МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації сортувальної машини поштової служби. Система автоматичного регулювання потоку сортування відправлень

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1512-з
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Горіянов А.Г.

Керівник професор, доктор т. н. Пазюк М.Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Горіянов Андрій Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації сортувальної машини поштової служби. Система автоматичного регулювання потоку сортування відправлень
керівник роботи Пазюк М.Ю, професор, доктор т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 25 травня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання потоку сортування відправлень; розробка технічної документації; техніко-економічних показників; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	професор, Пазюк М.Ю.		
2	професор, Пазюк М.Ю.		
3	професор, Пазюк М.Ю.		
4	професор, Пазюк М.Ю.		
5	професор, Пазюк М.Ю.		
6	професор, Пазюк М.Ю.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	14.04-20.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	21.04-27.04.26	
3	Розробка технічного завдання	28.04-04.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	05.05-07.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури	08.05-10.05.26	
6	Розробка технічної документації	08.05-14.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	15.05-18.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	19.05-21.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	22.05-23.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	24.05-25.05.26	

Студент _____ Андрій ГОРІЯНОВ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Михайло ПАЗЮК
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Віктор КОВАЛЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Горіянов А.Г. Проект автоматизації сортувальної машини поштової служби. Система автоматичного регулювання потоку сортування відправлень.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», науковий керівник М. Ю. Пазюк, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю. М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є розробка системи автоматичного регулювання потоку сортування поштових відправлень.

У кваліфікаційній роботі проведено комплексний аналіз сучасних технологій автоматизації поштових відділень та обґрунтовано структуру трирівневої ієрархічної системи керування сортувальним комплексом. Розроблено математичну модель частотно-регульованого асинхронного приводу конвеєра-дозатора та впроваджено двоконтурний алгоритм керування на базі лінійного фільтра Калмана і дискретного ПІД-регулятора для компенсації завад датчиків та просковзування масивних вантажів. Здійснено інженерний підбір сучасного комплексу засобів автоматизації Оформлено повний комплект графічних матеріалів, включаючи функціональні та принципові схеми, а також обґрунтовано заходи з промислової безпеки й пожежної профілактики лінії. Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив високу ефективність модернізації.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел посилання з 40 найменувань, викладена на 77 сторінках машинописного тексту, включаючи 18 рисунків, 4 таблиць та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: автоматизація, установка сортування важкої пошти, , фільтр Калмана, ПІД-регулятор, мікроконтролер, регулювання.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 9
1.1 Аналіз систем автоматизації в галузі 9
1.2 Аналіз систем автоматизації сортування поштових відправлень 18
2. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 29
2.1 Вимоги до структури та функціонування системи 29
2.2 Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу 30
2.4 Вимоги до функцій, які виконуються системою 32
2.5 Вимоги до видів забезпечення 33
2.6 Вимоги до інформаційного забезпечення 34
3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ 36
3.1 Ідентифікація об'єкта керування 36
3.2 Математична модель ПІД-регулятора 38
3.3 Моделювання системи регулювання потоку сортування відправлень 39
4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТОКУ СОРТУВАННЯ 44
4.1 Схема матеріальних і інформаційних потоків 44
4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ 46
4.3 Функціональна схема автоматизації управління 52
4.4 Принципова схема з'єднання між собою технічних засобів автоматизації 53
4.5 Принципова електрична схема управління конвеєра 54
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 56
5.1 Охорона праці 56
5.2 Вимоги до обладнання 61
5.3 Заходи з електробезпеки 63
5.4 Пожежна безпека 64
6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 67
6.1 Вхідні дані і методологія розрахунку 67

6.2 Розрахунок капітальних витрат 67
6.3 Розрахунок експлуатаційних витрат 68
6.4 Оцінка економічної ефективності та окупності 70
ВИСНОВКИ 72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 74

ВСТУП

Розвиток глобальної електронної комерції, середньорічні темпи зростання якої досягли 15%, докорінно змінив підходи до організації складського зберігання та логістики. Раніше складські комплекси вважалися суто допоміжними ланками, а сьогодні вони перетворилися на інноваційні центри та ключові фактори ринкової конкурентосправності. Це зумовлено прямим впливом логістичних процесів на оптимізацію операційних витрат та якість клієнтського сервісу.

