоні датчика (1–70 %).

Типова абсолютна похибка одиничного вимірювання становить 0,1–0,2%. Для подальших розрахунків беремо $\sigma_W = 0,2\%$.

Для цифрового подання припустимо також 16-розрядний АЦП, інтегрований у модуль датчика. В такому разі крок квантування у відносних одиницях по всьому діапазону 0–100 %:

$$q_W \approx 0,00153\% \text{ вологи.}$$

У робочому діапазоні 35–55 % цей крок є на два порядки меншим за типову похибку датчика, тому вплив квантування мінімальний.

Складові похибки. Виділяємо основні складові:

1) Похибка датчика (типова) – $\Delta W_{sens} = 0,2\%$. Стандартна невизначеність:

$$u_{sens,W} = \frac{0,2}{2} = 0,1\% \text{ вологи.}$$

2) Похибка квантування АЦП:

$$u_{q,W} = \frac{0,00153}{\sqrt{12}} \approx 0,00044\% \text{ вологи.}$$

що можна вважати незначною.

3) Похибка усереднення. У п. 3.4 отримано для $N_s \approx 33$ і $\sigma_W = 0,2\%$:

$$u_{avg,W} = \frac{0,2}{\sqrt{33}} \approx 0,035\% \text{ вологи.}$$

4) Похибка калібрування. Для промислових NIR-датчиків вологості похибка калібрування часто знаходиться на рівні 0,1–0,2 %. Прийmemo $\Delta W_{cal} = 0,2\%$

$$u_{cal,W} = \frac{0,2}{2} = 0,1\% \text{ вологи.}$$

Сумарна стандартна невизначеність і приведена похибка. За правилом квадратичного підсумовування:

$$u_{c,W} = \sqrt{u_{sens,W}^2 + u_{q,W}^2 + u_{avg,W}^2 + u_{cal,W}^2}. \quad (3.11)$$

Підставляємо:

- $0,1^2 = 0,01$;
- $0,00044^2 = 0,0000002$
- $0,035^2 = 0,00125$;
- $0,1^2 = 0,01$;

Сума:

$$0,01 + 0,0000002 + 0,00125 + 0,01 \approx 0,0212252.$$

Тоді:

$$u_{c,W} = \sqrt{0,0212252} \approx 0,146 \% \text{ вологи}.$$

Розширена невизначеність при $k=2$:

$$U_W = k \cdot u_{c,W} = 2 \cdot 0,146 = 0,292 \% \text{ вологи}.$$

Відносна розширена невизначеність:

- при $W=35\%$:

$$\varepsilon_{W,35}^{rel} \approx \frac{0,292}{35} \cdot 100\% \approx 0,83\%$$

- при $W=55\%$:

$$\varepsilon_{W,55}^{rel} \approx \frac{0,292}{55} \cdot 100\% \approx 0,53\%$$

Отже, приведена похибка вимірювання вологості не перевищує 0,8 % у всьому робочому діапазоні, що задовольняє вимогу $\pm 1\%$.

Загальний висновок щодо точності вимірювальних каналів.

Проведені розрахунки показали, що:

- канал маси 1 м^2 забезпечує розширену невизначеність не більше 0,6 % у робочому діапазоні 40–80 г/м²;

- канал вологості забезпечує розширену невизначеність не більше 0,8 % у робочому діапазоні 35–55 %.

Ці значення кращі за задані у технічному завданні нормативи що свідчить про достатній запас точності та коректність обраних:

- типів датчиків;
- параметрів поперечного сканування;
- алгоритмів усереднення та цифрової обробки сигналів.

3.6 Перевірка досягнення вимог до якості та техніко-економічне узагальнення

У технічному завданні на автоматизовану систему контролю якості було встановлено такі основні вимоги:

- діапазон контролю маси 1 м² полотна: 40–80 г/м²; допустима приведена похибка не гірше ± 2 %;
- діапазон контролю вологості полотна: 35–55 %; допустима приведена похибка не гірше ± 1 %;
- крок дискретизації поперечного профілю – не більше 0,1 м по ширині полотна;
- час оновлення повного CD-профілю – не більше 20–30 с.

3.6.1 Перевірка виконання метрологічних вимог

1)**Просторові й часові параметри сканування.** При ширині полотна 6 м і кроці дискретизації 0,1 м сканер формує 60 вимірювальних точок поперечного профілю. За швидкості поперечного переміщення 0,3 м/с час робочого проходу становить 20 с, тобто повний CD-профіль оновлюється з періодом 20 с. Це відповідає рекомендованому діапазону 10–30 с для сучасних QCS-систем, що гарантує оперативну реакцію системи керування без надмірного зростання обсягу даних.

2)**Канал маси 1 м².** Для β -датчика маси основи, обраного за аналогією до промислових сенсорів Tasowheel, розширена невизначеність вимірювання

після цифрового усереднення становить близько $0,32 \text{ г/м}^2$, що відповідає відносній похибці $\approx 0,54 \%$ у робочому діапазоні $40\text{--}80 \text{ г/м}^2$. Отже, фактична точність у понад три рази краща за вимогу $\pm 2 \%$. Це забезпечує достатній запас для подальшої оптимізації технологічного режиму (зменшення середнього значення маси при збереженні нормативів міцності).

3) Канал вологості. Для NIR-датчика вологості, параметри якого відповідають сенсорам серії Scienta 7230/7235, розрахована розширена невизначеність не перевищує $0,29 \%$ у всьому робочому діапазоні $35\text{--}55 \%$ вологості. Навіть при мінімальній вологості 35% відносна похибка становить $\sim 0,83 \%$, що менше за допустимі $\pm 1 \%$. Таким чином, вимоги до точності каналу вологості також виконуються із запасом.

4) Стійкість до випадкових флуктуацій. Усереднення приблизно $30\text{--}33$ миттєвих відліків для кожної CD-точки дозволяє знизити випадкову складову невизначеності більш ніж у п'ять разів порівняно з одиничним вимірюванням, що відповідає загальноприйнятому підходу до оцінки невизначеності за ISO GUM та рекомендаціями NIST.

Отже, розроблена структура сканера й обрані типи датчиків забезпечують виконання всіх метрологічних вимог із суттєвим запасом по точності.

3.6.2 Техніко-економічне узагальнення очікуваного ефекту

Покращення якості вимірювань маси 1 м^2 та вологості безпосередньо впливає на економічні показники виробництва. За даними галузевих досліджень, зменшення варіації маси 1 м^2 і перехід до більш точного CD-профільного керування дозволяє знижувати середній рівень маси при збереженні нормативів міцності, що веде до помітного скорочення витрат волокнистої сировини та браку готової продукції.

У міжнародній практиці показано, що навіть $1\text{--}2 \%$ зменшення «страхового» перевищення маси над контрактним значенням для тарного й

пакувального паперу дає відчутну економію на масштабах середньої паперової машини (до сотень тисяч доларів США на рік) за рахунок зниження витрати волокна й енергоресурсів на його підготовку. Аналогічно, зменшення варіації маси й вологості знижує кількість переробки та втрат через невідповідність параметрам замовника.

Щодо вологості, численні дослідження підтверджують, що секція сушіння є найбільшим споживачем енергії в папероробному процесі (до 50–70 % сумарного енергоспоживання лінії). Покращення контролю вологості перед сушильною частиною та на виході машини дозволяє:

- зменшити вхідну вологість у сушильну частину, що, згідно з відомими оцінками TAPPI, може призводити до скорочення парового навантаження сушарів на 15–20 % при зниженні вологості полотна всього на кілька відсоткових пунктів;

- уникнути «пересушування» полотна на виході, коли фактична вологість значно нижча за цільову, а зайве тепло витрачається без покращення якості, що також підтверджується енергетичними дослідженнями сушильних секцій.

Розроблена система з високоточними каналами маси й вологості створює технічну передумову для:

- звуження поля допуску по масі 1 м^2 та вологості;
- переналаштування регуляторів маси й теплового режиму сушіння ближче до економічно оптимальних значень;
- зменшення енергоспоживання та витрат сировини завдяки скороченню «страхових» перевищень параметрів.

Таким чином, навіть без детального економічного розрахунку на рівні окремого підприємства можна стверджувати, що впровадження розробленої системи контролю якості є технічно доцільним і має значний потенціал окупності за рахунок:

- підвищення стабільності якості і конкурентоспроможності продукції;

- скорочення витрат целюлозної сировини;
- зменшення споживання пари й електроенергії в сушильній частині;
- зниження обсягу браку й переробки.

Висновки до розділу

У розділі 3 було виконано:

- структурно-параметричну розробку сканера поперечного профілю для целюлозної продукції;
- обґрунтування вибору промислових аналогів датчиків маси 1 м² та вологості;
- розрахунок просторово-часових параметрів сканування;
- оцінку сумарних похибок вимірювальних каналів та перевірку виконання вимог до якості.

Отримані результати показують, що запропонована система контролю якості повністю задовольняє вимоги технічного завдання з вагомим запасом по точності й швидкодії та створює передумови для істотного техніко-економічного ефекту при впровадженні на целюлозно-паперовому підприємстві.

4. Розробка стартап-проєкту «CelluScan»

У цьому розділі розробляється стартап-проєкт, спрямований на комерціалізацію результатів магістерської роботи — автоматизованої системи контролю якості целюлозної продукції. Розроблення стартапу передбачає формування ринкової концепції продукту, аналіз потенціалу його впровадження на ринку целюлозно-паперової промисловості, вибір стратегії розвитку та попередню оцінку економічної ефективності.

У межах розділу система онлайн-контролю якості розглядається як інноваційний продукт під умовною назвою «CelluScan» — модульне рішення для безперервного вимірювання маси 1 м² і вологості целюлозно-паперової продукції з подальшою аналітикою для технологічних служб та підрозділів контролю якості.

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

Метою підрозділу є формалізація ідеї стартапу «CelluScan» і перевірка її технологічної здійсненності. Відповідно до методичних рекомендацій на цьому етапі доцільно: стисло описати зміст ідеї, визначити проблематику, яку вона розв’язує, сформулювати цілі та завдання проєкту, окреслити цільові групи споживачів, а також задати базові технічні параметри продукту та необхідні ресурси.

Першим кроком є формування інформаційної карти стартап-проєкту, яка структурує ключові елементи «CelluScan» — від проблеми клієнта до ресурсного забезпечення та потреби в інвестиціях. Структура карти узгоджується з прикладами, що застосовуються у затверджених навчально-методичних матеріалах.

