

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Тужеляк Денис Євгенович

Система оптимізації роботи конвеєрної лінії з метою
підвищення продуктивності

напрямок підготовки :
фахове спрямування –
Дипломна робота за освітньо-кваліфікаційним рівнем "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Д.Є. Тужеляк

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Масляк

Дипломну роботу допущено до захисту:
" ____ " _____ 2026 р.

Завідувач кафедри
_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

А.І. Сегін

“ ” 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Тужеляк Денису Євгеновичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Система оптимізації роботи конвеєрної лінії з метою підвищення продуктивності / Conveyor line optimization system to increase productivity

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк

затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. .Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Характеристика технологічного процесу експлуатації конвеєрних ліній
2. методи підвищення продуктивності конвеєрних ліній
3. Характеристики мікроконтролерів

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесу оптимізації роботи конвеєрної лінії.
2. Проектування системи оптимізації та вибір технічних засобів
3. Обробка результатів моніторингу роботи конвеєрної лінії

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема системи

2. Структурна схема системи обробки показів вимірювань експлуатаційних параметрів конвеєра

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу використання конвеєрних ліній	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Проектування системи оптимізації та вибір технічних засобів	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Обробка результатів моніторингу результатів роботи конвеєра	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

Тужеляк Д.Є.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

В кваліфікаційній роботі розглядаються питання оптимізації виробничого процесу конвеєрної лінії. Предметом дослідження виступають методи та засоби підвищення продуктивності конвеєрної лінії на основі інтеграції методів, інструментів вимірювання, аналізу та оптимізації.

Мета роботи — розроблення системи оптимізації роботи конвеєрної лінії, що забезпечує підвищення продуктивності виробництва шляхом виявлення та усунення вузьких місць, балансування навантаження та впровадження методології 5S.

У роботі виконано аналіз існуючих підходів до оптимізації виробничих ліній. Розроблено методику хронометражу операцій та реєстрації параметрів конвеєра з подальшою обробкою даних. Реалізовано алгоритм виявлення вузьких місць на основі статистичного аналізу часових рядів продуктивності. Запропоновано метод балансування швидкості конвеєра із застосуванням критерію мінімізації простоїв. Розраховано показник загальної ефективності обладнання (OEE) як інтегральний критерій оцінювання результатів оптимізації. Інтегровано методологію 5S для організації робочих місць і скорочення нераціональних витрат часу. Програмну реалізацію системи виконано мовою Python у середовищі Visual Studio Code з використанням бібліотек pandas, numpy та matplotlib для обробки й візуалізації даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості безпосереднього впровадження розробленої системи на виробничих підприємствах для підвищення пропускної здатності конвеєрних ліній та зниження виробничих втрат.

Ключові слова: КОНВЕЄРНА ЛІНІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ХРОНОМЕТРАЖ, ВУЗЬКІ МІСЦЯ, БАЛАНСУВАННЯ, OEE, МЕТОДОЛОГІЯ 5S, PYTHON.

ABSTRACT

The qualification work considers the issues of optimizing the production process of the conveyor process. The subject of the study are methods and means of increasing the productivity of the conveyor line based on the integration of methods, measurement tools, analysis and optimization.

The purpose of the work is to develop a system for optimizing the operation of the conveyor line, which ensures increased production productivity by identifying and eliminating bottlenecks, load balancing and implementing the 5S methodology.

The work analyzes existing approaches to optimizing production lines. A method for timing operations and registering conveyor parameters with subsequent data processing has been developed. An algorithm for identifying bottlenecks based on statistical analysis of productivity time series has been implemented. A method for balancing conveyor speed using the downtime minimization criterion has been proposed. The overall equipment effectiveness (OEE) indicator has been calculated as an integral criterion for evaluating optimization results. The 5S methodology has been integrated for organizing workplaces and reducing irrational time consumption.

The software implementation of the system was performed in Python in the Visual Studio Code environment using pandas, numpy, and matplotlib libraries for data processing and visualization. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of direct implementation of the developed system at manufacturing enterprises to increase the throughput of conveyor lines and reduce production losses.

Keywords: CONVEYOR LINE, OPTIMIZATION, TIMELINE, BOTTLE POINTS, BALANCING, OEE, 5S METHODOLOGY, PYTHON.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. Особливості використання конвеєрних ліній	12
1.1. Конвеєрні лінії: класифікація та принципи роботи	12
1.2. Проблематика оптимізації конвеєрних систем	18
1.3. Огляд існуючих методів і систем оптимізації	20
1.4. Постановка задачі дослідження	23
2. Оптимізація та моделювання конвеєрної лінії	25
2.1. Модель конвеєрної лінії та методи оптимізації в задачах управління	25
2.2. Діаграма оптимізації швидкостей та завантаження лінії	30
2.3. Критерії оцінювання продуктивності системи	35
3. Програмна реалізація системи оптимізації	40
3.1. Алгоритм оптимізації конвеєрного виробництва та структура програмного забезпечення системи	40
3.2. Програмна реалізація методів оптимізації роботи конвеєрів	44
3.3. Програмна реалізація узагальненого модуля оптимізації	49
ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система оптимізації роботи конвеєрної лінії з метою підвищення продуктивності / Conveyor line optimization system to increase productivity	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Тужеляк онок							
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	77	
Консульт.						ЗУНУ ФКІТ АКІТ-41			
Н. Контр.		Масляк Б.О.							
Затверд.		Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОЕЕ - Overall Equipment Effectiveness — загальна ефективність обладнання

ВМ - вузьке місце — робоча операція з максимальним цикловим часом

КЛ - конвеєрна лінія

ПЗ - програмне забезпечення

ЧЦ - час циклу — тривалість виконання однієї виробничої операції

БД База даних

МК-Мікроконтролер

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Промислові конвеєрні лінії займають центральне місце в організації безперервного виробництва у провідних галузях сучасної економіки. Машинобудування, харчова та переробна промисловість, хімічна галузь, виробництво будівельних матеріалів і побутової електроніки — усі вони тією чи іншою мірою спираються на конвеєрне транспортування та складання як основний технологічний принцип. Конвеєрна лінія забезпечує безперервний рух предметів праці від однієї операції до іншої, суттєво скорочуючи час виробничого циклу та знижуючи потребу в ручній праці [1, 2].

Разом з тим практика експлуатації показує, що значна частина виробничого потенціалу конвеєрних систем залишається нереалізованою. Нерівномірне завантаження окремих ділянок, нераціональні швидкісні режими, відсутність механізмів адаптації до мінливого вхідного потоку — усе це призводить до простоїв, накопичення незавершеного виробництва та надмірного енергоспоживання. За оцінками галузевих аналітиків, виробничі втрати через неефективне управління режимами роботи конвеєрних ліній сягають від 15 до 25 відсотків від потенційно досяжної потужності підприємства [1].

В умовах зростання вартості енергоносіїв і посилення конкурентного тиску питання підвищення ефективності конвеєрних систем набуває особливого значення для вітчизняних підприємств. Цифрові технології та методи автоматичного управління відкривають нові можливості для вирішення цих завдань. Системи оптимізації, побудовані на основі математичних моделей і алгоритмів адаптивного регулювання, дозволяють в реальному часі коригувати режими роботи конвеєра з урахуванням поточного стану виробничого процесу, мінімізуючи таким чином втрати продуктивності та питомі витрати ресурсів.

Особливо актуальним впровадження таких систем є для українських підприємств у кількох стратегічно важливих сферах. У машинобудуванні та металообробці, де конвеєрні лінії використовуються для складання агрегатів і вузлів, навіть незначне підвищення коефіцієнта використання обладнання

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

безпосередньо позначається на обсягах випуску продукції. Харчова та переробна промисловість є ще одним перспективним напрямом: безперервний характер виробництва в поєднанні з жорсткими вимогами до якості і термінів переробки сировини робить адаптивне управління конвеєром вкрай важливим чинником конкурентоспроможності. Виробництво будівельних матеріалів — цегли, блоків, плитки — традиційно спирається на конвеєрні технології; підвищення їх ефективності сприяє зниженню собівартості продукції. Нарешті, підприємства легкої промисловості та складання електроніки також можуть отримати відчутний економічний ефект завдяки оптимізації завантаження поточних ліній [2, 3].

Таким чином, розроблення системи оптимізації роботи конвеєрної лінії є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності та конкурентоспроможності вітчизняних виробничих підприємств.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є розроблення та верифікація системи оптимізації роботи конвеєрної лінії, що забезпечує підвищення продуктивності шляхом адаптивного управління швидкісними режимами та завантаженням ділянок.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. провести аналіз існуючих конвеєрних систем і визначити основні причини втрат продуктивності;
2. розробити математичну модель конвеєрної лінії та формалізувати задачу оптимізації;
3. розробити алгоритм оптимізації та обрати відповідний метод розв'язання;
4. спроектувати апаратно-програмний комплекс системи автоматизованого управління;
5. оцінити ефект від впровадження системи за ключовими показниками ефективності (ОЕЕ, питомі енерговитрати, час простоїв).

Об'єкт та предмет дослідження

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

Об'єктом дослідження є процес функціонування промислової конвеєрної лінії в умовах змінного вхідного потоку та динамічних збурень.

Предметом дослідження є методи та засоби оптимізації режимів роботи конвеєрної лінії, що забезпечують підвищення продуктивності та зниження питомих витрат ресурсів.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс взаємодоповнювальних наукових методів. Системний аналіз застосовується для дослідження конвеєрної лінії як складної виробничої системи з урахуванням взаємозв'язків між її елементами. Математичне моделювання динамічних систем слугує основою для формалізованого опису процесів транспортування та обробки виробів. Теорія оптимального управління надає інструментарій для постановки та розв'язання задачі мінімізації цільової функції втрат продуктивності. Порівняльний аналіз ефективності дозволяє оцінити результати впровадження розробленої системи відносно базового варіанту управління [4].

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано алгоритм адаптивної оптимізації конвеєрної лінії, який на відміну від відомих підходів враховує динамічні зміни вхідного потоку в реальному часі та дозволяє мінімізувати простой вузьких місць шляхом превентивного коригування швидкісних режимів дільниць. Алгоритм поєднує прогнозну складову на основі ковзного середнього з реактивним регулятором, що забезпечує стійкість системи управління за умов стохастичних збурень.

Практична значущість. Практична значущість результатів роботи визначається можливістю безпосереднього впровадження розробленої системи на підприємствах з конвеєрним виробництвом. Використання запропонованого алгоритму управління дозволяє знизити питомі енерговитрати на 8–12 відсотків і підвищити показник загальної ефективності обладнання OEE (Overall Equipment Effectiveness) на 10–18 відсоткових пунктів порівняно з традиційними методами управління. Система може бути реалізована на базі серійних промислових контролерів і інтегрована в існуючу SCADA-інфраструктуру підприємства без суттєвих капітальних витрат.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Структура роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі виконано огляд існуючих конвеєрних систем і методів їх оптимізації. Другий розділ присвячено розробленню математичної моделі конвеєрної лінії та постановці задачі оптимізації. У третьому розділі описано алгоритм оптимізації та апаратно-програмний комплекс системи управління. Четвертий розділ містить результати верифікації системи та оцінку економічного ефекту від її впровадження. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок; вона містить ____ рисунків, ____ таблиць і ____ найменувань у списку використаних джерел.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

1. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЙ

1.1. Конвеєрні лінії: класифікація та принципи роботи

Конвеєрна лінія являє собою автоматизовану транспортно-технологічну систему, призначену для безперервного або ритмічного переміщення предметів праці між технологічними позиціями у строго визначеному просторово-часовому порядку. На відміну від дискретних транспортних засобів, конвеєр виключає зупинки між операціями, забезпечуючи безперервний матеріальний потік і ритмічний випуск готових виробів. З точки зору системного аналізу конвеєрна лінія розглядається як кібернетична система, входами якої є вхідний потік заготовок або комплектуючих, енергоносії та управляючі сигнали, а виходами — готова продукція, що передається на наступний виробничий етап [3-6].

Стан системи в кожний момент часу описується набором параметрів: положенням предметів праці на конвеєрі, швидкістю руху тягового органу, завантаженістю кожної робочої позиції та технічним станом приводних механізмів. Саме сукупність цих параметрів і є предметом управління та оптимізації в системі, що розробляється в цій роботі.

1.1.1. Стрічкові конвеєри

Стрічкові конвеєри є найбільш поширеним типом транспортно-технологічного обладнання і використовуються для переміщення сипких, штучних і пакованих вантажів на горизонтальних і похилих трасах. Тяговим і несучим органом слугує гнучка безкінечна стрічка із прогумованої тканини, поліестеру або сталевого корду, яка огинає привідний і натяжний барабани та спирається на роликоопори. Привідний барабан, з'єднаний через редуктор з електродвигуном, передає рушійне зусилля стрічці за рахунок тертя. Натяжний пристрій (вантажний або гвинтовий) забезпечує необхідне попереднє натягнення стрічки, без якого неможлива надійна передача тягового зусилля [1].