Наприклад, в 2025 році «Укрпошта» повністю завершила автоматизацію сортування посилок, а фінальним етапом трансформації стало впровадження автоматизованих рішень для письмової кореспонденції та друкованих медіа. Відтепер Укрпошта автоматично обробляє посилки по Україні та за кордон, листи, газети та журнали, а також замовлення ліків у межах проєкту «Укрпошта. Аптека». Завдяки модернізації також понад 90% міжнародних відправлень залишають Україну або стають доступними для отримання вже протягом 24 годин. У квітні 97,9% усіх відправлень були доставлені вчасно. Важливо, що все сортувальне обладнання для Укрпошти було розроблене та вироблене українською компанією «Українські Інтелектуальні Системи», а 98% комплектуючих також мають українське походження. Це не лише модернізація національного поштового оператора, а й підтримка українського виробництва та технологічного розвитку країни.

Перехід до моделі прямих продажів кінцевому споживачу поставив перед логістичними операторами три критичні виклики:

- висока варіативність номенклатури товарів;
- максимальне прискорення циклів обробки замовлень;
- складні комбінації дрібноштучних відправлень (посилок та пакунків).

Зазначені тенденції роблять повну або часткову автоматизацію процесів безальтернативним інструментом для забезпечення ефективного руху

матеріальних потоків. Якщо у 2016 році лише 10% складів у США використовували елементи автоматизації, а парк промислових багатоосьових роботів налічував близько 40000 одиниць, то за прогнозами аналітиків, до 2027 року цей показник масштабується до 620000 роботизованих систем лише в сегменті складської логістики.

У загальну концепцію модернізації сучасних логістичних вузлів органічно вписується автоматизація поштових та кур'єрських служб, які приймають на себе основне навантаження з розподілу стрімко зростаючого обсягу дрібноштучних вантажів. Особливий акцент у дослідженні зроблено на створенні Системи автоматичного регулювання потоку сортування відправлень. Впровадження цієї системи дозволяє вирішити низку критичних завдань автоматизованого комплексу:

– стабілізація щільності потоку посилок, що запобігає заторам на конвеєрних лініях та перевантаженню виконавчих механізмів (пушерів, сортувальних відгалужень).

– оптимізація швидкості подачі та зчитування штрих-кодів/RFID-міток залежності від поточного завантаження машини.

– мінімізація людського фактора та зниження ймовірності помилкового сортування за умов надходження складних і гетерогенних комбінацій упаковок.

Таким чином, розробка системи автоматичного регулювання є безпосередньою відповіддю на сучасні виклики ринку логістики, забезпечуючи високу гнучкість, швидкість та точність обробки відправлень в умовах інтенсивного товарообігу.

1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Аналіз систем автоматизації в галузі

Відповідно до Комплексної програми створення Єдиної національної системи зв’язку України, одним із пріоритетних напрямів модернізації поштової інфраструктури є масове впровадження автоматичних поштооброблювальних машин та високотехнологічних конвеєрних ліній.

Сучасне поштооброблювальне обладнання інтегрує складні механічні вузли з гідравлічними, пневматичними та електричними приводами, функціонування яких забезпечується спеціалізованими мікропроцесорними системами та ЕОМ. Такі комплекси класифікуються як технічні автоматизовані системи, де керуючі функції розподілені між апаратними засобами та людиною-оператором.

До базового складу апаратних пристроїв сучасних логістичних комплексів належать:

– модулі завантаження та формування первинного матеріального потоку;

– оптичні та електронні пристрої зчитування й розпізнавання адресних ознак;

– комутаційні пристрої транспортно-розподільних систем;

– накопичувальні бункери та сортувальні кишені;

– керуючі підсистеми (модулі адресування, синхронізації, автоматичного контролю та технічної діагностики).