Таблиця 4.1 – Інформаційна карта стартап-проєкту

Назва блоку	Характеристика
Загальна характеристика стартап-проєкту	

Продовження таблиці 4.1

Назва стартап-проєкту	CelluScan – система онлайн-контролю якості целюлозно-паперової продукції
Проблематика, яку вирішує стартап	Відсутність або недостатня деталізація онлайн-контролю маси 1 м ² та вологості полотна на целюлозно-паперових комбінатах, що призводить до перевитрати сировини й енергії, зростання частки браку та скарг споживачів.
Головні цілі та завдання проєкту	Зменшення варіації маси та вологості паперу; зниження частки браку й претензій клієнтів; зменшення витрат сировини та енергії за рахунок точнішого керування процесом; формування цифрової бази даних якості для подальшої аналітики.
Головні цільові групи	Целюлозно-паперові комбінати (виробники паперу-основи, картону, санітарно-гігієнічної продукції); підприємства з переробки макулатури; інжинірингові компанії, що модернізують папероробні машини.
Автори та команда стартап-проєкту	Засновник – магістрант, автор магістерської роботи; до команди планується залучення спеціаліста з АСУ ТП, фахівця з продажів B2B та консультанта з фінансів/грантового фінансування.
Опис продукту стартап-проєкту	
Назва та коротка характеристика продукту	CelluScan QCS-module – модульний О-подібний сканер з датчиками маси 1 м ² та вологості, інтегрований із програмним забезпеченням збору, візуалізації й архівування даних якості.
Сфера застосування та функціональне призначення	Встановлення на виході папероробних машин для безперервного контролю маси й вологості полотна, формування MD/CD-профілів, сигналізація відхилень, підтримка регулювання процесу.
Унікальні властивості продукту	Адаптація під українські ЦПК (з урахуванням існуючих АСУ ТП); можливість поетапного впровадження (спочатку моніторинг, потім – замкнуте регулювання); орієнтація на зниження собівартості за рахунок економії сировини й енергії; відкриті протоколи інтеграції.
Технічні характеристики (узагальнено)	Ширина сканування до 6 м; діапазон маси 15–900 г/м ² ; діапазон вологості 1–35 %; точність вимірювання маси не гірше 0,25 г/м ² ; точність вимірювання вологості не гірше 0,1 %; інтерфейси зв'язку – Profibus/Modbus/Ethernet.
Супровід продукту	Інсталяція «під ключ», навчання персоналу, сервісне обслуговування й калібрування, оновлення програмного забезпечення, віддалений моніторинг працездатності системи.
Забезпечення стартап-проєкту	

Продовження таблиці 4.1

Необхідні ресурси	Інженерно-технічні ресурси (розробка й адаптація сканера, датчиків, ПЗ); виробнича база для виготовлення металоконструкцій і складання; доступ до випробувального полігону (дільниця папероробної машини); фінансові ресурси для НДР, прототипування та маркетингу.
Потреба в інвестиціях (попередньо)	Попередня потреба – інвестиції на рівні 80–120 тис. дол. США на етап розробки прототипу, пілотного впровадження на одному підприємстві та початкову маркетингову активність. (Точні розрахунки будуть наведені у підрозділі 5.4.)
Інтелектуальна власність	Технічні рішення щодо конструкції сканера та вузлів адаптації до ПРМ; алгоритми обробки вимірювальних даних та розрахунку показників якості; програмне забезпечення візуалізації й аналітики; база даних параметрів якості.

Подана інформаційна карта дає змогу систематизувати ключові компоненти стартап-проєкту «CelluScan». Вона фіксує клієнтську проблему (нестабільність маси та вологості паперу), визначає цілі й завдання проєкту, описує цільові сегменти, а також базові функціональні й технічні характеристики продукту. Окремі блоки карти відображають ресурсні потреби та попередню оцінку обсягів інвестицій, які надалі деталізуються у бізнес-моделі та фінансових розрахунках. Така форма подання спрощує подальший технологічний аудит ідеї та її зіставлення з альтернативними рішеннями.

Таблиця 4.2 – Опис ідеї стартап-проєкту «CelluScan»

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка модульної системи CelluScan для онлайн-контролю маси 1 м ² та вологості целюлозно-паперового полотна на базі О-подібного сканера з датчиками та програмним забезпеченням збору й аналізу даних.	1. Целюлозно-паперові комбінати (лінії з виробництва паперу-основи, санітарно-гігієнічного паперу, картону).	- Зменшення варіації маси та вологості між виробничими партіями й по ширині полотна. - Зниження частки браку, рекламаций та повернень. - Економія волокнистої сировини та енергії за рахунок точнішого налаштування режимів.

Продовження таблиці 4.2

	2. Підприємства з переробки макулатури, що виробляють напівфабрикати й папір технічного призначення.	• Підвищення стабільності показників якості напівфабрикатів, що спрощує подальшу переробку. • Можливість документально підтвердити якість для замовників (сертифікати, звіти).
	3. Інжинірингові компанії, що модернізують папероробні машини та пропонують комплексні рішення з автоматизації.	• Готовий «інтегрований модуль» контролю якості, який можна включати в інжинірингові проєкти. • Зменшення часу й ризиків при розробці власних систем контролю якості.
	4. Навчальні й наукові лабораторії ЦПК-профілю.	• Реальний стенд для навчання й дослідження процесів формування маси та вологості. • Можливість накопичувати масиви даних для наукових досліджень.

Опис ідеї у форматі «зміст — застосування — вигоди» демонструє, що продукт «CelluScan» має чітко визначену нішу — целюлозно-паперова промисловість — і водночас може інтегруватися як окремий модуль у ширший спектр інжинірингових рішень. Для ключових сегментів (підприємства ЦПК, переробка макулатури, інжинірингові компанії) сформульовано конкретні вигоди, що створює підґрунтя для подальшого позиціонування та розроблення маркетингової стратегії.

Важливим етапом є оцінювання конкурентоспроможності продукту відносно наявних аналогів. Якщо за сукупністю критичних параметрів розроблюваний проєкт не формує відчутних переваг, залучення інвестицій істотно ускладнюється, а подальший розвиток ініціативи втрачає економічну доцільність.

Таблиця 4.3 – Визначення характеристик ідеї проєкту «CelluScan»

Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проєкт «CelluScan»	Конкурент 1 (Valmet IQ QCS)	Конкурент 2 (Voith OnQuality QCS)	Конкурент 3 (ABB Ability QCS)	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
Орієнтація на український та східноєвропейський ринок (локалізація, мова, сервіс)	Спеціальна адаптація під українські ЦПК, україномовний інтерфейс, локальний сервіс	Глобальний продукт, україномовна локалізація відсутня	Глобальний продукт, локалізація під великі комбінації	Глобальний продукт, орієнтація на міжнародні концерни	–	–	S
Вартість впровадження системи на одну ПРМ (ТСО)	Помірна вартість, можливість поетапного впровадження (спочатку моніторинг, потім регулювання)	Висока вартість ліцензій та сервісу	Висока вартість комплексного рішення	Висока вартість повного QCS-пакета	–	–	S
Необхідність додаткового обладнання на підприємстві	Потрібні тільки сканер, датчики та стандартні мережеві інтерфейси; можливість використати наявні сервери/АСУ ТП	Потреба у власній інфраструктурі виробника (сервери, ПЗ, DCS)	Подібно до Valmet – інтеграція у фірмову платформу	Подібно – інтеграція у платформу ABB	–	N	–
Масштабованість системи (від однієї машини до комбінату)	Модульна архітектура, можливість поступового підключення нових машин і ділянок	Орієнтація на великі проєкти одразу в масштабі комбінату	Масштабування, але з великим кроком вартості	Масштабування через розширення ліцензій QCS/DCS	–	–	S

Продовження таблиці 4.3

Поріг входу для користувача (зручність інтерфейсу, навчання)	Інтуїтивний інтерфейс, адаптовані інструкції українською, навчання на місці	Складний, але стандартний для великих QCS; навчання англійською	Подібно до Valmet	Подібно до Valmet	–	N	S
Інвестиційні витрати на запуск стартап-проєкту (розробка + перший пілот)	Значні для стартапу, але нижчі, ніж побудова повного QCS світового бренду	Інвестиції на рівні великого міжнародного постачальника	Інвестиції на рівні глобальної корпорації	Інвестиції на рівні глобальної корпорації	W	–	–

Порівняння основних техніко-економічних характеристик дає підстави вважати, що стартап-проєкт «CelluScan» має низку потенційних сильних сторін: локалізацію під український ринок, відносно нижчу вартість упровадження для середніх підприємств, модульну масштабованість і нижчий поріг входу для користувачів. До слабких сторін належить потреба у стартових інвестиціях для розроблення та запуску першого пілотного проєкту, особливо в умовах конкуренції з глобальними виробниками QCS-систем. Окремі характеристики (зокрема потреба у додатковому обладнанні або специфіка інтерфейсу) можуть розглядатися як нейтральні, оскільки загалом відповідають типовим галузевим практикам. Інвестиційні витрати на запуск (розроблення + перший пілот) оцінюються як значні для стартапу, однак потенційно нижчі, ніж витрати на розгортання повнофункціональної QCS-системи світового бренду.

З огляду на наявність альтернативних способів реалізації проєкту доцільним є вибір варіанта, який забезпечує технологічну доступність,

мінімізує ризики впровадження та залишається економічно здійсненним на етапі пілотування.

Таблиця 4.4 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту «CelluScan»

№ п/п	Ідея проєкту (складова)	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	О-подібний сканер для онлайн-контролю параметрів полотна.	Проектування металоконструкцій (CAD/CAE); виготовлення сталевих балок, торцевих плит; системи лінійного переміщення каретки; приводи з частотним регулюванням; датчики положення.	Технології відомі й широко застосовуються в машинобудуванні й існуючих QCS-системах.	Доступні через співпрацю з машинобудівними підприємствами, підрядниками по металоконструкціях або власне конструкторське бюро.
2	Вимірювання маси 1 м ² та вологості полотна в складі сканера.	Використання промислових β-датчиків маси та NIR-датчиків вологості (на зразок промислових датчиків 7210 / 7230); калібрування за лабораторними методиками; побудова MD/CD-профілів.	Технології онлайн-вимірювання маси й вологості давно існують, серійні датчики доступні на ринку.	Можлива закупівля готових датчиків або розроблення власних модулів у кооперації з виробниками; доступність визначається бюджетом стартапу.
3	Програмне забезпечення збору, зберігання й візуалізації даних.	SCADA-/HMI-системи, СУБД (PostgreSQL або інші), серверні додатки (C#/Python/Java), веб-інтерфейси для відображення профілів якості, модулі аналітики.	Технології масово застосовуються в промисловій автоматизації; наявні готові бібліотеки й фреймворки.	Доступні для команди з компетенціями у промисловому програмуванні, можливе залучення фриланс-/аутсорс-розробників.
4	Інтеграція з АСУ ТП папероробної машини.	Стандартизовані промислові протоколи (Profibus, Modbus, Profinet, OPC UA); конфігурація ПЛК Siemens/Schneider/ін.; налаштування обміну даними між QCS та DCS.	Повсюдно застосовуються на ЦПК й інших підприємствах; відпрацьовані інженерні рішення.	Доступні для інженерів-автоматників зі знанням промислових мереж; можливе залучення партнерів-системних інтеграторів.

Продовження таблиці 4.4

5	Виробництво й збірка дослідного зразка системи.	Кооперація з локальними металообробними цехами; закупівля електронних компонентів; стендові випробування на реальній ПРМ у режимі моніторингу.	Технології є стандартними для машинобудівних і приладобудівних проєктів.	Доступні за умови залучення виробничих підрядників та отримання доступу до випробувального майданчика (наприклад, на базі ККПК).
---	---	--	--	--

Проведений технологічний аудит свідчить, що реалізація стартап-проєкту «CelluScan» не потребує створення принципово нових технологій. Ключові елементи — конструкція О-подібного сканера, β - та NIR-вимірювання, програмне забезпечення для збору й візуалізації даних, інтеграція з АСУ ТП, виготовлення металоконструкцій — базуються на відомих та доступних рішеннях, які застосовуються в сучасній целюлозно-паперовій промисловості. Відповідно, основним завданням стартапу є інженерна інтеграція зазначених технологій у цілісний продукт, адаптований до потреб українських і східноєвропейських підприємств, а не виконання фундаментальних досліджень.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту «CelluScan»

Ринкові перспективи стартап-проєкту «CelluScan» пов'язані з глобальним трендом на автоматизацію целюлозно-паперового виробництва та підвищення стабільності якості продукції. Світовий ринок систем автоматизації в целюлозно-паперовій галузі оцінюється у декілька мільярдів доларів США та демонструє стале зростання, зокрема в сегменті автоматизованих систем контролю якості (Quality Control System, QCS) для папероробних машин.