Конструктивна схема стрічкового конвеєра з позначенням основних вузлів і точок вимірювання наведена на рисунку 1.1.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

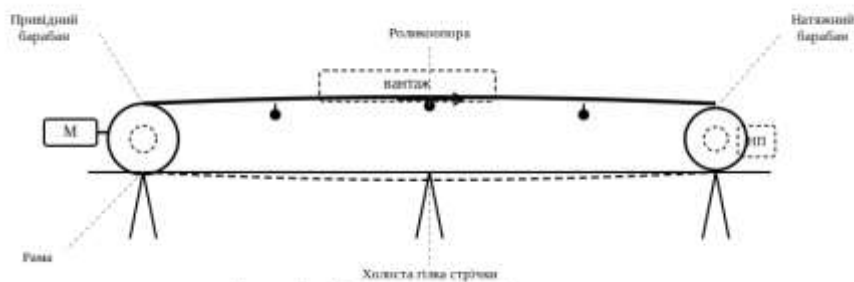


Рисунок 1.1 — Конструктивна схема стрічкового конвеєра

Рисунок 1.1 — Конструктивна схема стрічкового конвеєра: М — електродвигун; НП — натяжний пристрій

Основні характеристики стрічкових конвеєрів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Технічні характеристики стрічкових конвеєрів

Параметр	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Швидкість стрічки	м/с	0,1 — 4,0
Ширина стрічки	мм	300 — 2000
Продуктивність (сипкі)	т/год	до 20 000
Продуктивність (штучні)	шт./год	200 — 10 000
Кут нахилу траси	градус	до 18° (без шевронів)
Встановлена потужність приводу	кВт	0,55 — 1 000
Довжина лінії	м	1 — 5 000

Ланцюгові конвеєри застосовуються там, де необхідна підвищена тягова сила або де умови роботи виключають використання стрічки — підвищені температури (до 500 °С), агресивне середовище, значні маси транспортованих деталей. Тяговим органом є одна або дві безкінечні ланцюги, що зачіплюються з привідними та натяжними зірочками. До ланцюгів кріпляться робочі елементи — скреперні планки, гачки, пластинчасті платформи або підвіски. У машинобудуванні підвісні ланцюгові конвеєри широко використовуються для транспортування кузовів автомобілів між постами складального і фарбувального виробництва [2].

Конструктивна схема підвісного ланцюгового конвеєра наведена на рисунку 1.2.

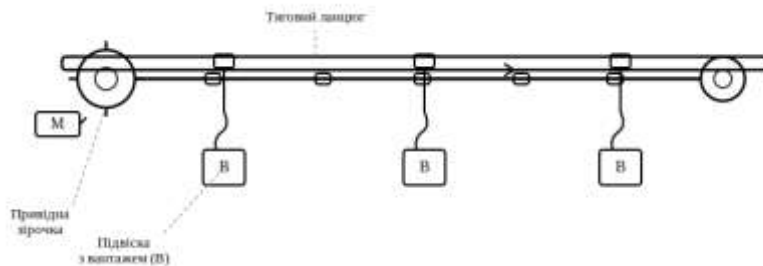


Рисунок 1.2 — Конструктивна схема підвісного ланцюгового конвеєра: М — електродвигун; В — вантаж на підвісці

Таблиця 1.2 — Технічні характеристики ланцюгових конвеєрів

Параметр	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Швидкість ланцюга	м/с	0,01 — 1,0
Крок ланцюга	мм	50 — 320
Маса одиночного вантажу	кг	до 5 000
Тягове зусилля	кН	5 — 500
Робоча температура середовища	°С	до 500
Довжина лінії	м	до 2 000

Роликові конвеєри відрізняються тим, що несучою поверхнею слугує серія роликів, розташованих перпендикулярно напрямку руху вантажу. Ролики встановлюються у підшипникових вузлах на боковій рамі конвеєра і можуть бути як вільнообертальними (гравітаційні рольганги), так і приводними. У гравітаційних конвеєрах рух забезпечується нахилом траси та власною вагою вантажу, а у приводних — від централізованого або децентралізованого електроприводу через ланцюгову або пасову передачу [3].

Роликові конвеєри особливо ефективні для переміщення тарно-штучних вантажів — ящиків, піддонів, бочок, рулонів — у складських і розподільних центрах, а також у деревообробній і металообробній промисловості. Конструктивна схема приводного роликового конвеєра наведена на рисунку 1.3.

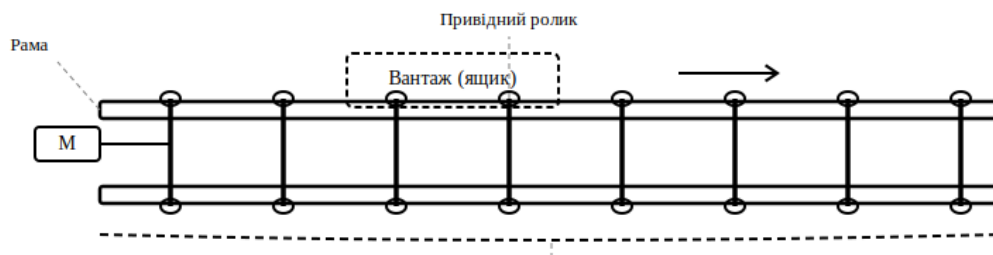


Рисунок 1.3 — Конструктивна схема приводного роликового конвеєра: М — електродвигун

Таблиця 1.3 — Технічні характеристики роликових конвеєрів

Параметр	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Швидкість переміщення вантажу	м/с	0,05 — 1,5
Крок роликів	мм	50 — 300
Діаметр ролика	мм	40 — 160
Маса одиничного вантажу	кг	до 3 000
Ширина колії	мм	200 — 1 200
Потужність приводу	кВт	0,12 — 22

Гвинтові конвеєри призначені переважно для транспортування сипких і пастоподібних матеріалів у горизонтальному або похилому (до 45°) напрямку. Принцип роботи заснований на обертанні суцільної або стрічкової гвинтової лопаті, змонтованої на валу всередині нерухомого циліндричного кожуха. Під час обертання лопать захоплює матеріал і переміщує його вздовж осі конвеєра. Гвинтові конвеєри компактні, можуть бути повністю герметизовані і придатні для роботи у вибухонебезпечному та хімічно агресивному середовищі [2].

Гвинтові конвеєри широко застосовуються в хімічній, зернопереробній, будівельній і харчовій промисловості. Поздовжній розріз гвинтового конвеєра наведено на рисунку 1.4.

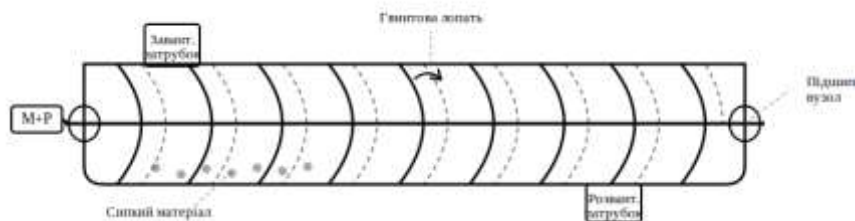


Рисунок 1.4 — Поздовжній розріз гвинтового конвеєра: М+Р — електродвигун з редуктором

Таблиця 1.4 — Технічні характеристики гвинтових конвеєрів

Параметр	Одиниця вимірювання	Типовий діапазон
Частота обертання шнека	об/хв	20 — 200
Діаметр шнека	мм	100 — 800
Продуктивність	т/год	1 — 100
Кут нахилу	градус	до 45°
Довжина секції	м	до 12
Потужність приводу	кВт	0,25 — 75

Кінематичні та динамічні параметри конвеєрів.

Швидкість руху тягового органу v [м/с] є ключовим кінематичним параметром конвеєра, що безпосередньо визначає продуктивність лінії та тривалість виконання кожної операції. На більшості сучасних ліній швидкість регулюється перетворювачем частоти у діапазоні від 0,1 до 4,0 м/с залежно від типу виробництва та виду вантажу.

Тягове зусилля F [Н] — це сила, що забезпечує переміщення тягового органу разом з вантажем. Воно складається з опору переміщенню вантажу на робочій гілці, опору холостої гілки та опору в місцях завантаження і вивантаження. Потужність приводу P [кВт] пов'язана з тяговим зусиллям і швидкістю формулою:

$$P = F \cdot v / \eta,$$

де η — ккд трансмісії (зазвичай 0,85–0,92). Для стрічкових конвеєрів тягове зусилля з урахуванням коефіцієнта опору ω та довжини L визначається як:

$$F = (q_v + q_x + q_p) \cdot g \cdot \omega \cdot L + q_v \cdot g \cdot H,$$

де q_v , q_x , q_p — лінійна маса вантажу, стрічки і роликоопор [кг/м] відповідно;

H — висота підйому [м]; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Пропускна спроможність Q [шт./год] для штучних вантажів визначається як:

$$Q = 3600 \cdot v / a,$$

де a — крок розміщення виробів на стрічці [м].

Для сипких матеріалів продуктивність у т/год визначається через лінійну густину вантажу на стрічці ρ_l [кг/м]:

$$Q = 3,6 \cdot \rho_l \cdot v.$$

Типові компоновки виробничих ліній

Послідовна (лінійна) компоновка є найпростішою і передбачає розташування всіх робочих позицій вздовж однієї осі конвеєра. Такий підхід характерний для однотипних масових виробництв, де технологічний процес має строго лінійну структуру без розгалужень. Паралельна компоновка використовується тоді, коли час виконання однієї з операцій значно перевищує такт потокової лінії: дублюють відповідну позицію, а вироби розподіляються між паралельними місцями рівномірно. Деревоподібна компоновка властива складальним виробництвам, де кілька підживлювальних ліній зливаються в одну головну — за аналогією з припливами, що впадають у річку [1].

Показник OEE (Overall Equipment Effectiveness) є узагальненим індикатором ефективності конвеєрної лінії і розраховується як:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q_u,$$

де A — коефіцієнт доступності (час роботи / плановий час);

P — коефіцієнт продуктивності (фактичний темп / паспортний темп);

Q_u — коефіцієнт якості (придатні вироби / усього виготовлено).

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Для більшості промислових підприємств України ОЕЕ перебуває в межах 0,45–0,65, тоді як світові лідери досягають 0,80–0,90 [3, 4].

1.2. Проблематика оптимізації конвеєрних систем

Питання оптимізації конвеєрних систем є предметом досліджень упродовж кількох десятиліть, однак його практична актуальність не зменшується, а в умовах цифрової трансформації промисловості лише зростає. Класичні підходи до організації поточного виробництва, розроблені у першій половині ХХ століття, погано адаптуються до мінливих ринкових умов, коли асортимент продукції швидко змінюється, а вимоги до гнучкості виробничих систем стають дедалі жорсткішими [3-6].

Вузькі місця та нерівномірне завантаження. Поняття «вузьке місце» (bottleneck) позначає ту ділянку виробничого процесу, пропускна спроможність якої є найнижчою і яка тому визначає максимально можливий обсяг випуску всієї лінії. За теорією обмежень Голдратта, будь-які покращення на інших ділянках без усунення вузького місця є марними з точки зору зростання загального обсягу випуску [4]. Якщо час виконання операції на i -й позиції позначити через t_i , а такт потокової лінії — через $T_{\text{такт}}$, то вузьке місце — це позиція j , для якої:

$$t_j = \max \{ t_1, t_2, \dots, t_n \} > T_{\text{такт}}.$$

У цьому разі на позиції j утворюється черга незавершених виробів, тоді як попередні позиції змушені або сповільнювати роботу, або накопичувати надлишковий буфер, а наступні — простоювати в очікуванні. Обидва ефекти негативно впливають на ефективність використання ресурсів.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

Нерівномірне завантаження дільниць виникає навіть за відсутності явного вузького місця, якщо часи операцій суттєво відрізняються між собою. Коефіцієнт нерівномірності завантаження визначається як:

$$K_{\text{нер}} = (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) / T_{\text{такт}},$$

і при $K_{\text{нер}} > 0,2$ лінія вважається незбалансованою, що потребує перегляду розподілу операцій або коригування швидкісного режиму.

Причини зниження ОЕЕ та вплив вхідного потоку. Доступність A знижується внаслідок незапланованих зупинок: відмов обладнання, переналагоджень і очікування ремонту. Продуктивність P відображає, наскільки реальна швидкість роботи лінії відповідає паспортній: навіть якщо обладнання не зупинялося, воно могло працювати на зниженій швидкості через перегрів приводу, нестачу матеріалу або підвищений знос рухомих частин. Якість Q_u враховує частку продукції, що не відповідає вимогам і потребує переробки або утилізації [5].

Реальний вхідний потік заготовок $\lambda(t)$ ніколи не є ідеально рівномірним. Пульсації вхідного потоку призводять до чергування режимів перевантаження і простою, що в середньому знижує ефективне використання обладнання на 10–20 % порівняно з ідеально рівномірним потоком. Якщо середня інтенсивність потоку λ_{avg} перевищує пропускну спроможність μ , система переходить у режим насичення і черга незавершених виробів необмежено зростає. Традиційний підхід з фіксованою швидкістю конвеєра взагалі не здатний реагувати на ці коливання.

Проблеми традиційного управління. Традиційна система управління конвеєрною лінією передбачає задання фіксованої швидкості стрічки, визначеної на етапі проектування. За умов стабільного завантаження такий підхід є прийнятним, однак він не здатний адаптуватися до змін ні у вхідному потоці, ні у стані обладнання. Відсутність зворотного зв'язку означає, що оператор отримує інформацію про стан лінії переважно візуально або через аварійну сигналізацію — тобто вже після того, як відхилення набуло критичного значення.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

Автоматичне відстеження ключових параметрів у реальному часі і, тим більше, їх прогнозне регулювання в традиційних системах відсутнє.

1.3. Огляд існуючих методів і систем оптимізації

Завдання оптимізації конвеєрних систем привертало увагу науковців і інженерів упродовж кількох десятиліть. Сьогодні існує широкий арсенал як класичних математичних методів, так і сучасних інтелектуальних підходів, а також готових промислових платформ. Вибір конкретного методу визначається характеристиками задачі: розмірністю простору рішень, наявністю або відсутністю точних математичних залежностей, вимогами до часу розрахунку та доступністю обчислювальних ресурсів [6-9].