У межах такої автоматизованої системи на людину-оператора покладаються функції вищого рівня керування:

– моніторинг процесів завантаження/розвантаження;

– ручне введення адресних даних через системи відеокодування (при обробці нестандартної кореспонденції або важкої пошти);

– коригування й вибір алгоритмів сортування;

– ухвалення рішень на основі статистичного аналізу роботи лінії для її адаптації до змінних умов.

Виробничий цикл поштового зв'язку складається з послідовних операцій приймання, оброблення, транспортування та доставки відправлень. Найбільш ресурсомісткою та критичною з точки зору ризику помилкового спрямування (засилів) є стадія сортування. Саме тому ключовим завданням модернізації галузі є проектування АС для автоматизованого розподілу як письмової кореспонденції (ПК), так і важкої пошти (посилок, бандеролей, періодики, постпакетів).

Зважаючи на те, що письмова кореспонденція залишається наймасовішим сегментом, автоматизація її обробки має вирішальне значення. Провідні світові виробники (зокрема Siemens, Toshiba, NEC, Elsag, Bell & Howell, Telefunken) орієнтуються на створення гнучких модульних комплексів.

Основою таких ліній є:

– автоматичні машини для розбирання листів забезпечують первинне калібрування потоку, відсіюючи нестандартну кореспонденцію за габаритами, масою та жорсткістю, що підвищує продуктивність наступного обладнання;

– автоматичні лицювально-штемпелювальні машини: орієнтують конверти адресною стороною в один бік і здійснюють погашення знаків поштової оплати, полегшуючи подальше автоматичне зчитування;

– автоматичні листосортувальні машини: здійснюють безпосередній високошвидкісний розподіл листів за напрямками на основі розпізнаних індексів.

Комплексний підхід до проектування та дослідження поштооброблювальних систем передбачає аналіз обладнання у логічній послідовності реалізації технологічного процесу. Системний розгляд кожної ланки автоматизованої лінії охоплює такі етапи:

– визначення області призначення та класифікація досліджуваних систем;

– розробка та аналіз узагальнених функціональних і структурних схем, вивчення принципів дії;

– дослідження конструктивних особливостей окремих функціональних вузлів;

– порівняльний аналіз технічних і компонувальних рішень вітчизняних та зарубіжних аналогів;

– виконання інженерних розрахунків, моделювання та комплексна оптимізація параметрів системи для досягнення максимальної пропускної спроможності.

Автоматизовані сортувальні системи являють собою високотехнологічні комплекси, призначені для автономного розподілу різнорідних матеріальних об'єктів без безпосереднього залучення людського ресурсу. Функціонування таких систем базується на інтеграції широкого спектра вимірювальних пристроїв, датчиків та виконавчих механізмів.

В основу алгоритму роботи автоматизованого комплексу покладено принцип ідентифікації індивідуальних параметрів і характеристик кожного об'єкта (розміри, вага, штрих-код, RFID-мітка або адресна ознака). На основі зчитування цих детермінованих ознак керуючий контролер динамічно визначає подальшу траєкторію та напрямок руху вантажу в транспортно-розподільній мережі.

Сучасна класифікація автоматизованих систем сортування включає такі основні класи обладнання:

– сортувальні конвеєрні лінії (лінійні сортувальники);

– ковзні сортувальники типу «Shoe Sorter» (черевичкові сортувальні машини);

– сортувальні системи з поперечними стрічками (Cross-Belt Sorters);

– роботизовані комплекси сортування та змішаного палетування.

1. Сортувальні конвеєри.

Конструктивно класичний сортувальний конвеєр складається з базової магістральної лінії (стрічкової або рольгангової з приводними роликами), вздовж якої інтегровані спеціальні відвідні модулі (лінії виносу / сортувальні кишені).