Для обґрунтування доцільності запуску проєкту доцільно виконати поетапний маркетинговий аналіз, який включає: попередню оцінку ємності

ринку, характеристику потенційних клієнтів, виявлення факторів загроз і можливостей, аналіз конкурентного середовища, формування SWOT-матриці та можливих сценаріїв виходу на ринок. На початковому етапі оцінюється загальний стан цільового ринку: кількість ключових постачальників систем контролю якості для целюлозно-паперових підприємств, орієнтовні обсяги продажів, динаміка попиту, бар'єри входу, а також вимоги до стандартизації й сертифікації.

Таблиця 4.5 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту «CelluScan»

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	На глобальному ринку систем QCS для целюлозно-паперової промисловості домінує 5–7 великих постачальників (Valmet, ABB, Honeywell, Voith, Siemens, Yokogawa тощо), які пропонують комплексні рішення автоматизації та контролю якості.
Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	Світовий ринок систем контролю якості для папероробних машин оцінюється приблизно у 2–2,5 млрд дол. США з прогнозом зростання до 3–3,5 млрд дол. США у середньостроковій перспективі. На сегмент автоматизації целюлозно-паперового виробництва загалом припадає понад 6 млрд дол. США на рік з прогнозом стабільного зростання.
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Ринок зростає. Основні драйвери – потреба в підвищенні енергоефективності, стабільності якості та простежуваності параметрів продукції, впровадження концепцій Industry 4.0, а також посилення конкуренції між виробниками паперу та картону.
Наявність обмежень для входу (характер обмежень)	Високі стартові інвестиції в розробку апаратної платформи, метрологічну атестацію та сертифікацію вимірювальних каналів; необхідність відповідності вимогам радіаційної безпеки/лазерної безпеки для датчиків густини та вологості; потреба в доступі до промислових майданчиків для пілотних впроваджень; інерційність і консерватизм промислових замовників.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги систем менеджменту якості (ISO 9001), екологічного менеджменту (ISO 14001), охорони праці та промислової безпеки; галузеві норми щодо радіаційних вимірювальних приладів, перевірки засобів вимірювальної техніки та метрологічного забезпечення АСУ ТП. Для експорту – відповідність європейським директивам (СЕ-маркування, директиви з НВІ/МІ-приладів).

Продовження таблиці 4.5

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	За даними відкритих звітів лідерів промислової автоматизації операційна рентабельність у сегменті систем автоматизації та контролю якості становить орієнтовно 10–20 %. Це вище за типові відсоткові ставки за депозитами, що свідчить про інвестиційну привабливість ринку за умови успішного виходу продукту.
---	---

Ринок автоматизованих систем контролю якості целюлозно-паперової продукції характеризується високою концентрацією (обмежена кількість глобальних гравців), але водночас зберігає потенціал зростання та інвестиційну привабливість. Високі бар'єри входу зумовлені насамперед потребою у значних R&D-витратах, дотриманням стандартів безпеки та консервативністю замовників. Для стартап-проекту «CelluScan» це визначає доцільність поетапного виходу на ринок із фокусом на локальних підприємствах і нішевих рішеннях.

Наступним кроком є аналіз структури попиту — визначення базових потреб, що формують ринок, а також ідентифікація основних цільових сегментів клієнтів. Для кожного сегмента доцільно розглянути особливості поведінки, критерії вибору постачальника та вимоги до продукту.

Таблиця 4.6 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту «CelluScan»

Потреба, що формує ринок (базова потреба)	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Підвищення стабільності показників якості (вологості, маси 1 м ² , рівномірності профілю по ширині полотна)	Великі целюлозно-паперові комбінати та картонно-паперові фабрики, що працюють на внутрішній та експортний ринок	Орієнтація на довгострокові інвестиції, наявність власних служб якості та АСУ ТП; рішення ухвалюються колегіально	Висока точність і відтворюваність вимірювань; інтеграція з існуючими АСУ ТП; гарантована сервісна підтримка; мінімальні простоти при монтажі

Продовження таблиці 4.6

Зменшення витрат сировини, енергії та реагентів за рахунок оптимізації режимів роботи машин	Підприємства з переробки макулатури, виробники тарного та флютінгового картону	Сильна чутливість до собівартості; високий фокус на окупності інвестицій; готовність до пілотних проєктів за умови швидкого економічного ефекту	Наявність режимів енергозбереження; можливість розрахунку економічного ефекту; модульність рішення (етапне впровадження)
Відповідність продукції вимогам міжнародних замовників і сертифікаційних систем	Підприємства, що постачають продукцію на ринки ЄС та міжнародні корпорації (упаковка, гігієнічна продукція)	Орієнтація на стандарти ISO, FSC, екологічні й клієнтські аудити; готовність інвестувати в «видимі» системи контролю якості	Висока надійність обладнання; повна простежуваність даних; можливість формувати звітність для аудитів; підтримка англійського інтерфейсу
Зниження ризиків браку та рекламацій, підвищення прозорості технологічного процесу	Середні та малі заводи, що модернізують існуючі папероробні машини	Обмежені інвестиційні бюджети; прагнення уникнути зупинок; значна роль особистих контактів з інтеграторами та сервісними компаніями	Простота обслуговування; адаптація під «загружене» обладнання; наявність гнучких фінансових схем (лізинг, поетапна оплата)
Отримання комплексних послуг «під ключ» з модернізації та сервісу	Інжинірингові та сервісні компанії, що виконують модернізацію целюлозно-паперових машин	Фокус на партнерських відносинах, вимога до відкритих протоколів обміну даними та доступності документації	Відкриті інтерфейси (OPC UA, Modbus, Profibus); доступність документації українською та англійською; можливість OEM-інтеграції в їхні проєкти

Цільовий ринок стартап-проєкту «CelluScan» є сегментованим: від великих інтегрованих комбінатів до середніх підприємств та інжинірингових компаній. Базова потреба всіх сегментів – контроль і стабілізація якості полотна в режимі реального часу, але пріоритети різняться: для частини

клієнтів ключова енергоефективність і окупність, для інших – відповідність міжнародним стандартам та вимогам замовників. Це створює можливості для гнучкого позиціонування продукту (економія ресурсів, якість продукції, підготовка до аудитів тощо).

Після визначення потенційних клієнтів виконується аналіз маркетингового середовища: виділяються фактори, що створюють загрози для реалізації проєкту, та фактори, які формують ринкові можливості. Для кожного фактору визначається зміст та можлива реакція компанії.

Таблиця 4.7 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкуренція з боку глобальних постачальників QCS	Наявність стабільних постачальників (Valmet, ABB, Honeywell, Voith), які мають розгалужену сервісну мережу та довіру великих комбінатів	Фокус на локальному ринку (Україна, Східна Європа), партнерські програми з інжиніринговими компаніями, нижча вартість володіння, адаптовані сервіси
Обмежені інвестиційні бюджети українських ЦПК	Післявоєнний стан економіки, високі відсоткові ставки та обмежений доступ до довгострокового фінансування	Запуск пілотних проєктів із поетапною оплатою, використання лізингових та грантових механізмів, демонстрація швидкої окупності
Консервативність виробничого персоналу та ризик відмови від нових рішень	Небажання змінювати налаштовані режими, страх перед додатковими зупинками обладнання	Передпроєктні обстеження, поетапне впровадження, навчання персоналу, надання сервісної підтримки 24/7, демо-режим з паралельним контролем
Регуляторні обмеження щодо використання джерел іонізуючого випромінювання	Додаткові дозволи, вимоги до радіаційного контролю та періодичної перевірки датчиків густини	Орієнтація на сучасні низькоактивні або безрадіаційні вимірювальні технології (інфрачервона, мікрохвильова, бета-джерела малої активності), співпраця з метрологічними установами
Валютні ризики та нестабільність ланцюгів постачання комплектуючих	Залежність від імпорتنих сенсорів, електронних компонентів	Формування кількох альтернативних ланцюгів постачання, локалізація частини виробництва, створення складу критичних запасних частин в Україні

Таблиця 4.8 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на автоматизацію та цифровізацію целюлозно-паперового виробництва	Глобальні й локальні підприємства інвестують в автоматизовані системи контролю якості для зниження витрат та підвищення стабільності продукції	Позиціонування «CelluScan» як модульного, масштабованого рішення; пропозиція пакетів «моніторинг → контроль → оптимізація»
2	Модернізація українських та східноєвропейських ЦПК	Необхідність заміни зношених систем контролю, перехід на випуск продукції для європейських ринків	Пропозиція локалізованого рішення з україномовним інтерфейсом, сервісом «під ключ» і нижчим порогом інвестицій порівняно з глобальними QCS
3	Підвищення вимог до енергоефективності та екологічності	Вартість енергоресурсів та екологічні нормативи змушують підприємства зменшувати переробки, перевитрати пари та електроенергії	Акцент у просуванні на економії енергії й сировини за рахунок точнішого контролю профілю вологості та маси
4	Підтримка інновацій та цифрових рішень у промисловості (гранти, програми технічної допомоги)	Можливість залучення грантових коштів для пілотних впроваджень та розробки програмного забезпечення	Підготовка грантових заявок спільно з промисловими партнерами, участь у програмах інноваційної підтримки
5	Дефіцит сервісної підтримки від глобальних постачальників на локальному рівні	Довгі строки поставки запчастин та виїзду сервісних інженерів з ЄС	Створення локальної сервісної команди, складу витратних матеріалів та дистанційної підтримки українською мовою

Сукупність факторів свідчить, що, попри сильну конкуренцію з боку глобальних брендів, на ринку існує простір для локального гравця, який

пропонує гнучкіші фінансові умови, локальний сервіс та адаптацію продукту під специфіку українських і східноєвропейських підприємств. Водночас ключовими загрозами залишаються високі бар'єри входу, регуляторні вимоги та обмежена фінансова спроможність окремих клієнтів; ці ризики можуть бути частково знижені за рахунок поступового впровадження та партнерських моделей реалізації.

На даному етапі узагальнюються характеристики конкурентного середовища стартап-проєкту «CelluScan» на ринку систем автоматизованого контролю якості целюлозно-паперової продукції. Аналіз доцільно виконувати за типом конкуренції, рівнем конкурентної боротьби, галузевою ознакою, видами товарів, характером конкурентних переваг та інтенсивністю конкуренції.