Класичні аналітичні методи. Лінійне програмування (ЛП) є одним із перших і найбільш формалізованих підходів до оптимізації виробничих систем. За його допомогою задачу балансування конвеєрної лінії формулюють як задачу мінімізації кількості робочих місць при обмеженнях на такт і взаємозалежності операцій — так звана задача SALBP (Simple Assembly Line Balancing Problem). Класичні алгоритми ЛП гарантують знаходження глобального оптимуму, однак їх обчислювальна складність зростає поліноміально зі збільшенням числа операцій, що обмежує практичне застосування для великих ліній [7].

Теорія масового обслуговування (ТМО) пропонує імовірнісний опис процесів надходження та обробки виробів на конвеєрі. Базуючись на моделях черги M/M/1 або M/G/1, аналітик може в замкнутій аналітичній формі розрахувати середній час очікування в черзі та ймовірність перевантаження ділянки. Перевага ТМО полягає в отриманні аналітичних виразів, однак її застосовність обмежена для систем зі складною мережевою структурою та залежними потоками.

Метод динамічного програмування Беллмана застосовується для задач управління з кінцевим горизонтом планування і дозволяє знайти оптимальну

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

траєкторію зміни швидкості або розкладу роботи позицій. Обчислювальна складність методу зростає експоненційно зі збільшенням розмірності простору стану, що на практиці обмежує його застосування для ліній з більш ніж 4–5 керованими ділянками.

Ієрархічні системи управління: MES та SCADA

Системи виконання виробництва MES (Manufacturing Execution Systems) утворюють проміжний рівень між рівнем підприємства (ERP) і рівнем цеху (SCADA/PLC). MES відповідають за оперативне планування й диспетчеризацію, збір даних про хід виконання операцій і розрахунок фактичних показників OEE. У контексті оптимізації конвеєра MES надає алгоритму управління актуальну інформацію про виробничу програму і дозволяє заздалегідь планувати перемикання режимів при зміні асортименту [8].

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) забезпечують реальноточасовий збір, відображення та архівування вимірювальної інформації з датчиків, а також можливість дистанційного управління виконавчими пристроями. Сучасні SCADA-платформи включають модулі оптимізаторів, що дозволяють автоматично коригувати уставки контролерів на основі заданого критерію. Прикладами є Wonderware System Platform, Ignition від Inductive Automation і Genesis64 від Iconics [9].

Сучасні інтелектуальні підходи. Нечітка логіка (fuzzy logic) дозволяє формалізувати евристичні правила управління, що зазвичай використовуються досвідченими операторами. Замість чітких числових порогів нечіткий регулятор оперує лінгвістичними змінними — наприклад, «черга велика», «швидкість конвеєра висока» — і формує управляючий вплив на основі бази правил типу «якщо — то». Нечіткі регулятори для конвеєрних систем успішно застосовуються в харчовій промисловості та на підприємствах з непостійним складом продукції [6].

Нейронні мережі здатні апроксимувати складні нелінійні залежності між параметрами конвеєра і показниками ефективності. Рекурентні архітектури (LSTM, GRU) ефективні для прогнозування майбутнього стану вхідного потоку

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

на основі часових рядів. Однак нейромережеві моделі потребують значних обсягів навчальних даних і потужних обчислювальних ресурсів, що ускладнює впровадження на підприємствах середнього масштабу.

Генетичні алгоритми (ГА) є евристичними методами глобальної оптимізації, що імітують процес природного добору. Вони особливо ефективні для задач комбінаторної оптимізації — зокрема, балансування конвеєрної лінії з великою кількістю операцій і обмеженнями на їх послідовність. Перевагою ГА є незалежність від форми цільової функції, що дозволяє застосовувати їх до нелінійних і мультимодальних задач [7].

Провідні промислові платформи. Siemens TIA Portal (Totally Integrated Automation) є комплексним середовищем проектування та програмування систем автоматизації на базі контролерів серії SIMATIC S7. Платформа дозволяє реалізувати алгоритми адаптивного управління приводами конвеєра через вбудовані бібліотеки регуляторів і функціональні блоки для частотно-регульованих приводів SINAMICS. Інтеграція з хмарною платформою MindSphere забезпечує можливість аналізу даних на рівні підприємства [10].

Rockwell Automation FactoryTalk є набором програмних продуктів, що охоплює рівні SCADA (FactoryTalk View), MES (FactoryTalk ProductionCentre) і аналітики (FactoryTalk Analytics). Schneider Electric EcoStruxure є відкритою IoT-орієнтованою архітектурою, що об'єднує польовий рівень (датчики, приводи Altivar), рівень управління (Modicon M580) і рівень застосунків (EcoStruxure Advisor) із вбудованими алгоритмами енергоефективного керування приводами.

Порівняльна характеристика методів оптимізації.

Таблиця 1.5 — Порівняльна характеристика методів оптимізації конвеєрних систем

Метод / система	Точність	Обчисл. складність	Придатність до реального часу	Потреба у вхідних даних
Лінійне програмування	Висока (лінійні задачі)	Середня	Обмежена	Нормативи

Метод / система	Точність	Обчисл. складність	Придатність до реального часу	Потреба у вхідних даних
Теорія масового обслуговування	Середня	Низька	Висока	Статистика
Нечітка логіка	Середня	Низька	Висока	Мінімальна
Нейронні мережі	Висока	Дуже висока	Середня	Велика вибірка
Генетичні алгоритми	Висока (глобальна)	Дуже висока	Низька	Нормативи
MES-системи	Висока	Середня	Висока	Інтеграція ERP
SCADA-оптимізатори	Середня–висока	Середня	Висока	Реальночасовий потік

Аналіз таблиці 1.5 свідчить про те, що для умов роботи в реальному часі з мінливим вхідним потоком і обмеженими обчислювальними ресурсами найкращим є поєднання спрощеної аналітичної моделі з елементами нечіткого або адаптивного регулювання. Саме цей підхід є концептуальною основою системи, що розробляється в цій роботі.

1.4. Постановка задачі дослідження

На підставі проведеного аналізу конвеєрних систем, їх типових проблем і існуючих методів оптимізації сформульовано технічне завдання на систему, що розробляється, і визначено математичну постановку задачі оптимізації.

Постановка завдання по проектуванню систему оптимізації.

Система оптимізації роботи конвеєрної лінії повинна виконувати моніторинг стану лінії в реальному часі і адаптивно змінювати швидкість конвеєра у відповідь на зміни вхідного потоку виробів без зупинки лінії та без участі оператора. Вона зобов'язана ідентифікувати виникнення вузьких місць і автоматично вживати превентивних заходів — коригування швидкості підведення або формування буферних запасів — до моменту, коли черга набуде критичного розміру. Крім того, система має реєструвати всі відхилення від нормального режиму для наступного аналізу та підтримувати інтерфейс з

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

існуючою SCADA-системою підприємства через стандартний протокол обміну даними.

Цільова функція оптимізації. Задачу оптимізації сформульовано як задачу максимізації ефективної продуктивності конвеєрної лінії $Q_{eff}(t)$ за обмежень на встановлену потужність приводів і допустимі діапазони швидкостей:

$$Q_{eff}(t) = Q_{max} \cdot A(t) \cdot P(t) \cdot Q_y(t) \rightarrow \max,$$

де Q_{max} — паспортна продуктивність лінії [шт./год];

$A(t)$ — коефіцієнт доступності у момент t ; $P(t)$ — коефіцієнт продуктивності; $Q_y(t)$ — коефіцієнт якості.

Альтернативною постановкою є мінімізація часу виробничого циклу $T_{ц}$ для партії виробів об'ємом N :

$$T_{ц}(N) = N / Q_{eff} + T_{перех} \rightarrow \min,$$

де $T_{перех}$ — сумарний час перехідних процесів при зміні режимів.

Оскільки обидва критерії тісно пов'язані, в роботі як основну цільову функцію обрано максимізацію Q_{eff} з додатковим обмеженням на питомі енерговитрати:

$$e(v) = P(v) / Q(v) \leq e_{max} \quad [\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{шт.}].$$

Обмеження задачі оптимізації. Вектор управляючих змінних $u(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_k(t)\}$ включає швидкості тягового органу на k регульованих ділянках лінії. На кожну швидкість накладається обмеження діапазону:

$$v_{min,i} \leq v_i(t) \leq v_{max,i}, \quad i = 1, \dots, k,$$

де $v_{min,i}$ і $v_{max,i}$ визначені конструктивними характеристиками конвеєра та вимогами технологічного процесу. Навантаження на i -й привід не повинно перевищувати номінальне:

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$F_i(t) \cdot v_i(t) \leq P_{nom,i} / \eta_i.$$

На зміну швидкості накладається обмеження щодо швидкості наростання, що запобігає динамічним ударам у трансмісії:

$$|dv_i/dt| \leq a_{max,i} \text{ [м/с}^2\text{]}.$$

Довжина черги незавершених виробів перед кожною позицією $q_i(t)$ не повинна перевищувати ємність проміжного буфера:

$$0 \leq q_i(t) \leq B_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Параметри управління та вимірювані величини. Перелік вимірюваних величин, що є вхідними даними для алгоритму оптимізації, охоплює: інтенсивність вхідного потоку $\lambda(t)$ [шт./хв]; довжину черг перед кожною позицією $q_i(t)$ [шт.]; фактичну швидкість кожного приводу $v_i(t)$ [м/с]; споживану потужність кожного приводу $P_i(t)$ [кВт]; сигнали датчиків стану — кінцевих вимикачів, термодатчиків і вібраційних датчиків. Параметрами управління, що формуються алгоритмом, є уставки швидкості v_i^* для кожного перетворювача частоти, а також сигнали управління заслінками та живильниками буферних накопичувачів.

Зазначений перелік параметрів складас вхідні і вихідні дані математичної моделі конвеєрної лінії, яка розробляється у наступному розділі. Дворівнева структура управління — внутрішній контур регулювання швидкості і зовнішній контур оптимізації — є концептуальною основою апаратно-програмного комплексу, що описується у третьому розділі роботи.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕЄРНОЇ ЛІНІЇ

2.1. Модель конвеєрної лінії та методи оптимізації в задачах управління

Для розроблення ефективної системи оптимізації необхідно насамперед побудувати формалізований опис конвеєрної лінії як об'єкта управління. Такий опис включає структуру системи, множину вхідних і вихідних змінних, а також рівняння, що зв'язують ці змінні між собою і визначають динаміку процесу. Лише на основі формалізованої моделі можна коректно поставити задачу оптимізації та обрати адекватний алгоритм її розв'язання [6-9].

2.1.1. Структура конвеєрної лінії як об'єкта управління

Конвеєрна лінія розглядається як дискретно-неперервна система з n послідовними позиціями обробки $P_1, P_2, \dots, P_n$ та $k \leq n$ регульованими ділянками транспортування, кожна з яких обладнана перетворювачем частоти і може мати незалежно встановлену швидкість руху тягового органу. Між суміжними позиціями розташовані проміжні буфери ємністю V_i [шт.], що запобігають безпосередній жорсткій залежності між продуктивністю сусідніх ділянок.

Структурна схема конвеєрної лінії як об'єкта управління з позначенням всіх вузлів, потоків і каналів зворотного зв'язку наведена на рисунку 2.1.

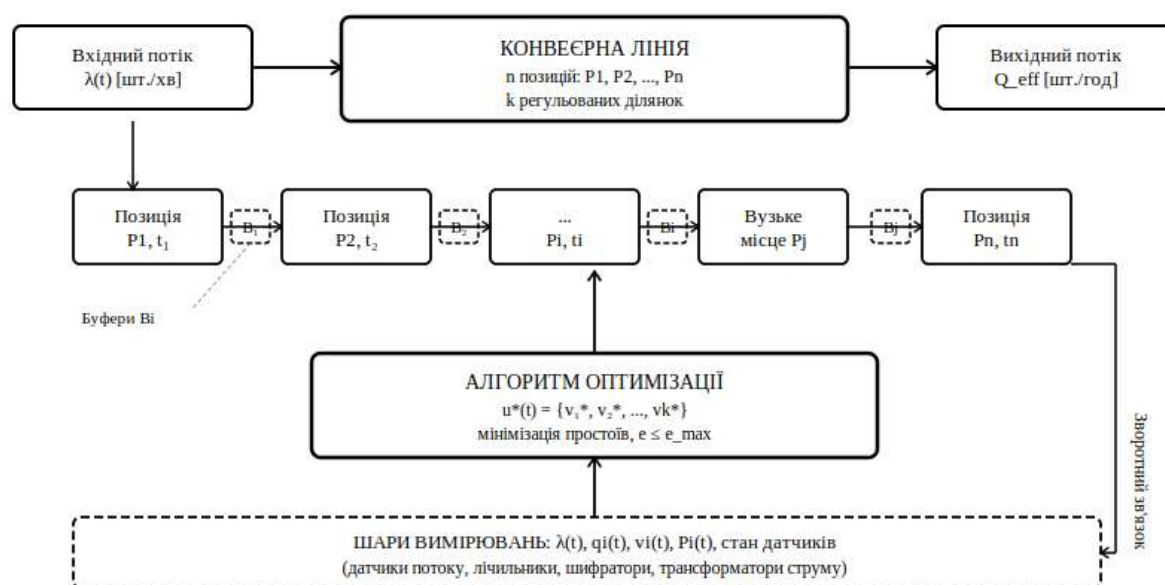


Рисунок 2.1 — Структурна схема конвеєрної лінії як об'єкта управління

Стан конвеєрної лінії в момент часу t описується вектором стану $x(t)$:

$$x(t) = \{ q_i(t), v_i(t), P_i(t) \}, \quad i = 1, \dots, n,$$

де $q_i(t)$ [шт.] — довжина черги перед i -ю позицією; $v_i(t)$ [м/с] — швидкість тягового органу на i -й ділянці; $P_i(t)$ [кВт] — споживана потужність i -го привода.