Такі конвеєрні комплекси мають модульну архітектуру, що дозволяє масштабувати систему та створювати довільну кількість розгалужень залежно від виробничих потреб. Вони відрізняються високою універсальністю та підходять для обробки широкого спектра вантажів із різними габаритними параметрами.

Приклад конвеєрної сортувальної станції зображений на рис.1.1.

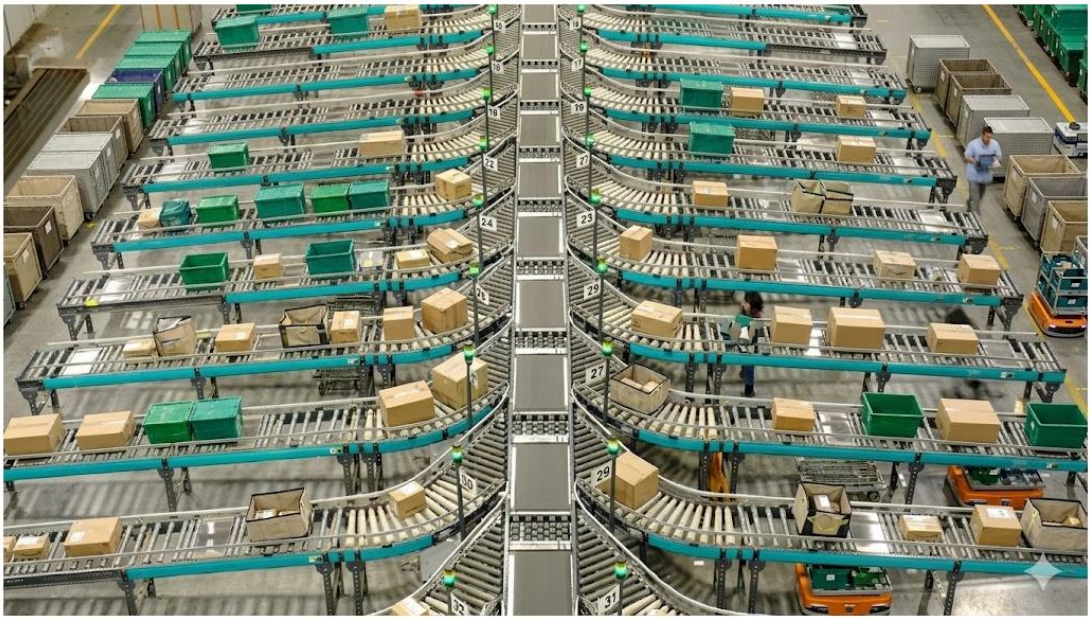


Рисунок 1.1 – Приклад конвеєрної сортувальної станції

2. Сортувальні комплекси типу «Shoe Sorter» (або системи із рухомими відхиляючими елементами/колодками) конструктивно базуються на несучому полотні, що складається з поперечних екструдованих алюмінієвих профілів (пластин). Уздовж цих пластин встановлені спеціальні ковзні елементи – «черевички» (колодки).

Під час руху магістрального конвеєра спеціальний напрямний механізм змушує колодки плавно зміщуватися по діагоналі або перпендикулярно до осі руху. У результаті цього відбувається м'яке та точне зсування вантажу або поштового відправлення з основного полотна на відповідну відвідну лінію (лінію виносу).

Головною перевагою такої кінематичної схеми є забезпечення високої делікатності фізичного впливу на об'єкт сортування. Завдяки відсутності різких ударних навантажень, які притаманні класичним пневматичним пушерам (товкачам), системи «Shoe Sorter» є оптимальним рішенням для транспортування та розподілу крихких вантажів, деформованих пакунків або посилок із нестабільними геометричними параметрами.

Типову конструктивну схему такого сортувального комплексу наведено на рис. 1.2.