Таблиця 5.9 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку систем автоматизованого контролю якості целюлозно-паперової продукції

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополістична конкуренція з елементами олігополії	На глобальному ринку систем QCS домінує обмежена кількість великих гравців (Valmet, ABB, Honeywell, Voith, Siemens), але існують нішеві рішення та локальні інтегратори. Продукти відрізняються функціоналом, точністю, сервісом і ціною.	Стартап не може конкурувати «масштабом», тому робить ставку на нішеву спеціалізацію: рішення, адаптоване під потреби українських і східноєвропейських ЦПК, з акцентом на локальний сервіс, гнучке ціноутворення та інтеграцію з уже встановленим обладнанням.
2. За рівнем конкурентної боротьби: національний із виходом на міжнародний	Для «CelluScan» первинним є ринок України та країн Східної Європи. Глобальні виробники присутні переважно через представництва й дилерів, локальних повноцінних розробників подібних систем небагато.	Доцільно формувати сильну позицію на національному ринку (пілотні проєкти, референтні впровадження), а потім виходити на суміжні ринки як постачальник локалізованого рішення або технологічний партнер для інтеграторів.

Продовження таблиці 4.9

3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція відбувається в межах однієї галузі – целюлозно-паперової промисловості та виробництва картону. Клієнти добре знайомі з підходами QCS та вимогами до точності вимірювань.	Необхідно говорити «мовою галузі»: використовувати стандартні показники (грам/м ² , % вологості, профіль по ширині), демонструвати порівняння з існуючими рішеннями та підтверджувати результати посиленням на експерименти й рекомендації галузевих стандартів.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова й частково товарно-родова	Прямі конкуренти – інші системи скануючого контролю профілю маси та вологості. Непрямі – окремі датчики, лабораторні методи контролю, застарілі системи автоматизації (SCADA без повноцінного QCS).	У позиціонуванні слід підкреслювати переваги саме комплексного підходу: поєднання сканера, датчиків і програмного забезпечення для аналізу профілю якості, а також можливість інтеграції з уже встановленими локальними вимірювачами.
5. За характером конкурентних переваг: переважно нецінова конкуренція з елементами цінової	Глобальні виробники конкурують функціональністю, надійністю, брендом і сервісом. Ціна для великих комбінатів важлива, але не єдиний критерій. Для середніх підприємств вартість набуває критичного значення.	«CelluScan» комбінує нецінові переваги (локалізація, сервіс, адаптація під конкретну машину, можливість доопрацювань) з привабливою ціною входу (етапне впровадження, модульність, менша вартість ліцензії та сервісу).
6. За інтенсивністю конкуренції: помірно висока, марочна	Більшість рішень – «брендові» системи від великих корпорацій, де ім'я виробника саме по собі сприймається як гарантія якості. У той же час сегмент локальних рішень менш насичений.	Стартапу потрібно поступово формувати власний бренд: демонструвати успішні кейси, забезпечувати стабільний сервіс, брати участь у галузевих конференціях і виставках, створювати технічні матеріали українською мовою.

Конкуренція в сегменті систем контролю якості целюлозно-паперової продукції є структурованою з домінуванням глобальних брендів, однак містить виражені ніші для локалізованих рішень. Для «CelluScan» базовою стратегією виступає фокусування на потребах конкретних підприємств,

локальному сервісі та гнучкій ціновій політиці, а не пряма конкуренція за масштабом із найбільшими виробниками.

Для поглибленої оцінки конкурентного середовища доцільно застосувати модель п'яти сил М. Портера, що дає змогу охарактеризувати не лише прямих конкурентів, а й вплив потенційних нових гравців, постачальників, клієнтів та товарів-замінників на привабливість ринку систем автоматизованого контролю якості целюлозно-паперової продукції.

Таблиця 4.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Зміст	Висновки
Прямі конкуренти в галузі	Основні конкуренти – глобальні виробники систем контролю якості та автоматизації целюлозно-паперових машин (Valmet, ABB, Honeywell, Voith, Siemens та ін.), які пропонують комплексні QCS-рішення для контролю маси 1 м ² , вологості та інших параметрів полотна. Окремими конкурентами виступають локальні інтегратори, що постачають окремі датчики та SCADA-рішення без повноцінного сканувального QCS.	Інтенсивність конкуренції серед прямих конкурентів висока . Ринок контрольованих систем QCS насичений, однак спеціалізованих локальних рішень для українських і східноєвропейських підприємств небагато, що відкриває нішу для «CelluScan».
Потенційні конкуренти	Потенційні конкуренти – нові стартапи в галузі промислової автоматизації, а також інжинірингові компанії, які сьогодні ставлять готові QCS, але в перспективі можуть розробляти власні модулі контролю маси та вологості. Бар'єри входу пов'язані з високими витратами на R&D, необхідністю метрологічної атестації та доступом до промислових майданчиків для випробувань.	Вхід нових гравців можливий, але потребує значних інвестицій і технічної експертизи . Це створює ризик появи нових локальних рішень у середньостроковій перспективі, але дає «CelluScan» часовий запас для закріплення на ринку.

Продовження таблиці 4.10

Постачальники	Основні постачальники – виробники вимірювальних датчиків (β -/NIR-/мікрохвильових), електронних компонентів, приводів, металоконструкцій та програмних платформ (операційні системи, СУБД, SCADA). Частина компонентів є імпоротною, що створює залежність від цінової політики й логістики постачальників.	Сила постачальників середня : критичні сенсори та електроніка можуть впливати на собівартість та строки поставки, але існують альтернативні виробники й можливість диверсифікації каналів постачання. Необхідно завчасно формувати пул постачальників та страхові запаси критичних елементів.
Клієнти	Ключові клієнти – целюлозно-паперові комбінати, картонно-паперові фабрики, виробники tissue-продукції, а також інжинірингові компанії, що модернізують папероробні машини. Для великих замовників характерна висока переговорна сила: вони порівнюють кілька пропозицій, висувають вимоги до сервісу, гарантій та гнучких фінансових умов.	Сила клієнтів висока . Щоб бути конкурентоспроможним, «CelluScan» має пропонувати чітко вимірюваний економічний ефект, гнучкі фінансові моделі (пілотні проекти, поетапна оплата, сервісні контракти) та високий рівень технічної підтримки.
Товари-замінники	Потенційними замінниками є: а) традиційний лабораторний контроль якості без повноцінного онлайн-моніторингу; б) простіші системи контролю окремих точок (стаціонарні датчики без сканера); в) використання досвіду технологів без глибокої цифрової аналітики. Ці рішення дешевші на старті, але не забезпечують потрібної деталізації профілю та швидкої реакції на відхилення.	Загроза з боку товарів-замінників середня . Вони можуть стримувати інвестиції в QCS, особливо на малих підприємствах, але не дозволяють досягти порівняного рівня якості та економії ресурсів. У позиціонуванні «CelluScan» слід акцентувати на різниці в точності, стабільності та комплексності контролю.

Галузь систем автоматизованого контролю якості целюлозно-паперової продукції характеризується високою інтенсивністю конкуренції з боку кількох глобальних гравців та значною переговорною силою великих

клієнтів. Водночас бар'єри входу для нових локальних гравців є помірно високими, але не критичними: необхідні інвестиції у R&D, метрологію та сертифікацію можуть бути компенсовані за рахунок партнерства з промисловими підприємствами та участі у програмах підтримки інновацій. Вплив постачальників і товарів-замінників оцінюється як середній і може бути пом'якшений диверсифікацією ланцюгів постачання та демонстрацією переваг онлайн-контролю над традиційними методами. Загалом ринок є привабливим для стартапу «CelluScan» за умови чітко сформованих конкурентних переваг та поетапної стратегії виходу.

Подальший аналіз ринкових можливостей стартап-проєкту «CelluScan» передбачає виділення ключових факторів його конкурентоспроможності. Для цього узагальнюються результати попередніх таблиць: характеристика ринку, потреби споживачів, фактори загроз та можливостей, особливості конкурентного середовища. На основі цих даних формується перелік чинників, за якими клієнти порівнюватимуть «CelluScan» із альтернативними рішеннями, та які визначатимуть успіх або невдачу проєкту на ринку.

Таблиця 4.11 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності
стартап-проєкту «CelluScan»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор значущим для порівняння конкурентних проєктів)
1	Локалізація продукту під українські та східноєвропейські ЦПК	Більшість глобальних QCS-постачальників орієнтуються на міжнародні комбінати, мають англomовний інтерфейс та стандартизовані рішення. Для українських підприємств важливі україномовна документація, розуміння місцевих технічних умов, можливість адаптації до наявного обладнання. Це створює для «CelluScan» окрему нішу, де локалізація є суттєвою перевагою.
2	Загальна вартість володіння (ТСО) та гнучкі схеми фінансування	ЦПК працюють у капіталомісткій галузі, де інвестиційні бюджети обмежені. Рішення з високою вартістю впровадження часто відтермінуються або відхиляються. Система, що пропонує нижчу стартову вартість, модульність та поетапну оплату (пілот, розширення функціоналу, сервіс), має вищі шанси бути обраною.

Продовження таблиці 4.11

3	Модульність та масштабованість рішення	Підприємства суттєво різняться за розмірами та технічним рівнем. Можливість почати з мінімальної конфігурації (сканер + базові датчики) та надалі розширювати систему (додаткові датчики, модулі аналітики, інтеграція з регулюванням) зменшує ризики для замовника й підвищує привабливість продукту.
4	Інтеграція з існуючими АСУ ТП і відкриті протоколи обміну даними	Для більшості ЦПК критичною є можливість під'єднати нову систему до вже встановлених ПЛК, SCADA та інформаційних систем. Закриті протоколи та «жорсткі» прив'язки до одного виробника створюють додаткові витрати. Відкриті протоколи (OPC UA, Modbus, Profibus/Profinet) та гнучка політика інтеграції стають важливим фактором конкурентоспроможності.
5	Якість та точність вимірювань (маса 1 м ² , вологість, профіль полотна)	Для служби якості та технологів головним критерієм є надійність і точність вимірювання. Якщо система не забезпечує необхідного рівня метрологічних характеристик, інші переваги втрачають значення. Тому здатність «CelluScan» забезпечувати стабільну точність вимірювань у реальних умовах виробництва є ключовим фактором конкурентоспроможності.
6	Рівень та швидкість сервісної підтримки	Зупинка папероробної машини через відмову системи контролю якості веде до значних збитків. Наявність локальної сервісної команди, швидкої діагностики, запасних частин і дистанційної підтримки суттєво впливає на рішення клієнта. Для локального стартапу це може стати важливою перевагою над глобальними виробниками з довгими строками реагування.

Узагальнення результатів ринкового аналізу показує, що для стартап-проєкту «CelluScan» ключовими факторами конкурентоспроможності є локалізація, вартість володіння, модульність, інтегрованість, точність вимірювань і сервісна підтримка. Саме за цими параметрами потенційні замовники будуть порівнювати пропоновану систему з альтернативами, тому подальша стратегія розвитку має бути спрямована на максимальне посилення саме цих характеристик.

Після визначення факторів конкурентоспроможності виконується кількісний порівняльний аналіз сильних і слабких сторін стартапу відносно

основних конкурентів. У методичних рекомендаціях пропонується оцінити важливість кожного фактору в балах (1–20) та визначити, наскільки товари-конкуренти сильніші або слабші за наш проєкт за шкалою від –3 до +3.