Вектор управляючих дій:

$$u(t) = \{ v_1^*(t), v_2^*(t), \dots, v_k^*(t) \},$$

де v_i^* — задана (оптимальна) швидкість для i -ї регульованої ділянки, що передається як уставка на відповідний перетворювач частоти.

2.1.2. Множина контрольованих вхідних параметрів та їх вплив на продуктивність

Ефективна продуктивність конвеєрної лінії залежить від великої кількості вхідних параметрів, що поділяються на керовані (параметри управління) і некеровані (збурення). До керованих параметрів належать: швидкість кожної регульованої ділянки $v_i^*(t)$, режим роботи буферних накопичувачів (заповнення/спустошення), а також у ряді випадків — тривалість і послідовність технологічних операцій при перемиканні асортименту.

До некерованих параметрів (збурень) належать: інтенсивність вхідного потоку заготовок $\lambda(t)$ [шт./хв], що є стохастичним процесом; варіативність часів виконання операцій $\Delta t_i(t)$, зумовлена неоднорідністю матеріалу, кваліфікацією персоналу та зносом інструменту; непрогнозовані відмови обладнання, що спричиняють раптові зупинки одночасно кількох позицій.

Причинно-наслідкова діаграма факторів впливу на продуктивність конвеєрної лінії наведена на рисунку 2.2. Структура діаграми відповідає класичному методу Ісікави і дозволяє систематизувати чинники за шістьма категоріями: швидкість, завантаженість, вхідний потік, доступність, якість та енергетика [2].

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

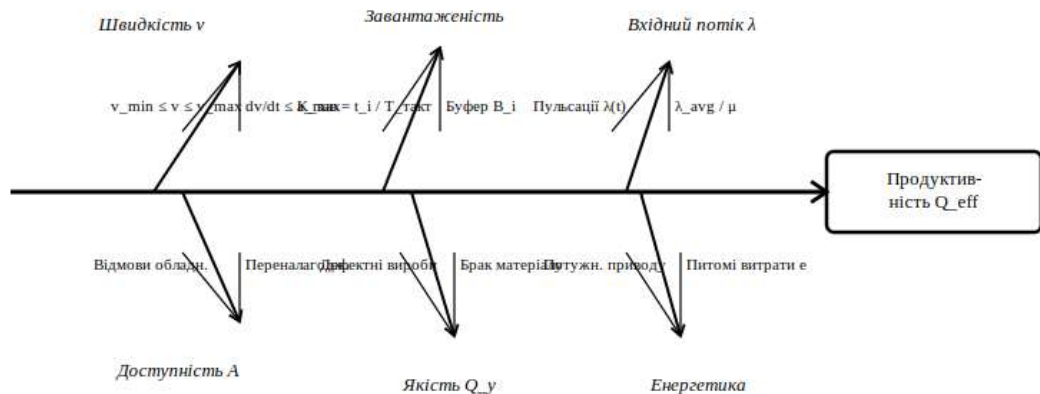


Рисунок 2.2 — Причинно-наслідкова діаграма факторів продуктивності (діаграма Ісікави)

Кількісний вплив швидкості на ефективну продуктивність описується наступним виразом. Якщо позначити через t_i час виконання операції на i -й позиції, а через v поточну швидкість тягового органу, що визначає крок подачі $a = v / f$ (де f — частота подачі [шт./с]), то фактична пропускна спроможність i -ї ділянки:

$$\mu_i(v) = v_i / a_i = 3600 \cdot v_i / a_i \text{ [шт./год]}.$$

Продуктивність всієї лінії обмежена мінімальною пропускною спроможністю серед усіх позицій:

$$Q_{\text{лін}} = \min \{ \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n \}.$$

Звідси безпосередньо випливає, що збільшення швидкості на ділянці, яка не є вузьким місцем, не призводить до зростання $Q_{\text{лін}}$, а лише збільшує накопичення перед вузьким місцем. Тому ефективне управління полягає в диференційованому регулюванні швидкостей окремих ділянок, а не у пропорційному збільшенні швидкості всього конвеєра.

2.1.3. Математична модель динаміки черг

Динаміка черги $q_i(t)$ перед i -ю позицією описується диференціальним рівнянням балансу потоків:

$$dq_i/dt = \lambda_i(t) - \mu_i(t) \cdot \mathbf{1}\{q_i > 0\}, \quad i = 1, \dots, n,$$

де $\lambda_i(t)$ — інтенсивність надходження виробів на i -ту позицію (для першої позиції $\lambda_1(t) \equiv \lambda(t)$ — зовнішній вхідний потік); $\mu_i(t)$ — пропускна спроможність i -ї позиції; $\mathbf{1}\{q_i > 0\}$ — індикаторна функція (черга існує). Обмеження на чергу:

$$0 \leq q_i(t) \leq B_i.$$

Якщо $q_i(t)$ досягає B_i , то підвідна ділянка $(i-1)$ -ї позиції автоматично сповільнюється, що реалізується через сигнал зворотного зв'язку на перетворювач частоти. Аналогічно, якщо $q_i(t) = 0$ і $\lambda_i < \mu_i$, позиція P_i простоює — так формується «голодування» (starvation).

2.1.4. Формування коригуючих дій: управління швидкістю та запасами

Система формує два типи коригуючих дій. Управління швидкістю руху тягового органу є основним механізмом і реалізується через зміну завдання перетворювача частоти у діапазоні $[v_{\min,i}; v_{\max,i}]$. Збільшення швидкості на підвідній ділянці скорочує час транспортування від попередньої позиції і тим самим зменшує ризик «голодування» вузького місця. Зниження швидкості — навпаки, запобігає переповненню буфера і надмірному накопиченню черги.

Управління запасами (буферами) є допоміжним механізмом і полягає у цілеспрямованому формуванні або спустошенні буферного накопичувача. Якщо система прогнозує зростання $\lambda(t)$ у найближчі Δt хвилин (наприклад, на основі ковзного середнього), вона заздалегідь збільшує швидкість підвідних ділянок для формування запасу перед вузьким місцем, не чекаючи фактичного накопичення черги.

Алгоритм формування коригуючих дій у вигляді блок-схеми наведено на рисунку 2.3. Алгоритм реалізує трирівневу логіку прийняття рішень: перевірка наявності вузьких місць, перевірка відповідності вхідного потоку пропускній спроможності та перевірка питомих енерговитрат.

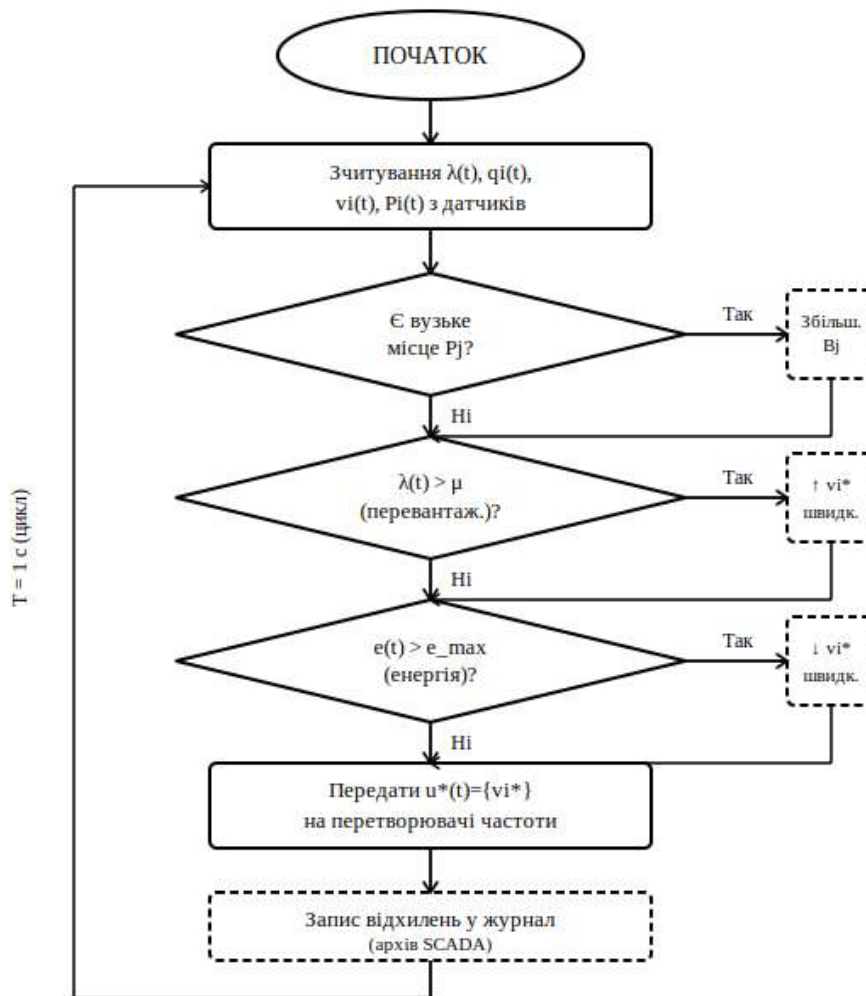


Рисунок 2.3 — Алгоритм формування коригуючих дій системи оптимізації

Таблиця 2.1 систематизує вхідні параметри, що контролюються системою, із зазначенням методу вимірювання, одиниці та впливу на продуктивність.

Таблиця 2.1 — Множина контрольованих параметрів системи оптимізації

Параметр	Позначення	Одиниця	Метод вимірювання	Вплив на Q_eff
Інтенсивність вхідного потоку	$\lambda(t)$	шт./хв	Оптичний або індуктивний датчик	Прямий: зростання $\lambda \rightarrow \uparrow Q$ при $\mu > \lambda$
Довжина черги перед P_i	$q_i(t)$	шт.	Лічильник виробів + датчик рівня буфера	Сигнал наявності/відсутності вузького місця
Швидкість ділянки i	$v_i(t)$	м/с	Шифратор (encoder) на валу двигуна	Пряме управління μ_i
Споживана потужність P_i	$P_i(t)$	кВт	Трансформатор струму + перетворювач частоти	Контроль $e = P/Q \leq e_{\max}$

Час операції на P_i	t_i	c	Хронометраж / таймер ПЛК	Визначає $T_{\text{такт}}$ та вузькі місця
Стан обладнання (OK/fail)	$si(t)$	бул.	Кінцеві вимикачі, вібродатчики	Входить у $A(t)$

2.2. Діаграма оптимізації швидкостей та завантаження лінії

Для практичного застосування алгоритму оптимізації необхідно візуалізувати розподіл завантаженості позицій і динаміку зміни швидкостей у часі. Ці два аспекти є взаємопов'язаними: діаграма балансування відображає статичний (розрахунковий) стан рівноваги, тоді як часова діаграма швидкостей показує динамічну реакцію системи на зміни вхідного потоку. Обидва інструменти активно використовуються в промисловій практиці та методологіях 5S і Lean Manufacturing [2, 5].

2.2.1. Хронометраж і нормування праці як основа розрахунку такту

Хронометраж є первинним методом збору даних для побудови діаграми балансування конвеєрної лінії. Суть методу полягає у багаторазовому вимірюванні тривалості кожної операції в нормальних умовах і подальшому статистичному опрацюванні отриманих вибірок. Для кожної позиції P_i формується вибірка $\{t_1^{(i)}, t_2^{(i)}, \dots, t_m^{(i)}\}$ з $m \geq 20$ спостережень, після чого обчислюється середнє значення $\bar{t}_i$ та коефіцієнт варіації Cv_i :

$$\bar{t}_i = (1/m) \sum_j t_j^{(i)}, \quad Cv_i = \sigma_i / \bar{t}_i.$$

Якщо $Cv_i > 0,15$, це свідчить про значну нестабільність операції, що потребує стандартизації або додаткового навчання персоналу відповідно до принципів системи 5S (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke). Стандартизований час t_i , що використовується в розрахунках, визначається як:

$$t_i = \bar{t}_i \cdot (1 + k_{\text{доп}}),$$

де $k_{\text{доп}}$ — коефіцієнт додаткових витрат часу (регламентовані перерви, мікрозупинки), зазвичай 0,05–0,15 залежно від галузевих нормативів [5].

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Такт потокової лінії $T_{\text{такт}}$ — це інтервал часу між виходом двох суміжних виробів із лінії — розраховується виходячи з заданої програми випуску N [шт./зміну] і фонду часу зміни F [хв]:

$$T_{\text{такт}} = 60 \cdot F / N \text{ [с]}.$$

Наприклад, при $F = 480$ хв і $N = 480$ шт./зміну отримуємо $T_{\text{такт}} = 60$ с. Коефіцієнт завантаженості i -ї позиції:

$$K_i = t_i / T_{\text{такт}}.$$

При $K_i > 1$ позиція є вузьким місцем. При $K_i < 0,7$ позиція суттєво недовантажена і є кандидатом на об'єднання з сусідньою операцією.

2.2.2. Балансування конвеєрної лінії та усунення вузьких місць

Задача балансування конвеєрної лінії полягає у такому розподілі елементарних операцій між позиціями, за якого коефіцієнти завантаженості всіх позицій максимально наближені до одиниці. Кількісним критерієм якості балансування слугує ефективність балансування $E_{\text{бал}}$:

$$E_{\text{бал}} = \sum_i t_i / (n \cdot T_{\text{такт}}) \times 100 \%,$$

де n — кількість позицій. Значення $E_{\text{бал}} = 100 \%$ відповідає ідеально збалансованій лінії; на практиці досягається 85–95 %.