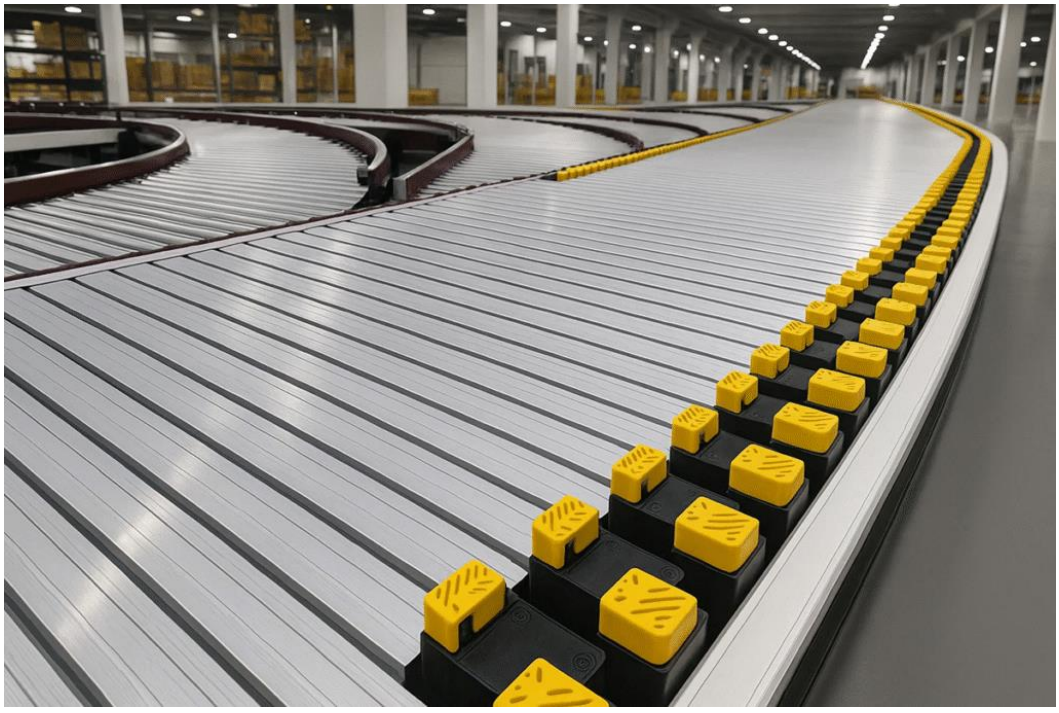


Рисунок 1.2 – Приклад ланки конвеєру «Shoe Sorter»

3. Сортувальні комплекси з поперечними стрічками мають модульну архітектуру, де магістральний ланцюговий або кабельний конвеєр складається із послідовно з'єднаних рухомих кареток. На кожній такій каретці встановлено автономну малогабаритну стрічкову транспортерну секцію, вісь руху якої орієнтована строго перпендикулярно до напрямку переміщення основного потоку.

Функціонально ці системи виконують ті ж завдання з розподілу матеріальних об'єктів, що й класичні лінійні конвеєри або системи «Shoe Sorter».

Однак механізм скидання вантажу тут реалізований за рахунок примусового короткочасного ввімкнення привода індивідуальної поперечної стрічки в момент проходження каретки навпроти потрібного сортувального відгалуження.

Основними техніко-економічними перевагами такої конструктивної схеми є:

– процес скидання відбувається на значно вищих лінійних швидкостях, що суттєво збільшує загальну пропускну спроможність сортувальної машини;

– активний привод поперечної стрічки дозволяє надійно та точно зміщувати посилки й товари з високим коефіцієнтом тертя (наприклад, пакунки в гумовому чи шорсткому полімерному обгортанні), які могли б застрягати або деформуватися за пасивного зсуву.

Загальну компонувальну схему та принципову структуру сортувальної станції з поперечними стрічками наведено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Приклад сортувальної системи з поперечними стрічками

4. Системи змішаного палетування (або комплекси автоматизованого формування гетерогенних вантажних пакетів) є інтелектуальними робототехнічними та конвеєрними рішеннями, що призначені для високоефективного укладання на піддони (палети) або у контейнери різнорідної продукції, яка суттєво відрізняється за габаритами, формою та масою.