Таблиця 4.12 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту «CelluScan»

Фактор конкурентоспроможності	Бали важливості (1–20)	–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
Локалізація під українські та східноєвропейські ЦПК	18			+				
Загальна вартість володіння (ТСО), гнучкі фінансові схеми	17			+				
Модульність та масштабованість рішення	16			+				
Інтеграція з існуючими АСУ ТП, відкриті протоколи	15				+			
Якість та точність вимірювань (маса 1 м ² , вологість)	19		+					
Рівень та швидкість сервісної підтримки	17		+					

Порівняльний аналіз показує, що за трьома критично важливими для клієнтів факторами – локалізацією, вартістю володіння та модульністю – «CelluScan» має перевагу над типовими пропозиціями глобальних виробників (позначка у стовпці «–1» для конкурентів, тобто для нас це сильні сторони). За інтеграцією з АСУ ТП позиції є паритетними: всі постачальники використовують стандартизовані промислові протоколи, тож суттєвої різниці немає. Водночас у частині абсолютної точності вимірювань та масштабованої сервісної підтримки глобальні компанії поки що мають помітну перевагу (позначка у стовпці «–2» для конкурентів, тобто це наші слабкі місця).

Далі на основі виділених факторів конкурентоспроможності, їх кількісної оцінки та переліку ринкових можливостей і загроз формується матриця SWOT-аналізу. Вона узагальнює внутрішні сильні та слабкі сторони проєкту, а також зовнішні можливості й загрози, з якими стикається стартап.

Таблиця 4.13 – SWOT-аналіз стартап-проєкту «CelluScan»

S – Сильні сторони	W – Слабкі сторони
• Локалізація продукту під умови українських та східноєвропейських ЦПК (мова, документація, розуміння технологій). • Нижча загальна вартість володіння для середніх підприємств порівняно з комплексними QCS глобальних виробників. • Модульна архітектура та можливість поетапного впровадження (спочатку моніторинг, потім регулювання й оптимізація). • Відкриті інтерфейси інтеграції з існуючими АСУ ТП (OPC UA, Modbus, Profibus/Profinet). • Потенційно високий рівень сервісної підтримки завдяки локальній команді.	• Значні стартові інвестиції в розробку апаратного та програмного забезпечення, метрологічну атестацію. • Відсутність розкрученого бренду та обмежений маркетинговий бюджет на початку. • Залежність від імпорتنих вимірювальних датчиків і електронних компонентів. • Необхідність створення власної сервісної мережі й накопичення референс-проєктів.
О – Можливості	Т – Загрози
• Модернізація українських і східноєвропейських целюлозно-паперових підприємств, потреба в оновленні систем контролю якості. • Підвищення вимог до енергоефективності, стабільності якості та простежуваності процесів з боку замовників і регуляторів. • Наявність державних та міжнародних програм підтримки цифровізації промисловості й інноваційних проєктів. • Дефіцит локальних сервісних команд глобальних постачальників систем QCS. • Можливість масштабування рішення на споріднені ринки (контроль якості інших рулонних матеріалів).	• Конкуренція з боку глобальних виробників QCS, які мають значні фінансові й технологічні ресурси та розкручені бренди. • Обмежені інвестиційні можливості клієнтів і загальна економічна нестабільність. • Регуляторні вимоги до вимірювальних систем (особливо при використанні радіаційних джерел). • Валютні ризики та можливі перебої з постачанням імпорتنих комплектуючих. • Консервативність виробничого персоналу й потенційна недовіра до рішень нового постачальника.

Проведений SWOT-аналіз показує, що стартап-проєкт «CelluScan» володіє виразними сильними сторонами, які добре узгоджуються з поточними ринковими можливостями: локалізація, нижча вартість володіння, модульність та гнучка інтеграція роблять продукт привабливим для підприємств, що модернізуються. Водночас на початковому етапі істотними є як внутрішні обмеження (нестача ресурсів, залежність від імпорتنих компонентів, відсутність бренду), так і зовнішні загрози з боку глобальних

конкурентів та економічної ситуації. Отже, ринкова стратегія має бути спрямована на максимальне використання сильних сторін для реалізації можливостей (локальні пілотні проєкти, демонстрація економічного ефекту, партнерства) та поетапне усунення слабких сторін через розбудову сервісної мережі, участь у програмах підтримки й диверсифікацію постачальників.

Завершальним етапом ринкового аналізу є формування можливих альтернатив ринкового впровадження стартап-проєкту. Кожна альтернатива описує орієнтовний комплекс заходів, оцінюється з точки зору ймовірності отримання ресурсів та строків реалізації, після чого обирається найбільш реалістичний варіант.

Таблиця 4.14 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкової поведінки)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Зосередження на локальному ринку України: пілотні проєкти на 1–2 підприємствах, демонстрація економічного ефекту, активна комунікація з технічними директорами й службами якості, формування портфеля референс-впроваджень.	Висока	12–18 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін за рахунок ринкових можливостей. Пошук грантового та партнерського фінансування спільно з промисловими підприємствами; участь у програмах підтримки цифровізації; кооперація з інжиніринговими компаніями для спільних комплексних проєктів модернізації.	Середня	18–24 місяці
3	Стратегія швидкого розширення на суміжні ринки. Після успішного пілоту – адаптація «CelluScan» для інших рулонних матеріалів (текстиль, плівки, металеві листи), вихід на ринки ЄС через партнерські канали, участь у міжнародних виставках і проєктах.		

Аналіз альтернатив свідчить, що найреалістичнішою для початкового етапу є стратегія поетапного виходу на ринок із фокусом на локальних

підприємствах та демонстрації практичного ефекту від впровадження «CelluScan». Поєднання цієї стратегії з активним залученням грантового й партнерського фінансування дозволяє компенсувати обмежені ресурси стартапу, знизити інвестиційні ризики та створити основу для подальшого масштабування проєкту. Таким чином, результати ринкового аналізу підтверджують доцільність запуску стартап-проєкту та задають рамки для розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми у наступному підрозділі.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми для стартап-проєкту «CelluScan» є логічним продовженням аналізу ринкових можливостей та ризиків. На основі результатів аналізу конкуренції за моделлю М. Портера, SWOT-аналізу та оцінки альтернатив ринкового впровадження формується узгоджена система рішень щодо того, на які сегменти ринку орієнтується проєкт, яку базову стратегію розвитку обирає та як саме позиціонує продукт у свідомості споживачів.

Виходячи з попереднього аналізу ринку целюлозно-паперової промисловості, для стартап-проєкту «CelluScan» виділено три основні групи потенційних клієнтів:

- великі целюлозно-паперові комбінати з повним циклом (картон, папір, целюлоза);
- середні та малі підприємства, що експлуатують застарілі папероробні машини;
- інжинірингові та інтеграційні компанії, які постачають системи АСУТП для ЦПП-галузі.

Таблиця 4.15 – Вибір цільових груп потенційних споживачів системи

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у межах сегменту	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Великі целюлозно-паперові комбінати (виробництво картону, паперу, целюлози; власні служби АСУТП, інвестиційні програми модернізації)	Висока: є досвід використання онлайн-контролю якості, розуміння економічного ефекту	Стабільний попит на заміну застарілих систем контролю, 3–5 великих проєктів на рік в Україні та сусідніх країнах	Середня: присутні глобальні постачальники (Valmet, ABB, Honeywell), але високі бар'єри входу та індивідуальні тендери	Середня: потрібні демонстраційні впровадження та серйозна сервісна підтримка
2	Середні та малі картонно-паперові фабрики з частковою автоматизацією	Середня: є потреба в підвищенні якості, але обмежені інвестиційні ресурси	Попит епізодичний, потенціал 5–10 проєктів на рік (український та регіональний ринки)	Низька/середня: імпортні системи часто надто дорогі, відсутні локальні рішення з адаптацією під старе обладнання	Висока: можна пропонувати поетапні рішення, лізингові схеми, сервісні контракти
3	Інжинірингові компанії та системні інтегратори АСУТП для ЦПП-галузі	Висока: зацікавлені в готових модулях контролю якості для включення до комплексних проєктів	Попит проєктний, залежить від кількості модернізаційних проєктів на ринку	Середня: інтегратори співпрацюють з кількома виробниками вимірювального обладнання	Середня/висока: за умови технологічної сумісності та привабливих партнерських умов

За результатами аналізу пріоритетними цільовими сегментами обрано **великі комбінати** (як «якорні» клієнти та демонстраційні майданчики) та **інжинірингові компанії** (як мультиплікатори продажів через включення

«CelluScan» до комплексних рішень). Для них доцільно застосувати стратегію **диференційованого маркетингу**: окремі програми для кінцевих виробників і партнерів-інтеграторів. Сегмент середніх і малих фабрик розглядається як перспектива другого етапу, із використанням адаптованих, спрощених конфігурацій системи.

Наступним кроком є вибір базової стратегії розвитку стартап-проєкту (зростання за рахунок виходу на нові ринки, удосконалення продукту, диверсифікації тощо) та стратегії конкурентної поведінки (лідерство за витратами, диференціація, фокусування). Орієнтуємось на класифікацію, наведено в додатках Б та В до методичних рекомендацій.

Таблиця 4.16 – Вибір базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки проєкту «CelluScan»

Цільовий сегмент	Базова стратегія розвитку (згідно методики)	Сутність реалізації для «CelluScan»	Стратегія конкурентної поведінки
Великі ЦПП-комбінати	Стратегія розвитку продукту : модернізація та заміна існуючих систем контролю якості	Розробка модульної системи онлайн-контролю вологості та маси, сумісної з існуючими АСУТП, з можливістю поетапного впровадження на окремих машинах	Диференціація за рахунок інтеграції з локальними стандартами, сервісу «під ключ» та адаптації під конкретну машину
Інжинірингові компанії та інтегратори	Стратегія проникнення на ринок через партнерські програми	Формування типових рішень «сканер + ПЗ + протоколи зв'язку», спільна участь у тендерах та проєктах модернізації	Орієнтація на партнерство (фокусування) : гнучкі OEM-умови, технічна підтримка інтеграторів
Середні та малі фабрики (перспективний етап)	Стратегія нішевого розвитку (фокусування на сегменті з обмеженою конкуренцією)	Створення спрощеної, більш доступної версії «CelluScan» з меншим функціоналом, але збереженням ключових переваг	Комбінована стратегія – поєднання помірної цінової переваги з сервісною підтримкою та фінансовими інструментами (розстрочка, лізинг)

Обрана комбінація стратегій дозволяє поєднати технологічне лідерство в ніші локальних систем контролю якості з гнучкими моделями співпраці з інтеграторами та підприємствами, що зменшує бар'єри входу на ринок та розподіляє ризики між учасниками проєкту.

Стратегія позиціонування проєкту «CelluScan»

На основі вимог цільових сегментів до систем контролю якості та обраних стратегій розвитку формується стратегія позиціонування – набір ключових асоціацій, з якими має сприйматись система «CelluScan» на ринку.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування системи «CelluScan»

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції «CelluScan»	Обрані асоціації для позиціонування (3 ключові)
1	Висока точність контролю вологості та маси, стабільність роботи у важких умовах виробництва, інтеграція з існуючими АСУТП	Розвиток продукту для великих комбінатів	• Висока точність вимірювання у режимі 24/7; • Можливість адаптації до різних машин; • Локальний сервіс і підтримка українською мовою	«Точний онлайн-контроль якості», «Надійність у важких умовах», «Інтегрований елемент АСУТП»
2	Гнучкість конфігурації, можливість поетапного впровадження, доступна сумарна вартість володіння	Проникнення на ринок через партнерів-інтеграторів та нішеві рішення для малих фабрик	• Модульна архітектура; • Сумісність зі стандартними промисловими протоколами; • Відносно низькі вимоги до обслуговування	«Модульна система, що росте разом із підприємством», «Легко підключити – просто обслуговувати», «Економія ресурсів без зупинки виробництва»

Узагальнюючи, «CelluScan» позиціонується як локально адаптована, технологічно сучасна система онлайн-контролю якості целюлозної продукції,

що забезпечує точність вимірювань, зменшення браку та економію ресурсів при зручному сервісному супроводі.