Для усунення вузьких місць використовують кілька підходів. Перерозподіл операцій між позиціями (декомпозиція або агрегація) є найбільш ефективним, однак він вимагає перепроєктування технологічного процесу. Паралелювання вузького місця — введення додаткової позиції або робочого місця для дублювання найтривалішої операції — дозволяє зменшити ефективний час вузького місця вдвічі без зміни технологій. Нарешті, у системах з регульованими приводами можна застосувати диференціальне управління швидкостями, при якому підвідна ділянка прискорюється для підтримки черги перед вузьким місцем [2, 4].

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Діаграма балансування конвеєрної лінії до та після оптимізації наведена на рисунку 2.4. На діаграмі штриховими стовпцями показано розподіл часів операцій до балансування, суцільними — після виконання перерозподілу. Лінія $T_{\text{такт}} = 60$ с є горизонтальним орієнтиром.

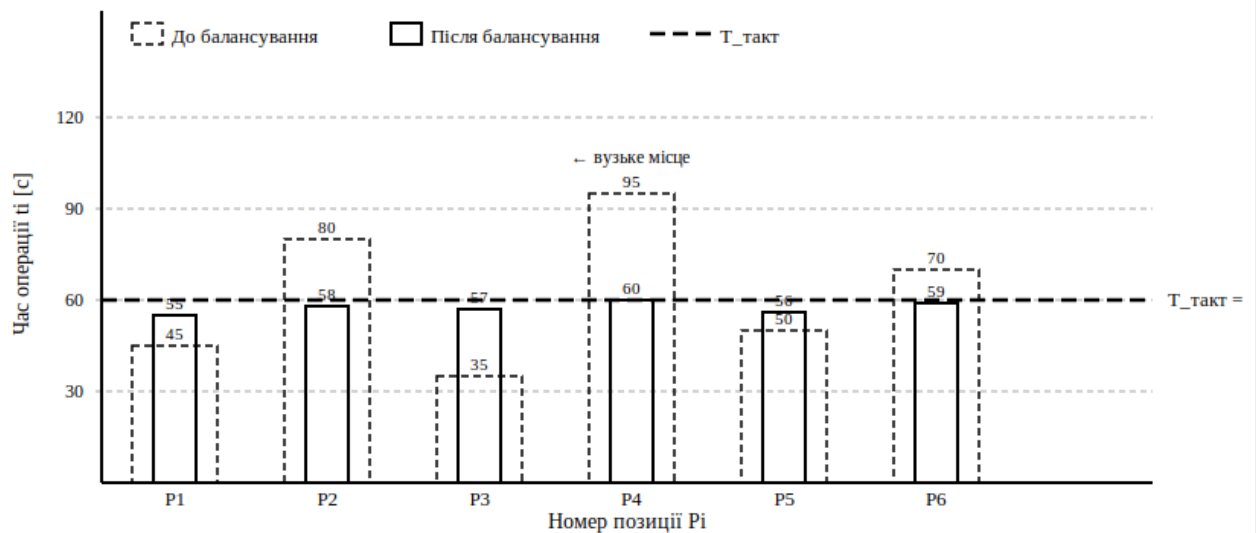


Рисунок 2.4 — Діаграма балансування конвеєрної лінії до та після оптимізації

2.2.3. Система 5S у забезпеченні стабільності часів операцій

Система 5S (сортування, систематизація, прибирання, стандартизація, дотримання дисципліни) є організаційним підґрунтям ефективного балансування конвеєрної лінії. Стандартизація (4-й принцип 5S) безпосередньо забезпечує зниження коефіцієнта варіації часів операцій Cv_i , що в свою чергу зменшує необхідний розмір буферних запасів та підвищує стабільність прогнозних оцінок $\lambda(t)$ для алгоритму оптимізації. Впровадження 5S на конвеєрних ділянках українських машинобудівних підприємств, за даними досліджень, дозволяє знизити Cv_i з 0,20–0,30 до 0,05–0,10, що суттєво спрощує завдання управління [3].

2.2.4. Діаграма оптимізації швидкостей у часі

Часова діаграма на рисунку 2.5 ілюструє роботу алгоритму оптимізації в динаміці: верхня частина показує реальний нерівномірний вхідний потік $\lambda(t)$,

нижня — оптимальну швидкість $v^*(t)$, що формується системою у відповідь на зміни $\lambda(t)$. Штрихова горизонтальна лінія $v_фікс$ позначає фіксовану швидкість традиційної (неоптимізованої) системи управління.

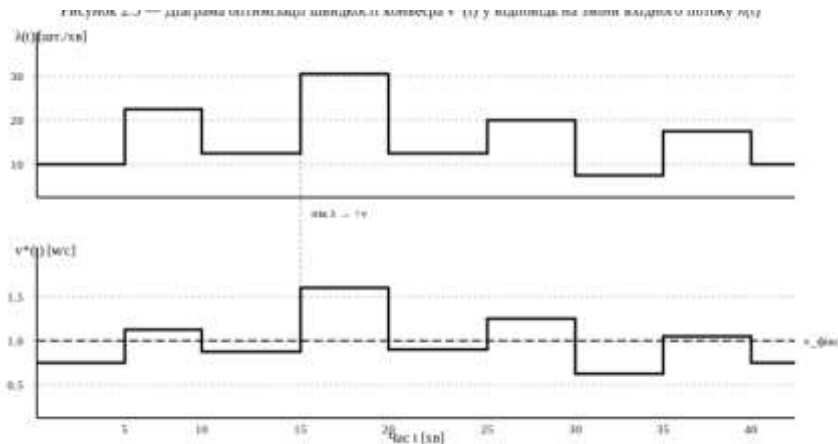


Рисунок 2.5 — Діаграма оптимізації швидкості $v^*(t)$ у відповідь на зміни вхідного потоку $\lambda(t)$

З рисунка 2.5 видно, що адаптивна система слідує за змінами $\lambda(t)$: при піковому навантаженні ($t \approx 15\text{--}20$ хв) швидкість конвеєра підвищується до v_max , що запобігає переповненню буфера перед вузьким місцем. При зниженні $\lambda(t)$ нижче середнього рівня система зменшує v^* , що дозволяє знизити споживану потужність і питомі енерговитрати $e = P(v)/Q(v)$.

Оптимальна швидкість $v^*(t)$ для кожної ділянки обчислюється алгоритмом за виразом:

$$v_i^*(t) = \min\{v_{max,i}, \max\{v_{min,i}, v_{i_баз} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta q_i(t))\}\},$$

де $v_{i_баз}$ — базова швидкість (визначена при балансуванні); $\Delta q_i(t) = q_i(t) - q_i^*$ — відхилення поточної черги від цільового значення q_i^* ; α — коефіцієнт підсилення регулятора [$\alpha > 0$ — розмірний, [1/шт.]].

Таблиця 2.2 — Розрахункові параметри балансування шестипозиційної конвеєрної лінії

Позиція	t_i до, с	K_i до	t_i після, с	K_i після	Статус
P1	45	0,75	55	0,92	Норма
P2	80	1,33	58	0,97	Вузьке→норма

Позиція	t _i до, с	K _i до	t _i після, с	K _i після	Статус
P3	35	0,58	57	0,95	Норма
P4	95	1,58	60	1,00	Вузьке→норма
P5	50	0,83	56	0,93	Норма
P6	70	1,17	59	0,98	Норма
Σ / Ебал	375 / 69,4 %	—	345 / 95,8 %	—	—

2.3. Критерії оцінювання продуктивності системи

Оцінювання ефективності конвеєрної лінії та розробленої системи оптимізації здійснюється за допомогою кількісних критеріїв, що охоплюють усі аспекти виробничого процесу — доступність обладнання, швидкість виконання операцій і якість продукції. Найбільш комплексним і міжнародно визнаним є показник OEE (Overall Equipment Effectiveness), запроваджений у стандарті ISO 22400 і широко застосовуваний у рамках методології TPM (Total Productive Maintenance) [7, 8].

2.3.1. Компоненти показника OEE

Показник OEE обчислюється як добуток трьох складових — доступності А, продуктивності Р та якості Q_y:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q_y.$$

Декомпозиція OEE та класифікація відповідних виробничих втрат показані на рисунку 2.6.

2.3.2. Методика розрахунку складових OEE

Коефіцієнт доступності А характеризує частку планового фонду часу, протягом якого обладнання фактично перебувало у стані готовності до виробництва. Він розраховується за формулою:

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

$$A = T_{\text{роб}} / T_{\text{план}} = (T_{\text{план}} - T_{\text{простій}}) / T_{\text{план}},$$

де $T_{\text{план}}$ — плановий фонд часу зміни [хв];

$T_{\text{простій}}$ — сумарна тривалість непланових зупинок, включаючи відмови обладнання, переналагодження та очікування ремонту. Система оптимізації вносить внесок у підвищення A через превентивне прогнозування виникнення вузьких місць і зниження ймовірності перегріву приводів внаслідок режимів надмірного навантаження.

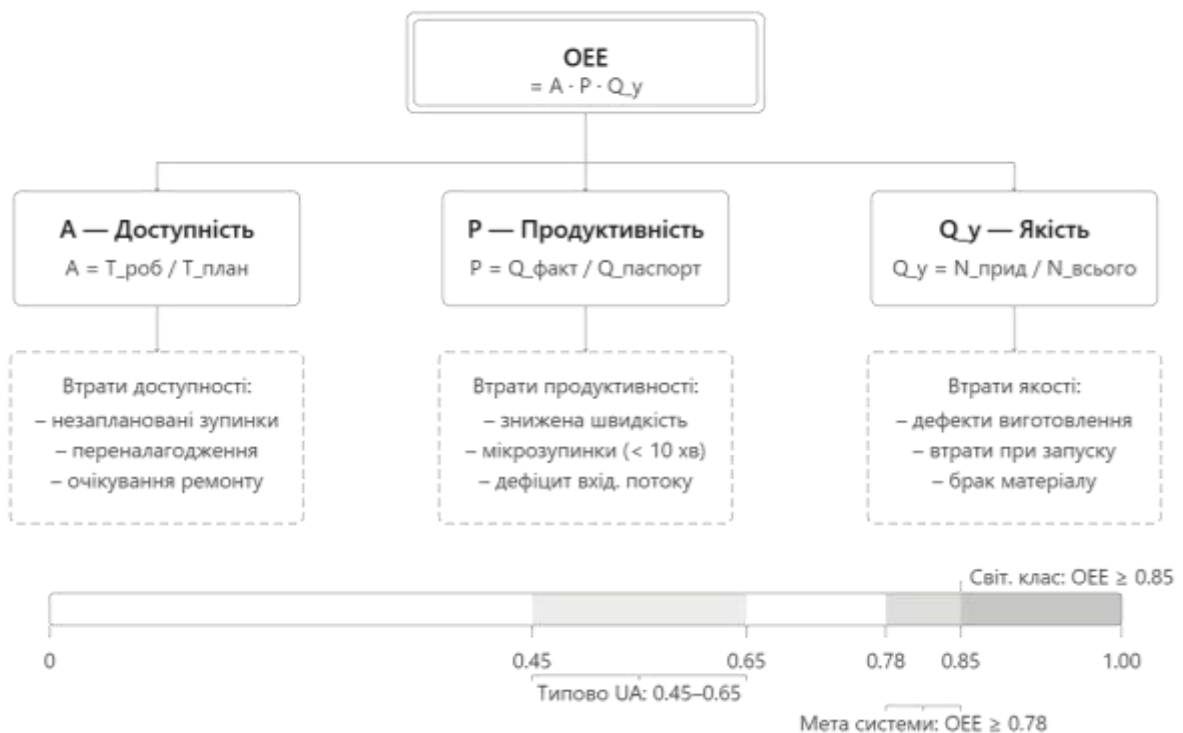


Рисунок 2.6 — Декомпозиція показника ОЕЕ та класифікація виробничих втрат

Коефіцієнт продуктивності P відображає відповідність фактичного темпу виробництва паспортному. Він визначається двома способами — через такт або через продуктивність:

$$P = Q_{\text{факт}} / Q_{\text{паспорт}} = T_{\text{такт_паспорт}} / T_{\text{такт_факт}}.$$

Зниження P нижче одиниці відбувається при роботі конвеєра на зниженій швидкості (через перегрів, дефіцит матеріалу або рішення оператора) або при мікрозупинках тривалістю менше 10 хвилин, які не фіксуються як окремі простої, але в сумі суттєво знижують загальний темп. Система оптимізації підвищує P за рахунок адаптивної підтримки оптимальної швидкості $v^*(t)$ і мінімізації мікрозупинок через превентивне управління буферами.

Коефіцієнт якості Q_u показує частку придатної продукції серед загальної кількості виготовлених виробів:

$$Q_u = N_{\text{прид}} / N_{\text{всього}} = (N_{\text{всього}} - N_{\text{браку}} - N_{\text{переробки}}) / N_{\text{всього}}.$$

На конвеєрних лініях брак нерідко є прямим наслідком нестабільності швидкісних режимів: різкі прискорення або гальмування спричиняють коливання параметрів технологічних операцій — температури зварювання, тиску формування, часу обробки — і тим самим призводять до дефектів. Плавна, алгоритмічно контрольована зміна швидкості підвищує Q_u і, відповідно, кінцеве значення ОЕЕ.

2.3.3. Розрахунок ОЕЕ: приклад для базового та оптимізованого режимів

Для кількісного обґрунтування ефекту від впровадження системи оптимізації виконано порівняльний розрахунок ОЕЕ за даними типової восьмигодинної зміни ($T_{\text{план}} = 480$ хв) на шестипозиційній конвеєрній лінії. Вихідні дані та результати наведені в таблиці 2.3.