Конструктивну основу таких розподільчих вузлів зазвичай складають магістральні ланцюгові конвеєри, у зоні розгалужень (кутових чи перпендикулярних передавачів) яких інтегровані підйомні роликові модулі (валки).

Функціональний принцип роботи цієї кінематичної схеми полягає у наступному:

– керуюча система ідентифікує об'єкт і відстежує його координату на магістральному ланцюговому конвеєрі;

– у момент, коли вантаж позиціонується точно навпроти необхідної лінії виносу (напрямку формування), за сигналом контролера активується пневматичний або електричний привод підйомного механізму;

– додаткові роликові валки піднімаються вище рівня несучих ланцюгів, перехоплюють вантаж і завдяки перпендикулярному обертанню примусово зводять його на відвідну транспортну лінію.

Такі комплекси є ідеальним рішенням для автоматизованих складів та великих логістичних центрів із високою інтенсивністю товарообігу, де виникає потреба у динамічному формуванні збірних палет або контейнерів із різнотипової упакованої продукції. Принципову схему та тривимірну візуалізацію роботи системи змішаного палетування наведено на рис. 1.4 – 1.5 відповідно.

5. Роботизоване сортування є новітнім етапом розвитку логістичних технологій, де функцію розподілу вантажів виконують автономні мобільні роботи-кур’єри (AGV/AMR). Ключова відмінність цієї концепції від традиційних лінійних сортувальників полягає в її архітектурі: замість жорстко

зафіксованих конвеєрних стрічок використовуються незалежні програмовані модулі.



Рисунок 1.4 – Приклад системи змішаного палетування

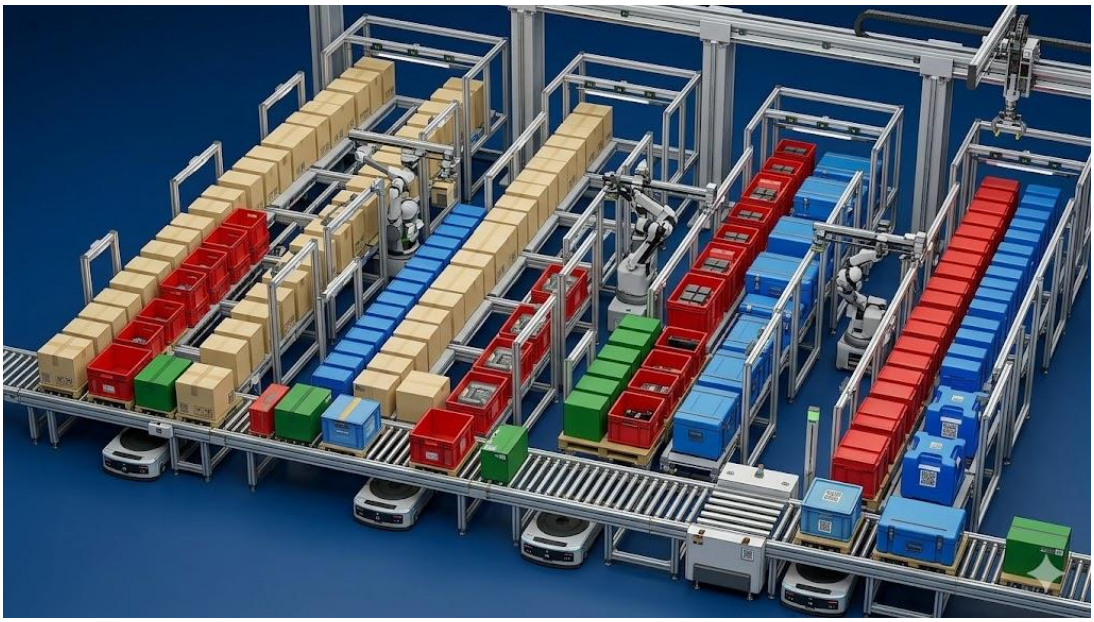


Рисунок 1.5 – Візуалізація роботи системи змішаного палетування

Це повністю знімає обмеження щодо напрямків переміщення всередині логістичного вузла та забезпечує безпрецедентний рівень гнучкості системи.