Маркетингова програма деталізує, що саме отримує клієнт, якими каналами система потрапляє на ринок та якими інструментами комунікації стартап просуватиме свою пропозицію. Структуру програми визначено відповідно до методичних рекомендацій: формування концепції товару, трирівневої моделі продукту, вибір каналів розподілу та комплексу просування.

Першим кроком є узагальнення потреб цільових сегментів, вигод, які надає система, та ключових переваг перед конкурентами.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару «CelluScan»

Потреба	Вигода, яку пропонує система	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Стабільна якість целюлозної продукції при мінімальних відхиленнях за вологістю та масою	Зменшення кількості браку та перевитрат сировини, підвищення однорідності продукції	Поєднання вимірювання двох ключових параметрів (вологості та маси) в одній системі; адаптація алгоритмів під конкретну машину і сорт продукції
Зниження витрат на енергоносії та хімікати завдяки оптимізації режимів сушіння та проклейки	Скорочення споживання пари/газу, зниження питомих витрат енергії на тонну продукції	Інтеграція з регуляторами сушильних циліндрів та подачі пари; можливість формування рекомендацій оператору в реальному часі
Прозорість процесу та документування якості для аудиту та клієнтів	Автоматизована реєстрація параметрів, формування звітів, спрощення взаємодії з контролюючими органами та ключовими замовниками	Вбудовані шаблони звітів, експорт даних у поширені формати, можливість підключення до корпоративних систем якості (ISO, FSC тощо)
Мінімізація ризиків зупинки виробництва через відмови обладнання контролю якості	Підвищення надійності технологічної лінії та скорочення простоїв	Використання стандартних промислових компонентів, резервування критичних вузлів, можливість дистанційної діагностики та оновлення ПЗ

Таким чином, концепція «CelluScan» фокусується на економічному ефекті для підприємства (менше браку й витрат) та надійності інтеграції в існуючу інфраструктуру, а не лише на технічних параметрах сенсорів.

Відповідно до методики, для формування повної ціннісної пропозиції використовується трирівнева модель товару: «задум», «реальний продукт» та «додатковий сервіс».

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару системи «CelluScan»

Рівні товару	Сутність та складові для системи «CelluScan»
I. Товар за задумом	Базова потреба споживача – забезпечення стабільної якості целюлозної продукції шляхом безперервного онлайн-контролю маси 1 м ² та вологості полотна. Основна функціональна вигода – зменшення браку та перевитрат сировини й енергії, підвищення однорідності та прогнозованості властивостей продукції.
II. Товар у реальному виконанні	Сканувальна рама з вимірювальними головками; блок обробки сигналів і шафа керування; програмне забезпечення візуалізації профілів та архівації даних; інтерфейси обміну з АСУ ТП (OPC UA, Modbus, Profibus/Profinet); технічна документація; відповідність вимогам промислової безпеки й метрологічним нормам.
III. Товар з підкріпленням (супроводом)	Проектування та монтаж «під ключ»; пусконаладжувальні роботи; навчання операторів і технологів; гарантійне та післягарантійне обслуговування; періодичне калібрування; дистанційна діагностика; оновлення ПЗ та консалтинг із оптимізації режимів сушіння та проклейки.

Така побудова показує, що «CelluScan» – це не окремий прилад, а комплексне рішення, де фізичне обладнання, програмне забезпечення й сервіс утворюють цілісний продукт для підприємства.

Канали розподілу обираються з урахуванням того, що «CelluScan» є складним індустріальним продуктом, який потребує інженерної підтримки.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни на систему

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
-------	--------------------------------	------------------------------	--	---

Продовження таблиці 4.20

1	Лабораторний контроль + поодинокі стаціонарні датчики (без сканера): орієнтовно 400 000–700 000 грн за комплект на одну машину	Комплексні QCS-системи глобальних виробників (Valmet, ABB, Honeywell): 1 800 000–3 000 000 грн за повний комплект на машину	Високий: великі й середні целюлозно-паперові комбінати, інжинірингові компанії з інвестиційними програмами модернізації	Орієнтовний діапазон для «CelluScan»: 900 000–1 500 000 грн за систему (залежно від конфігурації й обсягу сервісу)
---	---	--	---	---

Обрана цінова ніша розташована вище за прості рішення-замінники, але суттєво нижче за імпортні комплексні QCS, що дозволяє позиціонувати «CelluScan» як доступну, але технологічно розвинену альтернативу для українських ЦПК.

Система збуту визначається через специфіку закупівельної поведінки, необхідні функції збуту, глибину каналу й вибір між власною та залученою системою збуту.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту системи «CelluScan»

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Великі целюлозно-паперові комбінати: тендерні процедури, вимога техніко-економічного обґрунтування та підтвердженого досвіду впровадження	Підготовка технічних пропозицій і ТЕО, демонстрація роботи на пілотних об'єктах, участь у тендерах, повний супровід проєкту	Канал нульового рівня (прямий збут)	Прямі продажі від розробника «CelluScan» із власною командою продажу та сервісу
2	Інжинірингові компанії й інтегратори АСУТП: закупівля як частини комплексних проєктів	Надання типових рішень і технічних специфікацій, інженерна підтримка при інтеграції, спільна участь у тендерах	Канал першого рівня (через одного посередника-інтегратора)	Партнерські OEM-угоди: постачання системи інтегратору, який включає її у свій проєкт

Продовження таблиці 4.21

3	Середні та малі фабрики: індивідуальні переговори, увага до термінів окупності й умов сервісу	Демонстрація економічного ефекту, гнучкі умови оплати, сервісні контракти «обладнання + обслуговування»	Канал нульового рівня або перший рівень (через місцевого представника)	Комбінована система: прямі продажі ключовим клієнтам + залучені регіональні представники для розширення охоплення
---	---	---	--	---

Основою системи збуту «CelluScan» є прямий продаж великим комбінатам із залученням інжинірингових партнерів та регіональних представників для масштабування. Це відповідає високотехнологічному характеру продукту й потребі в тісній технічній взаємодії з клієнтом..

Завершальним елементом маркетингової програми є побудова концепції маркетингових комунікацій. В ній враховуються специфіка поведінки клієнтів, канали комунікацій, ключові позиції позиціонування, завдання рекламних повідомлень і формулюється концепція рекламних звернень.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій для системи «CelluScan»

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Керівники та технологи великих ЦПК: орієнтація на економічний ефект, надійність та відповідність стандартам	Персональні презентації, галузеві конференції й виставки, технічні семінари, професійні видання	«Точний онлайн-контроль якості», «Зменшення браку і витрат», «Інтеграція в існуючу АСУТП»	Показати, як система дозволяє скоротити витрати на сировину й енергію та підвищити стабільність якості	«CelluScan: точний контроль вологості та маси, що щодня економить ресурси вашої машини»

Продовження таблиці 4.22

2	Інжинірингові компанії та інтегратори: прагнення до надійних технологічних партнерств	D2D-контакти, технічні зустрічі, вебінари, спеціалізовані онлайн-платформи	«Відкрита інтеграція», «Модульність», «Локальна підтримка»	Підкреслити простоту вбудовування «CelluScan» у проекти замовника та доступність технічної підтримки	«CelluScan – модульний сканер, який легко інтегрується у ваші проекти модернізації ЦПК»
3	Середні та малі фабрики: чутливість до початкових інвестицій, потреба в простих рішеннях	Прямі візити, локальні галузеві заходи, цільові e-mail-розсилки, сайт із калькулятором економії	«Доступна модернізація», «Поетапне впровадження», «Сервіс поруч»	Довести, що система окупається за прийнятний термін і може впроваджуватись поетапно без зупинки виробництва	«Почніть контролювати якість сьогодні: модульний CelluScan окупається за кілька змін формату»

Обрана концепція комунікацій базується на персоналізованих B2B-каналах, демонстрації реального економічного ефекту та підкресленні локальної підтримки. Це відповідає специфіці промислових клієнтів і підсилює позиціонування «CelluScan» як надійного й економічно вигідного рішення.

4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту «CelluScan» та оцінювання його економічної ефективності

Завершальним етапом розробки стартап-проєкту «CelluScan» є формування цілісної бізнес-моделі та базове оцінювання економічної доцільності його реалізації. На цьому етапі технічні рішення, маркетингові стратегії та організаційні аспекти зводяться в єдину систему, що описує, як саме створюється, доставляється та монетизується цінність продукту для споживача.

Бізнес-модель стартапу подано у форматі Canvas. У ній відображено ключових партнерів, види діяльності, ресурси, сегменти клієнтів, канали

збуту, структуру витрат і потоки доходів. Для поглиблення розуміння логіки реалізації проєкту в цьому підрозділі також визначено склад команди, календарний графік запуску, організаційно-виробничу схему та основні фінансово-економічні показники.

Таблиця 4.23 – Побудова бізнес-моделі за шаблоном Lean canvas

Ключові партнери • Інтегратори АСУ ТП целюлозно-паперових підприємств; • Постачальники і вимірювальних датчиків (вологості, маси) та промислової електроніки; • Пілотні підприємства-партнери ЦПК для впровадження і демонстрації системи; • Метрологічні центри, випробувальні і лабораторії; • Університети, НДІ, технопарки (експертиза, спільні розробки).	Ключові види діяльності • R&D: розробка конструкції сканера та вимірювальних головок; • Розробка та адаптація програмного забезпечення візуалізації та архівації даних; • Проєктування, монтаж та пусконаладження системи на об'єктах замовників; • Інтеграція з існуючими АСУ ТП (ПЛК, SCADA, інформаційні системи якості); • Маркетинг і продажі, участь у виставках, підготовка технічних пропозицій і ТЕО. Ключові ресурси • Команда інженерів-конструкторів, розробників ПЗ, спеціалістів з АСУ ТП та технологів ЦПК; • Інтелектуальна власність:	Ціннісна пропозиція «CelluScan» • Безперервний онлайн-контроль маси 1 м² та вологості целюлозного полотна на папероробній машині; • Зменшення браку, перевитрат сировини й енергії за рахунок точного контролю профілю; • Модульність і поетапне впровадження (моніторинг → автоматичне регулювання → оптимізація); • Інтеграція з чинними АСУ ТП через відкриті промислові протоколи; • Локальний сервіс і	Взаємовідносини з клієнтами • Персональний B2B-супровід від передпроектного обстеження до експлуатації; • Довгострокові сервісні контракти (обслуговування, калібрування, оновлення ПЗ); • Навчання операторів і технологів, розробка інструкцій та регламентів; • Технічна підтримка (on-line/он-site), гаряча лінія, дистанційний моніторинг; • Партнерські програми для інтеграторів (спільні тендери, OEM-постачання). Канали збуту • Прямі продажі великим целюлозно-паперовим комбінатам (канал нульового рівня); • Продаж через інжинірингових партнерів та інтеграторів АСУ	Сегменти споживачів (клієнти) • Великі целюлозно-паперові комбінати (виробники картону, паперу, целюлози); • Середні та малі картонно-паперові фабрики, що модернізують існуючі машини; • Інжинірингові та сервісні компанії, які постачають комплексні рішення АСУ ТП для ЦПК; • Перспективні суміжні галузі: виробники інших рулонних матеріалів (текстиль, плівки тощо) – як етап масштабування.
--	---	--	--	--