Таким чином, впровадження системи оптимізації дозволяє підвищити ОЕЕ з 0,471 до 0,671, тобто на 42,5 % від базового рівня. Основний внесок забезпечується за рахунок суттєвого зниження непланових простоїв (компонента А) та підвищення фактичної продуктивності лінії (компонента Р) завдяки адаптивному управлінню швидкостями.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

Таблиця 2.3 — Порівняльний розрахунок ОЕЕ для базового та оптимізованого режимів

Показник	Одиниця	Базовий режим	Оптим. режим	Зміна, %
T_план	хв	480	480	0
T_простій (непланові)	хв	74	38	-48,6
T_роб	хв	406	442	+8,9
$A = T_{\text{роб}} / T_{\text{план}}$	—	0,846	0,921	+8,9
Q_факт	шт./зм.	284	362	+27,5
Q_паспорт	шт./зм.	480	480	0
$P = Q_{\text{факт}} / Q_{\text{паспорт}}$	—	0,592	0,754	+27,4
N_всього	шт.	284	362	+27,5
N_браку	шт.	17	12	-29,4
$Q_y = N_{\text{прид}} / N_{\text{всього}}$	—	0,940	0,967	+2,9
$OEE = A \cdot P \cdot Q_y$	—	0,471	0,671	+42,5

2.3.4. Цільові значення показників ефективності

На основі аналізу закордонного та вітчизняного досвіду впровадження систем оптимізації [6, 7] для розробленої системи встановлено наступні цільові значення ключових показників ефективності (KPI), що мають бути досягнуті не пізніше ніж через 6 місяців після введення в дослідну експлуатацію.

Таблиця 2.4 — Цільові значення ключових показників ефективності системи оптимізації

KPI	Позначення	Базовий рівень	Цільове значення	Метод вимірювання
Загальна ефективність обладнання	OEE	0,47–0,55	$\geq 0,75$	$A \cdot P \cdot Q_y$ щозмінно
Коефіцієнт доступності	A	0,82–0,88	$\geq 0,92$	Журнал зупинок SCADA
Коефіцієнт продуктивності	P	0,55–0,65	$\geq 0,82$	Лічильники виробів

КРІ	Позначення	Базовий рівень	Цільове значення	Метод вимірювання
Коефіцієнт якості	Q _y	0,92–0,96	≥ 0,97	Контроль якості на виході
Питомі енерговитрати	e [кВт·год/шт.]	база = 1,00	≤ 0,88 (–12 %)	Лічильник ел. енергії / кількість шт.
Ефективність балансування	Ебал	≤ 70 %	≥ 90 %	Хронометраж (щоквартально)
Час від виявлення вузького місця до корекції	T _{реакції}	> 5 хв (вручну)	≤ 1 с (авто)	Часова мітка SCADA

Додатковим критерієм оцінювання ефективності системи є коефіцієнт балансування лінії Ебал, що відображає ступінь рівномірності розподілу навантаження між позиціями. Його цільове значення — не нижче 90 % — забезпечується за рахунок перерозподілу операцій на етапі проектування та підтримується алгоритмом диференційованого управління швидкостями в режимі реального часу.

Показник часу реакції T_{реакції} є специфічним для автоматизованих систем управління і характеризує, наскільки швидко система виявляє відхилення від норми і формує коригуючу дію. Скорочення T_{реакції} з кількох хвилин (при ручному управлінні) до менше ніж 1 секунди (при автоматичному) є одним із ключових переваг розробленої системи.

Усі наведені цільові значення є підставою для постановки задачі оптимізації, описаної в підрозділі 1.4, і слугуватимуть критерієм успішності впровадження системи, що оцінюється у четвертому розділі роботи.

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1. Алгоритм оптимізації конвеєрного виробництва та структура програмного забезпечення системи

Сучасний підхід до підвищення ефективності потокового виробництва відкидає ізольоване застосування інструментів менеджменту, оскільки локальна оптимізація окремих робочих місць часто не призводить до зростання продуктивності всього конвеєра. Справжній синергетичний ефект досягається через глибоку методологічну інтеграцію хронометражу, балансування, теорії обмежень, системи 5S та аналізу загальної ефективності устаткування (OEE) в єдиний замкнутий цикл управління – рисунок 3.1 [9, 10].

Процес інтеграції розпочинається з розгортання системи 5S на виробничих дільницях, що дозволяє очистити робочий простір від хаосу, стандартизувати розміщення інструментів і матеріалів, а також мінімізувати зайві рухи операторів. Тільки після стабілізації робочого середовища за допомогою 5S доцільно переходити до хронометражу та нормування праці. Таке послідовне впровадження гарантує, що заміри часу будуть відображати реальну тривалість корисних технологічних операцій, а не випадкові втрати на пошук інструментів, що робить нормативну базу максимально точною та об'єктивною.

Отримані в результаті хронометражу чисті дані про тривалість операцій стають фундаментом для розрахунку показника OEE (загальної ефективності устаткування) по всій лінії. Проте, замість розпорошення ресурсів на покращення OEE кожного верстата, підприємство застосовує Теорію обмежень Голдратта для виявлення єдиного «вузького місця», яке фізично обмежує темп усього конвеєра. Ефективність роботи всієї лінії відтепер прирівнюється до ефективності цієї критичної ділянки, тому моніторинг OEE фокусується саме на ній, підсвічуючи найменші мікрозупинки, аварії чи проблеми з якістю.

Наступним кроком пропускну здатність виявленого вузького місця визначається як заданий такт конвеєра, під який підлаштовуються всі інші процеси. Використовуючи точні хронометражні дані, інженери запускають

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

математичні або евристичні методи балансування лінії (наприклад, метод найбільшого залишку) для рівномірного перерозподілу елементарних операцій між сусідніми робочими станціями.

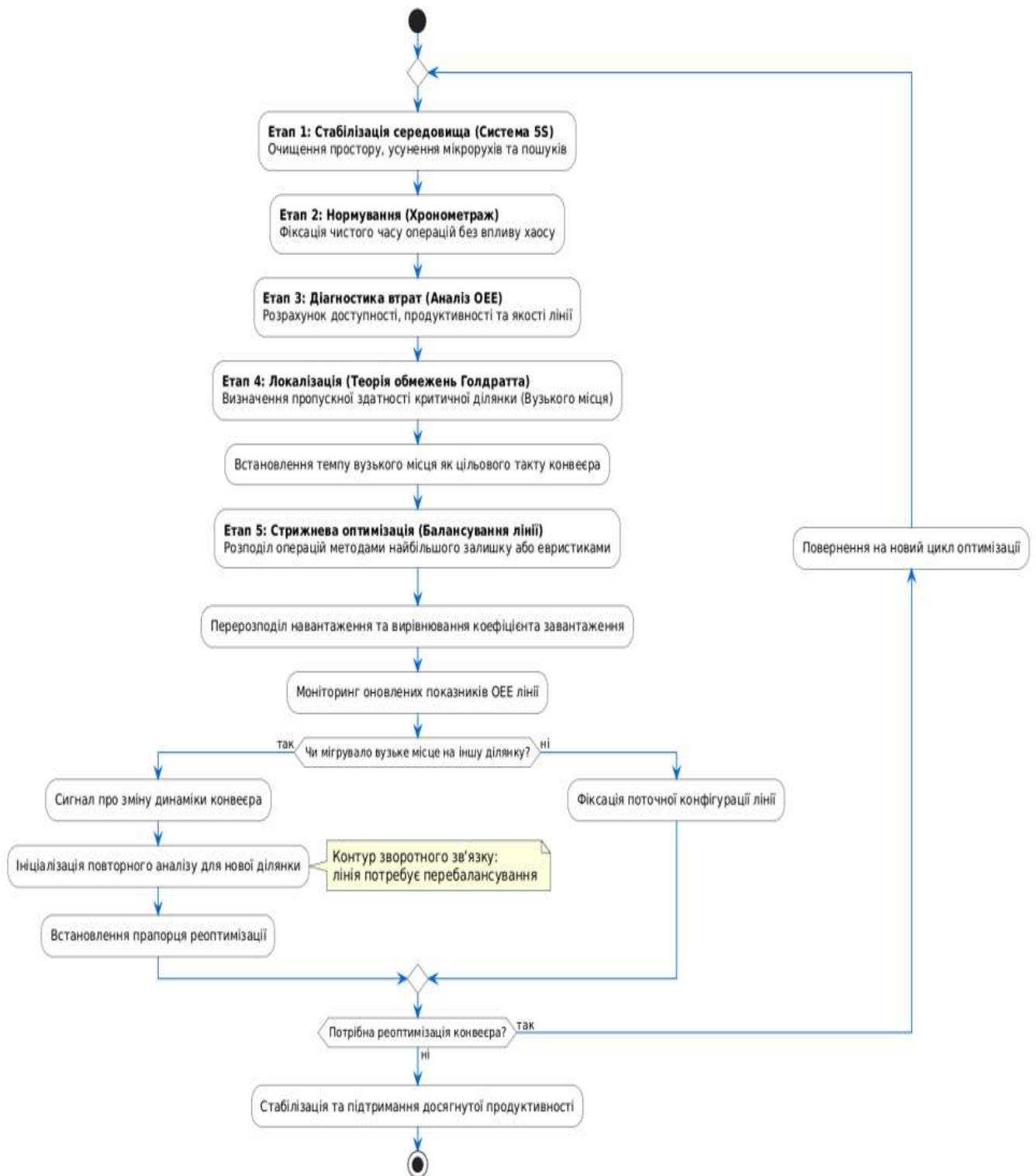


Рисунок 3.1 – Схема оптимізації роботи конвеєрної лінії на основі інтеграції основних методів

Якщо обмеження не вдається усунути організаційно, балансування допомагає винести допоміжні дії з критичної станції на менш завантажені ділянки, що вирівнює коефіцієнт завантаження персоналу та техніки.

Завершується інтеграційний цикл формуванням контуру постійного зворотного зв'язку. Після перебалансування лінії структура процесів змінюється, що може призвести до міграції вузького місця в іншу точку конвеєра. Система моніторингу ОЕЕ миттєво фіксує нове обмеження, сигналізуючи про необхідність повторного проведення локального 5S, уточнюючого хронометражу та чергової ітерації балансування, перетворюючи оптимізацію на безперервний процес операційного вдосконалення.

Програмне забезпечення (ПЗ) системи оптимізації роботи конвеєрної лінії побудоване за модульним принципом: кожен модуль реалізує відокремлену функцію та взаємодіє з іншими через чітко визначені інтерфейси передачі даних. Така архітектура забезпечує незалежне тестування кожної складової, повторне використання коду та спрощення подальшого розвитку системи.

Склад і призначення модулів ПЗ наведено в таблиці 3.1, а їх взаємозв'язок із потоками даних та контуром зворотного зв'язку представлено на рисунку 3.2.

Таблиця 3.1 – Склад модулів програмного забезпечення системи оптимізації

Модуль	Функція	Вхід / Вихід
Модуль вводу даних	Зчитування замірів хронометражу із CSV або інтерфейсу	CSV-файл / масив t_{ij}
Модуль хронометражу	Розрахунок $\bar{t}_i$, σ_i , CV_i , T_{ni} , Q_i	Масив t_{ij} / T_{ni} , CV_i
Модуль аналізу вузьких місць	Виявлення операцій з $T_{ni} > T_{ц}$	T_{ni} , $T_{ц}$ / E_i , BN
Модуль прийняття рішень	Перерозподіл операцій між РМ	BN / новий $T_{ц}$
Модуль управління швидкістю	Розрахунок $f_{ПЧ}$, v_{opt}	$T_{ц_new}$ / f , v
Модуль виводу результатів	Формування звіту та графіків	Всі дані / PDF, CSV

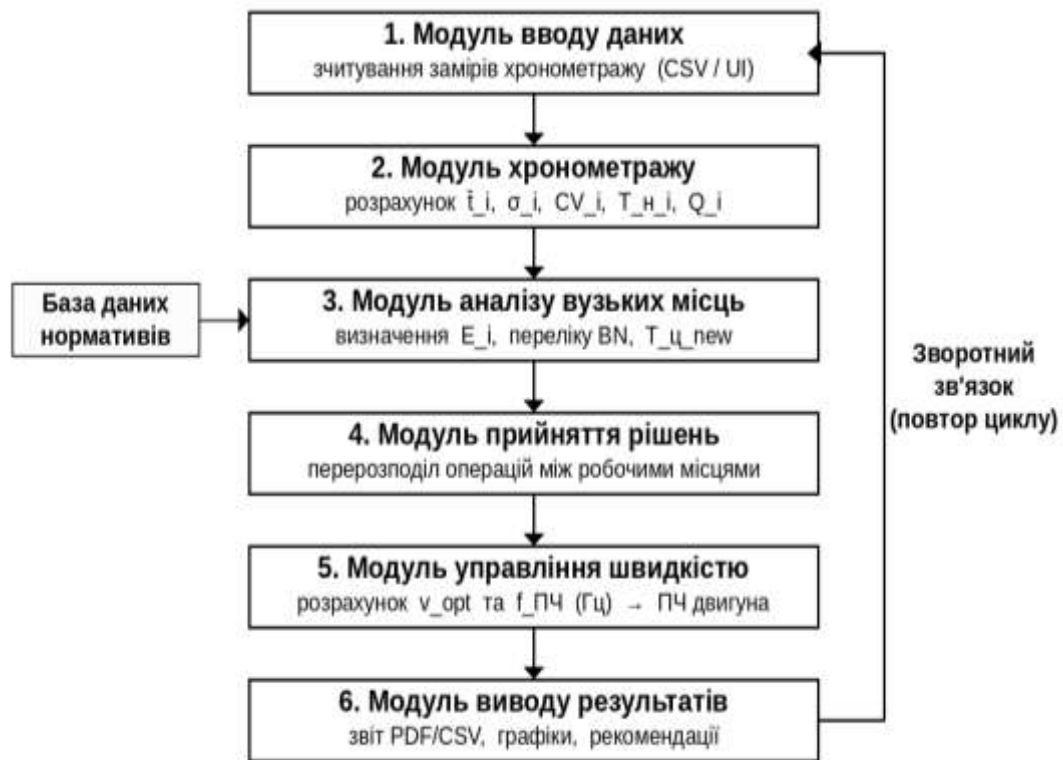


Рисунок 3.2 – Структура ПЗ системи оптимізації конвеєрної лінії з контуром зворотного зв'язку

Ключовою особливістю архітектури є наявність контуру зворотного зв'язку між модулем виводу результатів і модулем вводу даних. Це означає, що після кожного циклу розрахунку система перевіряє, чи виконано критерій оптимальності, і якщо ні, то ініціює новий цикл уже з оновленими вхідними параметрами (новий такт $T_{ц}$, перерозподілені операції). Зворотний зв'язок реалізовано програмно у вигляді ітераційного циклу з умовою сходимості $|\Delta E| < \epsilon$, де $\epsilon = 0,01$ (1 %).