Серед техніко-економічних та експлуатаційних переваг роботизованих сортувальних систем слід виділити:

– гнучкість механізмів вивантаження: мобільні платформи адаптуються під специфіку різноманітних вантажів завдяки встановленню модульних робочих органів. Зокрема, для переміщення об'єкта з платформи робота (рис. 1.6) на приймальний вузол або накопичувальний бункер застосовуються механізми гравітаційного скидання (перекидні лотки) або інтегровані бортові стрічкові міні-конвеєри.

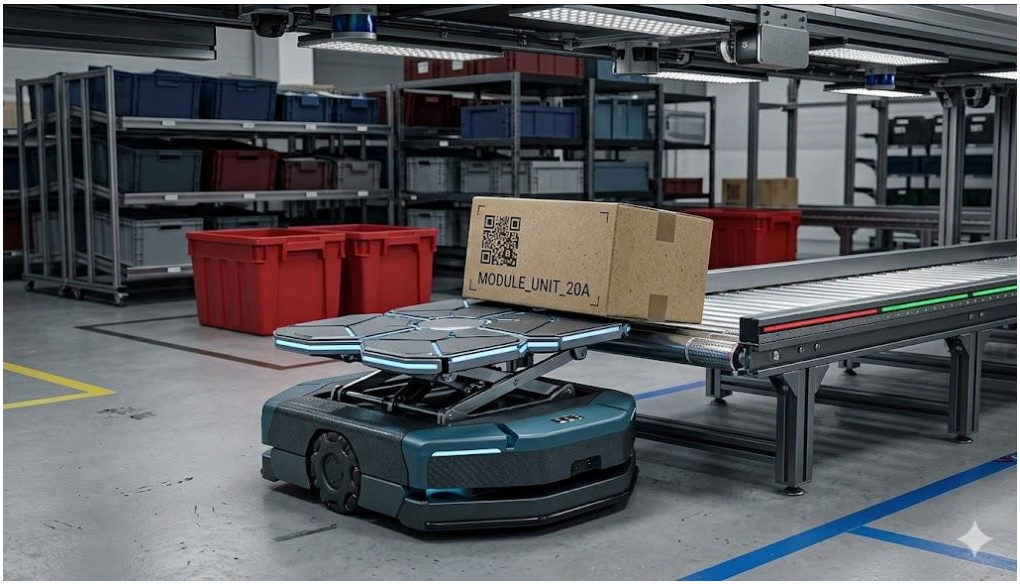


Рисунок 1.6 – Приклад кур’єра системи роботизованого сортування

– оптимальне енергоспоживання: за рахунок високого коефіцієнта корисної дії (ККД) приводів та інтелектуального розрахунку траєкторій, роботи практично не мають холостого пробігу. Оскільки конструкція мобільного робота є відносно легкою, витрати енергії на транспортування власної ваги обладнання мінімізуються;

– низькі капітальні витрати на розгортання (CapEx): на відміну від капіталомістких стаціонарних комплексів, монтаж роботизованої системи не

потребує масштабних будівельно-монтажних робіт, тривалого проектування трас конвеєрів та залучення великих людських ресурсів для пусконалагодження. Система масштабується простою інтеграцією додаткових роботів у програмне поле.

Така функціональна універсальність дозволяє роботам-кур'єрам однаково ефективно оперувати як дрібними поштовими відправленнями, так і пакунками складної геометрії чи з високим коефіцієнтом тертя.