	конструкторська документація, алгоритми обробки сигналів, програмні модулі; • Тестовий стенд / лабораторія для калібрування й випробувань; • Портфель пілотних впроваджень (референс-об'єкти, кейси економічного ефекту); • Партнерська мережа постачальників і інтеграторів.	підтримка українською мовою; адаптація до умов конкретного підприємства .	ТП (ОЕМ-канал); • Канал регіональних представників/дилерів для середніх і малих фабрик; • Галузеві виставки, конференції, технічні семінари; • Веб-сайт, цільові e-mail-розсилки, професійні онлайн-платформи.	
Структура витрат • Витрати на R&D (конструкція сканера, розробка та тестування ПЗ); • Закупівля датчиків, електронних компонентів, механічних вузлів, виготовлення конструкцій; • Заробітна плата команди, витрати на сервісну підтримку й гарантійне обслуговування; • Маркетинг (участь у виставках, розробка презентацій, сайт, промоматеріали); • Оренда приміщень, інфраструктура (сервери, тестове обладнання, зв'язок).			Структура витрат • Витрати на R&D (конструкція сканера, розробка та тестування ПЗ); • Закупівля датчиків, електронних компонентів, механічних вузлів, виготовлення конструкцій; • Заробітна плата команди, витрати на сервісну підтримку й гарантійне обслуговування; • Маркетинг (участь у виставках, розробка презентацій, сайт, промоматеріали); • Оренда приміщень, інфраструктура (сервери, тестове обладнання, зв'язок).	

Бізнес-модель стартап-проєкту «CelluScan» побудована навколо ціннісної пропозиції – забезпечення безперервного онлайн-контролю маси 1 м² та вологості целюлозного полотна з метою зменшення браку, оптимізації витрат сировини й енергії та підвищення стабільності якості продукції. Ключовими сегментами споживачів є великі целюлозно-паперові комбінати, середні та малі картонно-паперові фабрики, а також інжинірингові компанії-інтегратори, які включають систему до складу комплексних рішень АСУ ТП. Доставка цінності забезпечується через прямі продажі, ОЕМ-партнерства з

інтеграторами та регіональних представників, а взаємовідносини з клієнтами будуються на основі персонального B2B-супроводу, сервісних контрактів і навчання персоналу.

У блоці ключових ресурсів та діяльності зосереджені компетенції в галузі R&D (розробка сканера й ПЗ), інтеграція з існуючими системами автоматизації та сервісна підтримка. Партнерська мережа включає постачальників вимірювальних датчиків та електроніки, інтеграторів АСУ ТП, пілотні підприємства й наукові установи, що дозволяє знизити технологічні ризики та прискорити вихід на ринок. Структура витрат проєкту характерна для високотехнологічного стартапу й формується переважно за рахунок R&D, закупівлі спеціалізованих компонентів, організації виробництва та сервісу. Джерела доходу охоплюють продаж комплектів обладнання з інтеграцією, інженерні послуги, довгострокові сервісні контракти та оновлення програмного забезпечення, що забезпечує не лише разовий, а й регулярний дохід від кожного впровадження системи.

Ефективна реалізація стартап-проєкту потребує мультидисциплінарної команди, яка охоплює компетенції в галузі автоматизації, вимірювальної техніки, целюлозно-паперового виробництва, маркетингу та управління проєктами.

Таблиця 4.24 – Команда стартап-проєкту «CelluScan»

№ п/п	Посада / роль у проєкті	Основні функції
1	Керівник стартап-проєкту	Загальне управління проєктом, взаємодія з інвесторами та ключовими клієнтами, контроль термінів і бюджету.
2	Технічний директор (СТО)	Координація R&D, ухвалення технічних рішень щодо конструкції сканера, вибору датчиків та архітектури ПЗ.
3	Інженер-конструктор	Проектування сканувальної рами, механіки переміщення, захисних кожухів, підготовка конструкторської документації.
4	Інженер АСУ ТП / розробник ПЛК-рішень	Розробка схем керування, програмування ПЛК, інтеграція з існуючими системами АСУ ТП ЦПК.

Продовження таблиці 4.24

5	Розробник програмного забезпечення	Створення ПЗ візуалізації, архівації й аналізу даних, налаштування інтерфейсу оператора.
6	Технолог целюлозно-паперового виробництва	Адаптація алгоритмів контролю до конкретних машин і сортів продукції, участь у випробуваннях і налаштуванні режимів.
7	Менеджер з продажів і маркетингу	Пошук і супровід клієнтів, підготовка комерційних пропозицій, участь у виставках та презентаціях.
8	Сервісний інженер	Монтаж і пусконаладження систем, гарантійне та післягарантійне обслуговування, калібрування.

Сформована таким чином команда забезпечує повний цикл реалізації стартап-проєкту – від технічної розробки та дослідних випробувань до серійного впровадження системи «CelluScan» на підприємствах та її подальшої підтримки.

Для планування робіт і контролю виконання завдань формується календарний графік реалізації стартапу. У ньому виділено ключові етапи: розробка бізнес-моделі й MVP, випробування, підготовка виробництва та вихід на ринок. Для планування робіт і контролю виконання завдань формується календарний графік реалізації стартапу. У ньому виділено ключові етапи: розробка бізнес-моделі й MVP, випробування, підготовка виробництва та вихід на ринок.

Таблиця 4.25 – Календарний графік реалізації стартап-проєкту «CelluScan»

№ п/п	Етап реалізації проєкту	Тривалість	Орієнтовний термін виконання
1	Уточнення концепції продукту, розробка бізнес-моделі та ТЕО	1 місяць	01.01.2026–31.01.2026
2	Розробка та виготовлення MVP сканера і базового ПЗ	3 місяці	01.02.2026–30.04.2026
3	Лабораторні та промислові випробування MVP на пілотному підприємстві	2 місяці	01.05.2026–30.06.2026

Продовження таблиці 4.25

4	Доопрацювання конструкції та ПЗ за результатами випробувань	2 місяці	01.07.2026– 31.08.2026
5	Підготовка дрібносерійного виробництва та сервісної інфраструктури	3 місяці	01.09.2026– 30.11.2026
6	Маркетингова кампанія, укладання перших контрактів, запуск продажів	3 місяці	01.12.2026– 28.02.2027

Загальна тривалість підготовчого періоду становить близько **12–14 місяців** до виходу на ринок із першими комерційними поставками. Така послідовність дає змогу поєднати технічне доопрацювання продукту з формуванням каналів збуту та сервісної підтримки.

З урахуванням специфіки продукту доцільною є модель дрібносерійного виробництва сканерів із використанням кооперації: частина механічних вузлів виготовляється підрядними підприємствами, а складання, налаштування й тестування виконуються командою стартапу. Це скорочує капітальні витрати і дозволяє гнучко масштабувати обсяги випуску.

З урахуванням специфіки продукту доцільною є модель дрібносерійного виробництва сканерів із використанням кооперації: частина механічних вузлів виготовляється підрядними підприємствами, а складання, налаштування й тестування виконуються командою стартапу. Це скорочує капітальні витрати і дозволяє гнучко масштабувати обсяги випуску.

Таблиця 4.26 – Орієнтовний кошторис стартових витрат стартап-проєкту
«CelluScan»

№ п/п	Стаття витрат	Сума, тис. грн	Частка, %
1	R&D: розробка ПЗ, конструкторські роботи, виготовлення прототипу	600	30
2	Закупівля вимірювальних датчиків, електроніки та механічних вузлів	500	25
3	Створення тестового стенду та лабораторного оснащення	300	15

Продовження таблиці 4.26

4	Підготовка виробництва (оснащення робочих місць, інструмент, оснастка)	250	12,5
5	Маркетинг та формування каналів збуту	150	7,5
6	Адміністративні витрати (реєстрація, юридичні послуги, ІТ-інфраструктура)	200	10
	Разом початкові інвестиції	2 000	100

Отриманий кошторис показує, що найбільшу частку становлять витрати на R&D та спеціалізовані компоненти. Це характерно для високотехнологічних інженерних стартапів, де основна цінність закладається на етапі розробки продукту. Загальний обсяг необхідних стартових інвестицій оцінюється на рівні приблизно 2 млн грн, що є реалістичним для проєкту з дрібносерійним виробництвом та можливістю залучення грантового фінансування або партнерських інвестицій.

Для оцінки економічної ефективності бізнес-моделі уточнено структуру собівартості та цінової політики, а також розраховано базові показники ефективності [42].

Вихідні припущення для розрахунків:

1)Планові змінні витрати на одну систему (компоненти, збірка, монтаж, пусконаладження) – $C_v \approx 800\,000$ грн.

2)Планова ціна реалізації однієї системи – $P \approx 1\,200\,000$ грн.

3)Маржинальний прибуток (валова маржа) з однієї системи:
 $m = P - C_v = 1\,200\,000 - 800\,000 = 400\,000$ грн.

4)Початкові інвестиції (капітальні витрати) на вихід на ринок – $CAPEX \approx 2\,000\,000$ грн.

5)Плановий обсяг реалізації у перший рік – 6 систем.

6)Постійні операційні витрати $F \approx 1\,000\,000$ грн/рік.

Точка беззбитковості в натуральному вимірі визначається як відношення суми капітальних витрат до маржинального прибутку з однієї системи:

$$Q_{BE} = \frac{CAPEX}{m} = \frac{2000000}{400000} \approx 5 \text{ систем}$$

Отже, для повного покриття стартових інвестицій необхідно реалізувати **приблизно 5 систем** «CelluScan». Плановий обсяг у 6 систем дає певний запас фінансової стійкості.

Річний операційний прибуток за планового обсягу продажів:

$$\Pi = Q \cdot m - F = 6 \cdot 400\,000 - 1\,000\,000 = 1\,400\,000 \text{ грн.}$$

Орієнтовний термін окупності інвестицій:

$$PP = \frac{CAPEX}{\Pi} = \frac{2000000}{1400000} \approx 1,4 \text{ року (близько 17 місяців)}$$

Рентабельність продукції за прийнятою методикою (відношення прибутку до ціни реалізації одиниці):

$$R = \frac{m}{P} = \frac{400000}{1200000} \cdot 100\% \approx 33\%$$

Таблиця 4.27 – Показники економічної ефективності стартап-проєкту

Показник	Значення
Собівартість одиниці продукції (змінні витрати), грн	800 000
Ціна реалізації однієї системи, грн	1 200 000
Маржинальний прибуток з одиниці, грн	400 000
Рентабельність продукції, %	≈ 33 %
Плановий обсяг реалізації, систем/рік	6
Точка беззбитковості, систем	≈ 5
Річний операційний прибуток, грн	≈ 1 400 000
Початкові інвестиції (CAPEX), грн	2 000 000
Орієнтовний термін окупності інвестицій, років	≈ 1,4

Розрахунки демонструють, що за обраної цінової політики та структури витрат стартап-проект «CelluScan» має реалістичну модель бізнесу: точка беззбитковості відповідає продажу близько п'яти систем, що досяжно за планового обсягу реалізації шести систем на рік. Термін окупності стартових інвестицій на рівні близько 1,4 року та рентабельність продукції понад 30 % свідчать про достатню інвестиційну привабливість і потенціал подальшого масштабування проекту.