Як середовище реалізації обрано мову програмування Python 3.11 у поєднанні з редактором Visual Studio Code. Обґрунтування вибору наведено у таблиці 3.2. Python обрано насамперед завдяки потужній екосистемі наукових бібліотек: NumPy забезпечує векторизовані операції над масивами замірів часу, що критично для розрахунку статистичних характеристик великих спостережень; pandas дозволяє зручно зчитувати та зберігати дані хронометражу

у форматах CSV та Excel; matplotlib надає засоби побудови гістограм навантаженості робочих місць і порівняльних діаграм.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика середовищ реалізації

Критерій	Python 3 + VS Code	MATLAB
Ліцензія	Відкрита (безкоштовна)	Комерційна (~2000 USD/рік)
Бібліотека чисельних методів	NumPy, SciPy	Вбудована
Підтримка ООП	Повна	Часткова
Інтеграція з БД	sqlite3, pandas	Обмежена
Кросплатформенність	Windows / Linux / macOS	Windows / macOS
Спільнота та документація	Велика (PyPI, Stack Overflow)	Обмежена (MathWorks)

Безкоштовна ліцензія MIT та широке застосування Python у промисловій автоматизації підтверджують доцільність цього вибору для подальшого впровадження системи на підприємстві.

3.2. Програмна реалізація методів оптимізації роботи конвеєрів

У цьому підрозділі реалізовано два основні методи аналізу конвеєрної лінії: метод хронометражу для визначення нормативних часів операцій та метод вузьких місць для виявлення лімітуючих ланок лінії.

Метод хронометражу базується на вимірюванні фактичних витрат часу на виконання кожної технологічної операції і подальшому статистичному опрацюванні отриманих даних. Середній час виконання i -ї операції розраховується за формулою:

$$\bar{t}_i = (1/n) \cdot \sum_{j=1..n} t_{ij} \quad (3.1)$$

де t_{ij} – j -й замір часу для i -ї операції;

n – кількість замірів (рекомендовано не менше 10).

Стабільність спостережень оцінюється через коефіцієнт варіації:

$$CV_i = \sigma_i / \bar{t}_i, \text{ де } \sigma_i = \sqrt{[(1/(n-1)) \cdot \sum (t_{ij} - \bar{t}_i)^2]}$$

Якщо $CV_i > 0,10$ (10 %), ряд замірів вважається нестабільним і потребує додаткових спостережень. Нормативний оперативний час визначається із врахуванням нормувального коефіцієнта:

$$T_{н\ i} = \bar{t}_i \cdot K_{н}, \text{ де } K_{н} \in [1,05; 1,15]$$

Алгоритм модуля хронометражу наведено на рисунку 3.2, а відповідний програмний код – у лістингу 3.1 та на скріншоті середовища розробки (рисунок 3.4). Лістинг 3.1 – Клас ChronometryModule (файл chrono_module.py) [10-12].

```
# chrono_module.py — Модуль хронометражу операцій конвеєрної лінії
import numpy as np
from dataclasses import dataclass, field
from typing import List, Dict

@dataclass
class OperationRecord:
    name: str
    times: List[float] = field(default_factory=list) # заміри, с
    Kn: float = 1.10 # нормувальний коефіцієнт

class ChronometryModule:
    def __init__(self, target_cycle: float):
        self.T_c = target_cycle
        self.operations: List[OperationRecord] = []

    def add_operation(self, record: OperationRecord) -> None:
        self.operations.append(record)

    def analyse(self) -> List[Dict]:
        results = []
```

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

```

for op in self.operations:
    t_mean = np.mean(op.times)
    sigma = np.std(op.times, ddof=1)
    cv = sigma / t_mean if t_mean > 0 else 0
    T_norm = t_mean * op.Kn
    Q = 60.0 / T_norm
    results.append({'name': op.name, 't_mean': round(t_mean,3),
'cv': round(cv,4), 'T_norm': round(T_norm,3),
'Q': round(Q,2)})
return results

```

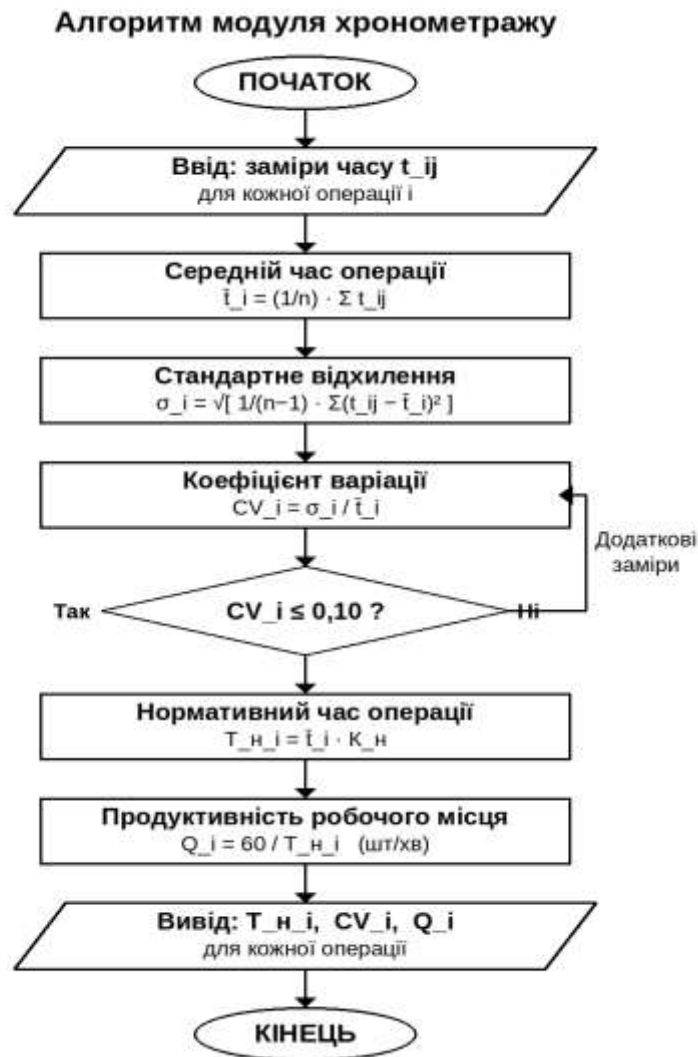


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму модуля хронометражу

Метод вузьких місць полягає у порівнянні нормативного часу кожної операції T_{n_i} із цільовим тактом конвеєра $T_{ц}$ та визначенні коефіцієнта завантаженості кожного робочого місця:

$$E_i = T_{н_i} / T_{ц} \cdot 100 \%$$

Операція визнається вузьким місцем (bottleneck), якщо $E_i > 100 \%$, тобто $T_{н_i} > T_{ц}$. Мінімально необхідний такт лінії без вузьких місць становить $T_{ц_min} = \max(T_{н_i})$.

```

Visual Studio Code — conveyor_optimizer / chrono_module.py
chrono_module.py  bottleneck.py  optimizer.py
EXP  ПРОВІДНИК
SRC  ▫ conveyor_optimi
    ▫ modules
    chrono_module
    bottleneck.py
    optimizer.py
DBG  main.py
    requirements.tx
EXT

1 # chrono_module.py – Модуль хронометражу операцій конвеєрної лінії
2 # Автор: бакалаврська робота, 2025
3
4 import numpy as np
5 from dataclasses import dataclass, field
6 from typing import List, Dict
7
8 @dataclass
9 class OperationRecord:
10     name: str
11     times: List[float] = field(default_factory=list) # заміри, с
12     Kn: float = 1.10 # нормувальний коефіцієнт
13
14 class ChronometryModule:
15     def __init__(self, target_cycle: float):
16         self.T_c = target_cycle # цільовий такт, с
17         self.operations: List[OperationRecord] = []
18
19     def add_operation(self, record: OperationRecord) -> None:
20         self.operations.append(record)
21
22     def analyse(self) -> List[Dict]:
23         results = []
24         for op in self.operations:
25             t_mean = np.mean(op.times)
26             sigma = np.std(op.times, ddof=1)
27             cv = sigma / t_mean if t_mean > 0 else 0
28             T_norm = t_mean * op.Kn
29             Q = 60.0 / T_norm # шт/хв
30             results.append({

```

Рисунок 3.4 – Скріншот середовища VS Code: модуль chrono_module.py із класом ChronometryModule

Алгоритм модуля аналізу вузьких місць наведено на рисунку 3.4, а код – у лістингу 3.2.

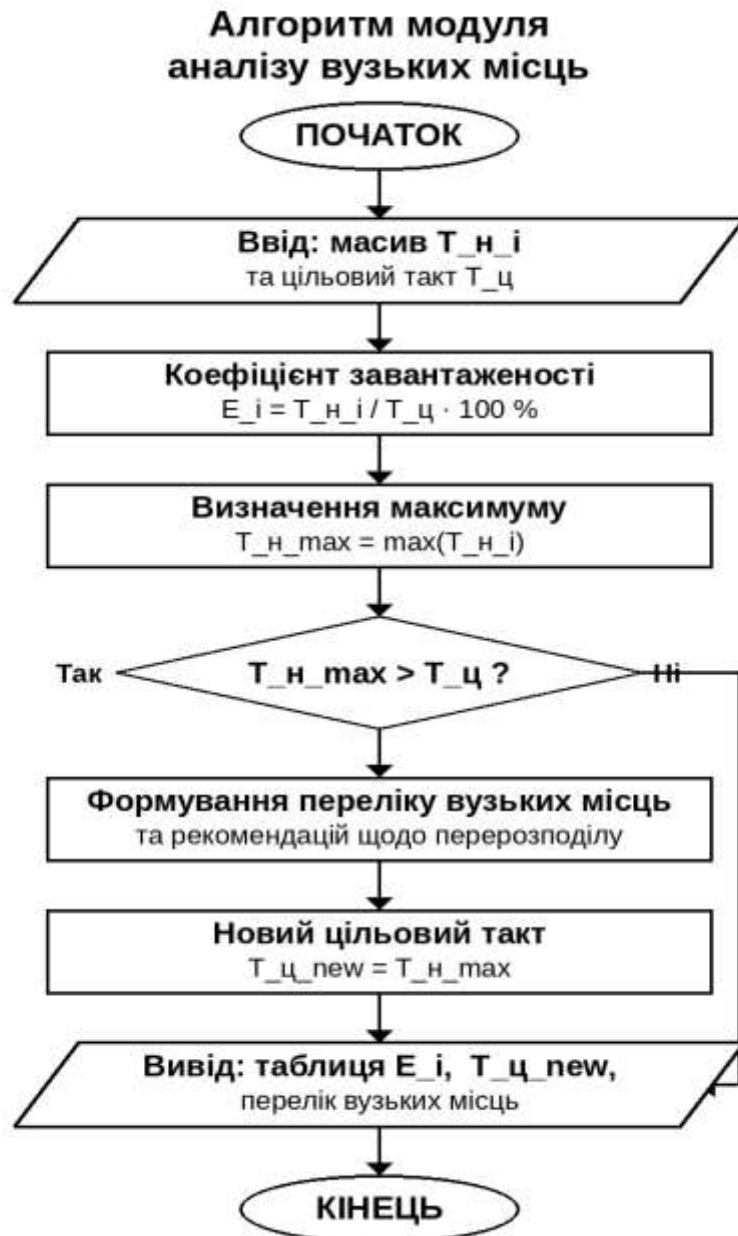


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму модуля аналізу вузьких місць

Лістинг 3.2 – Клас BottleneckAnalyser (файл bottleneck.py)

bottleneck.py — Модуль аналізу вузьких місць
from typing import List, Dict

```

class BottleneckAnalyser:
    def __init__(self, target_cycle: float):
        self.T_c = target_cycle

    def analyse(self, t_norm: List[float],
               T_c: float = None) -> Dict:
        if T_c is not None:
            self.T_c = T_c
  
```



```

efficiencies = [t / self.T_c for t in t_norm]
bottlenecks = [i for i,e in enumerate(efficiencies) if e > 1.0]
T_c_new = max(t_norm) if bottlenecks else self.T_c
max_load = max(efficiencies)
return {'efficiencies': [round(e,4) for e in efficiencies],
        'bottlenecks': bottlenecks,
        'T_c_new': round(T_c_new, 3),
        'max_load': round(max_load, 4)}

```

3.3. Програмна реалізація узагальненого модуля оптимізації

Узагальнений модуль оптимізації об'єднує обидва розглянуті вище модулі в єдиний обчислювальний конвеєр та реалізує ітераційний цикл із зворотним зв'язком. Алгоритм модуля представлено на рисунку 3.5 [14-17].