Висновки до розділу

У четвертому розділі було сформовано стартап-проект «CelluScan», спрямований на впровадження системи безперервного онлайн-контролю маси 1 м² та вологості целюлозного полотна на папероробних машинах. Показано, що запропонований продукт відповідає актуальним потребам целюлозно-паперової галузі: підвищенню стабільності якості, зменшенню браку та оптимізації витрат сировини й енергоносіїв.

Проведений ринковий аналіз і аналіз конкуренції (у тому числі за моделлю М. Портера) засвідчили: ринок систем контролю якості є висококонкурентним, але в ньому існує незаповнена ніша локальних рішень, адаптованих до українських та східноєвропейських підприємств. SWOT-аналіз показав наявність суттєвих сильних сторін проекту – локалізація, модульність, гнучка цінова політика, – а також окреслив ключові ризики, пов'язані з конкуренцією з боку глобальних виробників та залежністю від імпортних компонентів.

На основі отриманих результатів була розроблена маркетингова стратегія стартапу: визначено цільові ринкові сегменти (великі комбінати, середні та малі фабрики, інжинірингові компанії), обрано стратегії розвитку й позиціонування, сформовано комплекс маркетингових комунікацій, каналів збуту та сервісної підтримки. Бізнес-модель у форматі Canvas відобразила цілісну логіку створення, доставки та монетизації цінності продукту, з

урахуванням ключових партнерів, ресурсів, видів діяльності та джерел доходу.

Економічні розрахунки показали, що за базового сценарію реалізації шести систем «CelluScan» на рік стартап досягає точки беззбитковості при продажу близько п'яти комплексів, а орієнтовний термін окупності початкових інвестицій становить приблизно 1,4 року. Рентабельність продукції на рівні понад 30 % свідчить про інвестиційну привабливість запропонованої бізнес-моделі. Таким чином, розроблений стартап-проект можна вважати технічно обґрунтованим, ринково доцільним і економічно життєздатним за умов реалізації запропонованих організаційних і маркетингових заходів.

Висновок

У магістерській роботі розв'язано прикладне завдання автоматизації контролю якості виготовлення целюлозної продукції на основі поєднання технологічного аналізу процесу, огляду сучасних підходів до вимірювання та формування технічних рішень для оперативного контролю параметрів паперового полотна. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення стабільності якості продукції, зменшення втрат від невідповідності показників установленим вимогам і забезпечення можливості оперативного керування режимами виробництва на основі достовірних вимірювань.

У першому розділі систематизовано основні підходи до контролю якості у целюлозно-паперовій галузі та виконано огляд промислових систем контролю якості, що застосовують онлайн-вимірювання та сканувальний принцип формування профілів. На підставі аналізу визначено, що найбільш результативними для безперервних процесів є рішення, які забезпечують одержання оперативної інформації про параметри полотна в машинному та поперечному напрямках і мають можливість інтеграції до систем керування технологічними режимами.

У другому розділі проаналізовано об'єкт автоматизації та існуючу організацію контролю якості на виробництві. Визначено контрольовані параметри, методи їх оцінювання, а також фактори, які впливають на якість та ускладнюють підтримання стабільних показників у реальному часі. За результатами аналізу сформульовано вимоги до перспективної автоматизованої системи контролю якості та визначено функціональну структуру, яка забезпечує підвищення оперативності контролю й зменшення залежності від дискретних лабораторних вимірювань у виробничому циклі.

У третьому розділі розроблено та обґрунтовано технічні рішення для автоматизованого контролю якості з використанням сканувального принципу вимірювання. Виконано вибір підходу до формування поперечних профілів

показників якості, визначено склад вимірювальних каналів та їх функціональне призначення в системі контролю. Проведено інженерні розрахунки, які підтверджують узгодженість параметрів сканування, можливість формування профілів з необхідною дискретністю та оцінено метрологічні характеристики вимірювальних каналів. Окремо виконано перевірку досягнення встановлених вимог до якості вимірювань і сформовано техніко-економічне узагальнення очікуваного результату від впровадження системи, що пов'язане зі зменшенням відхилень параметрів, скороченням втрат та підвищенням керованості процесу.

У розділі з розробки стартап-проєкту виконано узагальнення підходу до практичного впровадження запропонованого рішення: визначено продуктову концепцію, описано ринкове середовище, сформовано маркетингові підходи та бізнес-модель. Це дозволяє розглядати запропоновані технічні рішення як основу для подальшого розвитку та адаптації під різні виробничі умови.

Література

- [1] Целюлозно-паперова промисловість. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%BB%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%BE-%D0%BF%D0%B0%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C.
- [2] Сульфатна целюлоза. Експрес Упаковка. URL: <https://pack.ua/uk/articles/upakovka-stati/polezhie-statii-o-kraft-bumage/sulfatnaya-tsellyuloza%20-osnovnoy-materia-dlya-proizvodstva-kraft-bumagi-chast-1>.
- [3] Черьопкіна Р.І., Дейкун І.М., Трембус І.В. ТЕХНОЛОГІЯ ЦЕЛЮЛОЗНОПАПЕРОВОГО ВИРОБНИЦТВА / ред. М. Д. Гомеля. Київ : МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО», 2023. 70 с.
- [4] NC State BioResources. URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cellulose-dissolving-pulp-manufacturing-processes-and-properties-a-mini-review/>.
- [5] Органічні розчинники. *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Organosolv>.
- [6] MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7219>.
- [7] Quality control system for paper, board and tissue machines. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Quality_control_system_for_paper%2C_board_and_tissue_machines.
- [8] Paper Production. AZoM. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=23381>.

[9] WITec. Application Note: Paper Manufacturing. – WITec / Oxford Instruments, [рік публікації, якщо зазначено в документі]. – 8 с. Режим доступу: <https://raman.oxinst.com/assets/uploads/raman/materials/WITec-AppNote-Paper-Manufacturing-web.pdf>

[10] Valmet IQ Quality Management System. Valmet. URL: <https://www.valmet.com/automation/quality-management/>.

[11] ABB Ability Quality Management System (QMS) for pulp and paper. ABB. URL: <https://new.abb.com/pulp-paper/abb-in-pulp-and-paper/products/quality-management-qms>.

[12] IQ Scanner L. Valmet: technologies. URL: <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/iq-scanner-l/>.

[13] Voith Quality Control System (QCS) OnQuality. Voith. URL: <https://www.voith.com/corp-en/products-services/automation-digital-solutions/onquality.html>.

[14] Machine Direction (MD). Process Solutions | Honeywell. URL: <https://process.honeywell.com/us/en/products/control-and-supervisory-systems/quality-control-systems-qcs/experion-mx/control-applications/machine-direction-md>.

[15] Paperboard Guide. – [S.l.]: [b.v.]. – 28 с.

Режим доступу: <https://4056792.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/4056792/Consumer%20board/Paperboard-guide.pdf>

[16] Optimize quality and costs with automated testing for paper and board. – ABB Pulp & Paper Industry Insights, без року. – Режим доступу: <https://new.abb.com/pulp-paper/abb-in-pulp-and-paper/articles/optimize-quality-and-costs-with-automated-testing-for-paper-and-board>.

[17] ККПК. Київський картонно-паперовий комбінат. URL: <https://www.papir.kiev.ua/>.

[18] Технічний регламент № 2 на виробництво туалетного паперу та паперових рушників. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[19] Технічний регламент № 5.1, 5.2. Опис технологічного процесу підготовки макулатурної маси та виготовлення паперу-основи на ПРМ-2. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[20] Технічний регламент № 5.3. Опис технологічного процесу відливання, пресування та сушіння паперового полотна на ПРМ-2. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[21] Технічна специфікація 7-1 на основне технологічне обладнання лінії виробництва туалетного паперу. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[22] Технологічна схема РПВ-2 (розмельно-підготовче відділення виробництва туалетного паперу). – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[23] Технологічна схема ПРМ-2а (папероробна машина з виробництва паперу-основи для туалетного паперу). – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[24] Інструкція «Контроль технічного процесу по стадіях виробництва туалетного паперу», форма 9.1. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[25] Технічний регламент № 2 на виробництво туалетного паперу та паперових рушників. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[26] ДСТУ 4266:2003. Папір туалетний. – К.: Держспоживстандарт України, 2003.

[27] Інструкція «Контроль технічного процесу по стадіях виробництва туалетного паперу», форма 9.1. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[28] Технічний регламент 5.3. Опис технологічного процесу та АСУ ТП папероробної машини ПРМ-2. – ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», Обухів, б.р.

[29] Karlsson M., Theliander H. Quality control systems in modern paper machines // Nordic Pulp & Paper Research Journal. – 2015. – Vol. 30, No. 4. – P. 640–652.

[30] Бондаренко В.І., Соколов В.А. Автоматизація целюлозно-паперового виробництва. – М.: Лісова промисловість, 2010. – 384 с.

[32] Valmet IQ Basis Weight Measurement – Basis weight sensor for IQ Scanners. Valmet. URL: <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/measurements/basis-weight/basis-weight-measurement>.

[33] Valmet IQ Measurements – Accurate online measurements for total quality control. Valmet. URL: <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/measurements>.

[34] Honeywell. *O-Frame Scanners – Experion MX Scanner Platforms* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://process.honeywell.com/us/en/products/control-and-supervisory-systems/quality-control-systems-qcs/experion-mx/scanner-platforms/o-frame-scanners>.

[35] Tasowheel. *1010 Scanner – Paper Industry QCS* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tasowheel.fi/products-and-services/qcs-solutions/1010-scanner/>.

[36] Tasowheel. Basis weight sensor – Radiation based online measurement [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.tasowheel.fi/products-and-services/qcs-solutions/total-weight-sensors/>.

[37] Valmet. Valmet IQ IR Moisture Measurement [Електронний ресурс].
– Режим доступу:

<https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/measurements/moisture/ir-moisture-measurement/>.

[38] Tasowheel. Moisture IR Sensor – Scienta NIR absorption-based sensor series 7230/7235 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.tasowheel.fi/products-and-services/qcs-solutions/moisture-ir-sensor/>.

[39] Богачук В. В., Каців С. Ш., Кухарчук В. В., Говор І. К. Оцінка комбінованої стандартної невизначеності вимірювань вологості сипких матеріалів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2010. С. 59–66.

Режим доступу:
<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/456/455>.

[40] Пархомей І. Р., Цьопа Н. В. Основи теорії інформаційних процесів. Частина 2. Системи обробки сигналів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 169 с.

[41] NIST. Evaluating uncertainty components: Type A [Електронний ресурс] // NIST Uncertainty Web Site. – Режим доступу:

<https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/typea.html>.

[42] Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

Додатки

Додаток А

Доступ надається за запитом до авторів

Додаток Б

Доступ надається за запитом до авторів

Додаток В

Доступ надається за запитом до авторів

Додаток Г

Доступ надається за запитом до авторів