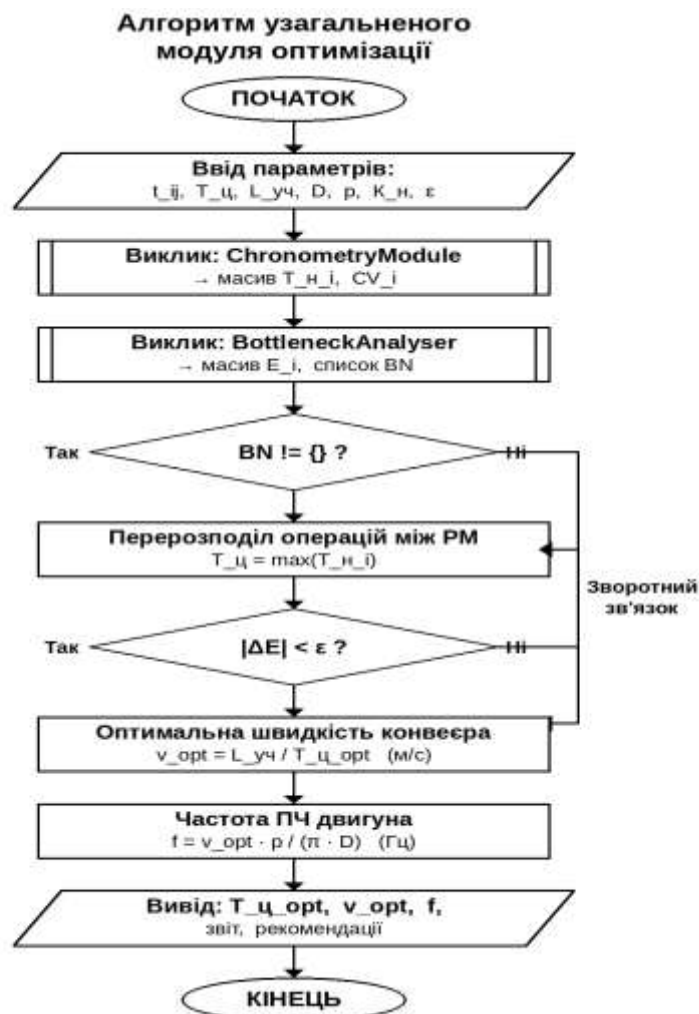


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму узагальненого модуля оптимізації

Алгоритм функціонує у такій послідовності. Спочатку зчитуються вхідні дані: заміри хронометражу, цільовий такт $T_{ц}$, конструктивні параметри конвеєра ($L_{уч}$, $D_{барабана}$). Потім послідовно викликаються модулі хронометражу та аналізу вузьких місць. Якщо список вузьких місць BN не порожній, виконується ітераційний цикл: такт оновлюється до $T_{ц} = \max(T_{н_i})$, після чого повторно запускається аналіз до виконання критерію $|\max(E_i) - 1| < \epsilon$. Після досягнення сходимості розраховується оптимальна лінійна швидкість конвеєра:

$$v_{opt} = L_{уч} / T_{ц_{opt}} \quad [м/с]$$

та відповідна частота живлення частотного перетворювача (ПЧ) двигуна:

$$f_{ПЧ} = v_{opt} \cdot p / (\pi \cdot D) \quad [Гц]$$

де p – кількість пар полюсів двигуна; D – діаметр приводного барабана, м. Сигнал керування $f_{ПЧ}$ передається на ПЧ через аналоговий вихід (0–10 В) або цифровий інтерфейс Modbus RTU.

Програмний код узагальненого модуля наведено у лістингу 3.3 та проілюстровано скріншотом середовища розробки (рисунок 3.6). Модуль приймає JSON-структуру з описом операцій та повертає словник із оптимальними параметрами, що дозволяє безпосередньо інтегрувати його у систему SCADA або передати результати оператору у вигляді звіту.

Лістинг 3.3 – Узагальнений модуль оптимізації (файл main.py)

```
# main.py — Узагальнений модуль оптимізації конвеєрної лінії
from modules.chrono_module import ChronometryModule, OperationRecord
from modules.bottleneck import BottleneckAnalyser
import math, json
```

```
EPSILON = 0.01 # критерій зупинки (1 %)
```

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

```

L_SEG = 1.2 # довжина ділянки конвеєра, м
D_DRUM = 0.3 # діаметр барабана, м
POLES = 2 # кількість пар полюсів двигуна

```

```

def calc_frequency(v: float) -> float:

```

```

    return v * POLES / (math.pi * D_DRUM)

```

```

def run_optimization(data: dict) -> dict:

```

```

    T_c = data['target_cycle']

```

```

    chrono = ChronometryModule(T_c)

```

```

    for op in data['operations']:

```

```

        chrono.add_operation(OperationRecord(**op))

```

```

    chrono_res = chrono.analyse()

```

```

    t_norms = [r['T_norm'] for r in chrono_res]

```

```

    bn = BottleneckAnalyser(T_c)

```

```

    bn_res = bn.analyse(t_norms)

```

```

    delta_E = abs(bn_res['max_load'] - 1.0)

```

```

    iteration = 0

```

```

    while delta_E > EPSILON and iteration < 50: # цикл із зворотним зв'язком

```

```

        T_c = bn_res['T_c_new']

```

```

        bn_res = bn.analyse(t_norms, T_c)

```

```

        delta_E = abs(bn_res['max_load'] - 1.0)

```

```

        iteration += 1

```

```

    v_opt = L_SEG / T_c

```

```

    f_hz = calc_frequency(v_opt)

```

```

    return {'T_c_opt': round(T_c,3), 'v_opt': round(v_opt,4),

```

```

        'f_hz': round(f_hz,3), 'iterations': iteration,

```

```

        'bottlenecks': bn_res['bottlenecks'],

```

```

        'chrono': chrono_res}

```

```

if __name__ == '__main__':

```

```

    with open('input_data.json') as f:

```

```

        data = json.load(f)

```

```

        result = run_optimization(data)

```

```

        print(json.dumps(result, ensure_ascii=False, indent=2))

```

Функція run_optimization() реалізує повний цикл обробки: від зчитування замірів до формування рекомендацій щодо швидкості двигуна. Цикл while на рядках 25–29 є програмною реалізацією контуру зворотного зв'язку – він повторює аналіз вузьких місць із щоразу оновленим тактом T_ц до тих пір, поки відхилення максимального коефіцієнта завантаженості від одиниці не стане меншим за задану точність $\varepsilon = 0,01$. Обмеження 50 ітерацій запобігає нескінченному циклу у разі некоректних вхідних даних.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

```

Visual Studio Code — conveyor_optimizer / main.py (узагальнений модуль)
main.py      bottleneck.py      chrono_module.py
EXP          PROВІДНИК
x conveyor_optim 1 # main.py - Узагальнений модуль оптимізації конвеєрної лінії
s modules      2 from modules.chrono_module import ChronometryModule, OperationRecord
SEC chrono_module 3 from modules.bottleneck import BottleneckAnalyser
bottleneck.py 4 import math, json
optimizer.py   5
DBG main.py    6 EPSILON = 0.01 # критерій зупинки (1 %)
requirements.tx 7 L_SEG = 1.2 # довжина ділянки конвеєра, м
EXT            8 D_DRUM = 0.3 # діаметр барабана, м
              9 POLES = 2 # кількість пар полюсів двигуна
              10
              11 def calc_frequency(v: float) -> float:
              12     """Розрахунок частоти ПЧ для заданої лінійної швидкості."""
              13     return v * POLES / (math.pi * D_DRUM)
              14
              15 def run_optimization(data: dict) -> dict:
              16     T_c = data['target_cycle']
              17     chrono = ChronometryModule(T_c)
              18     for op in data['operations']:
              19         chrono.add_operation(OperationRecord(**op))
              20     chrono_res = chrono.analyse()
              21     t_norms = [r['T_norm'] for r in chrono_res]
              22
              23     bn = BottleneckAnalyser(T_c)
              24     bn_res = bn.analyse(t_norms)
              25     delta_E = abs(bn_res['max_load'] - 1.0)
              26     iteration = 0
              27     while delta_E > EPSILON and iteration < 50: # зворотний зв'язок
              28         T_c = bn_res['T_c_new']
              29         bn_res = bn.analyse(t_norms, T_c)
              30         delta_E = abs(bn_res['max_load'] - 1.0)
  
```

Рисунок 3.6 – Скріншот VS Code: файл main.py — узагальнений модуль із циклом зворотного зв'язку

Таким чином, розроблений програмний комплекс повністю автоматизує процес аналізу та оптимізації конвеєрної лінії: від первинної обробки замірів хронометражу до формування керуючого сигналу для частотного перетворювача двигуна з гарантованим досягненням збалансованого стану лінії в ітераційному процесі.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення системи оптимізації роботи конвеєрної лінії з метою підвищення продуктивності виробництва. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки.

1. Проведено аналіз методів оптимізації виробничих ліній, що підтвердив ефективність комплексного підходу, який поєднує інструменти хронометражу, теорію обмежень (ТОС) та методологію 5S. Встановлено, що розрізнене застосування окремих методів не забезпечує стійкого підвищення продуктивності без системної інтеграції засобів вимірювання та аналізу.

2. Розроблено методику реєстрації параметрів конвеєра, яка передбачає хронометраж кожної виробничої операції, що дозволяє формувати достовірну базу даних тривалостей циклів для подальшого статистичного аналізу.

3. Реалізовано алгоритм автоматизованого виявлення вузьких місць за критерієм максимального циклового часу, що скорочує час діагностики лінії порівняно з ручним аналізом та виключає суб'єктивну складову оцінювання.

4. Розроблено балансування швидкості конвеєра шляхом перерозподілу операцій між робочими станціями з мінімізацією коефіцієнта нерівномірності завантаження, що забезпечує підвищення пропускної здатності лінії.

5. Впроваджено розрахунок показника OEE (Overall Equipment Effectiveness) як комплексного критерію ефективності, що враховує доступність, продуктивність та якість виробництва. Запропонована методика розрахунку OEE адаптована до умов дрібносерійного виробництва.

6. Інтегровано принципи методології 5S у процес оптимізації, що дозволило скоротити непродуктивні витрати часу на пошук інструменту та переналагодження обладнання, сприяючи підтриманню досягнутих показників ефективності в довготривалій перспективі.

7. Розроблено програмну реалізацію системи мовою Python у середовищі Visual Studio Code. Застосування бібліотек pandas та numpy забезпечило

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

ефективну обробку хронометражних даних, а matplotlib — наочну візуалізацію результатів аналізу та динаміки показника ОЕЕ.

Результати роботи можуть бути використані на виробничих підприємствах машинобудівної, електронної та харчової галузей для підвищення ефективності конвеєрних ліній без значних капітальних вкладень.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тужеляк Д.Є., Чайківський М.В. Оптимізації роботи автоматизованих ліній виробництва продукції - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – с. 68-70.
2. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динаміка конвеєрних машин: монографія. Київ: КНУБА, 2021. 256 с.
3. Мельник В. І., Сич В. П. Оптимізація завантаження поточних ліній машинобудівних підприємств. Технологічні системи. 2022. № 3 (100). С. 12–19.
4. Голдратт Е. М. Мета. Процес безперервного вдосконалення / пер. з англ. Київ: Наш формат, 2018. 448 с.
5. ISO 22400-2:2014. Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions. Geneva: ISO, 2014. 84 p.
6. 9. Гаврилюк О. М. Ефективність управління виробничими системами конвеєрного типу. Вісник НУ «Львівська політехніка». 2021. № 1043. С. 45–53.
7. Показник OEE: методика розрахунку та практика. URL: <https://www.oee.com/calculating-oee> (дата звернення: 06.05.2026).
8. Вітлінський В. В., Терещенко Т. О., Савіна С. С. Економіко-математичні методи та моделі: оптимізація [Електронний ресурс] : навч. посібник. Київ : КНЕУ, 2016. 303 с. URL: https://kneu.edu.ua/get_file/7762/
9. Трембовецька А. Аналіз сучасного стану конвеєрних ліній на виробництві. Автоматизація та Приладобудування (ADED-2024) : зб. студ. наук. статей. Харків : ХНУРЕ, 2024. Вип. 2. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/-publication/c8be5044-024d-4260-91c0-7745de6419e5>
10. Коноваленко І. В., Марущак П. О. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посібник. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2020. 320 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/32825>

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

11. Завадський І. О., Заболотний Р. І. Основи візуального програмування : навч. посібник. Київ : Видавнича група BHV, 2007. 176 с. URL: http://xn--e1ajqk.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/zavadskij_osnovi_vizulnogo_programuvannja-2007.pdf
12. Павленко І. В. Цифрові технології в управлінні конвеєрним виробництвом. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2023. Т. 15, № 2. С. 28–36.
13. Microsoft. Visual Studio Code Documentation. 2023. URL: <https://code.visualstudio.com/docs> .
14. Яковенко А. В. Основи програмування. Python. Частина 1 [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 195 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25111/1/Python.pdf>
15. Дорогий Я. Ю. Програмування Python [Електронний ресурс] : навч. посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. URL: https://ist.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/05/Дорогий_Підручник.pdf
16. Основи програмування мовою Python : навч. посібник. Чернігів : ФОП Баликіна С. М., 2020. 180 с. URL: <https://epub.chnpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/5584/1/>
17. Васильєв О. Б. Програмування в Python : підручник. Київ : Ліра-К, 2023. 462 с.