1.2 Аналіз систем автоматизації сортування поштових відправлень

Будова та логіка роботи установок для сортування важкої пошти безпосередньо залежать від обраних технологічних рішень для обробки великих поштових відправлень – посилок, бандеролей, пачок друкованої преси та інших масивних вантажів. Попри велику різноманітність технічних конфігурацій, в основі будь-якої сортувальної машини лежить єдиний базовий комплекс взаємопов'язаних вузлів та механізмів:

– модуль живлення (пристрій подачі вантажів);

– вузол формування регулярного потоку (забезпечує рівномірні інтервали між об'єктами);

– блок введення адресних ознак (зчитування або кодування інформації про напрямок);

– транспортно-розподільна система (головний конвеєр переміщення);

– накопичувачі (кінцеві пункти збору відсортованих відправлень);

– система автоматичного керування.

Головна відмінність між автоматизованим сортуванням посилок і обробкою листів полягає в габаритах та масі, яка у випадку важкої пошти в середньому перевищує вагу стандартного листа в 1000 разів.

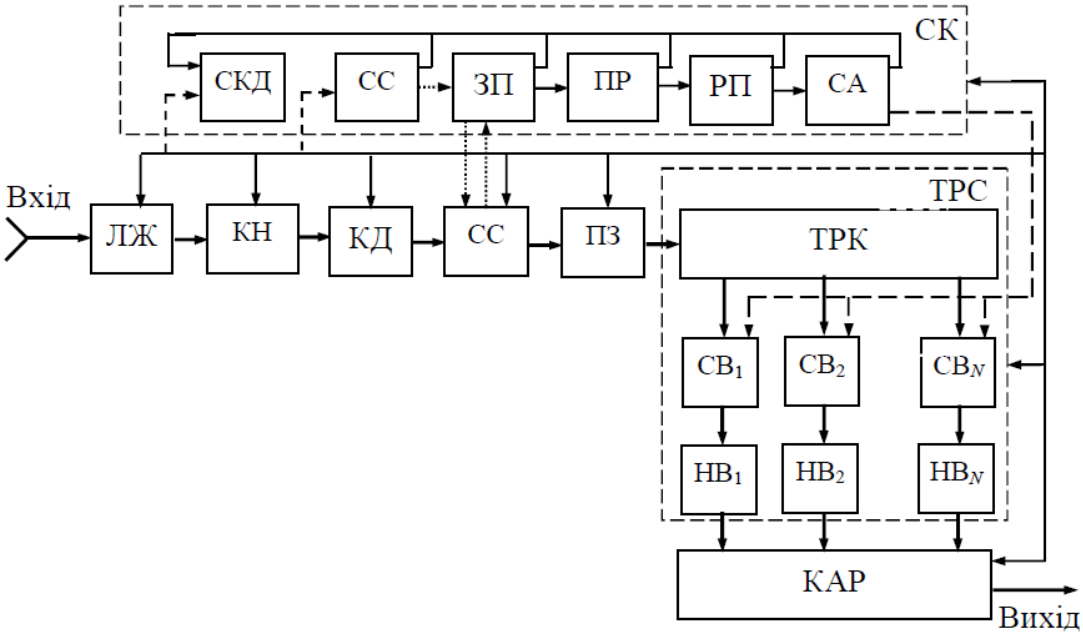
Цей фактор суттєво впливає на інженерні рішення:

– велика маса не дозволяє ТРС працювати на надвисоких швидкостях.

– процеси перенаправлення посилок у накопичувачі вимагають більшого часу.

– висока інерційність та специфіка важких відправлень вимагають використання посилених матеріалів та особливої архітектури функціональних вузлів УСВП.

Загальну принципову структуру такої системи відображено на схемі конфігурації обладнання (рис. 1.7).



СКД – система контролю та діагностики, ЗП – пристрої зчитування, ПР – пристрої розпізнавання, РП – розв'язуючий пристрій, СА – система адресування, СК – система керування, ЛЖ – лінії живлення, КН – конвеєр-накопичувач, КД – конвеєр-дозатор, СС – стартовий стіл, КЖ – комплекс живлення, ТРК – транспортуючого розподільного конвеєра, ТРС – транспортно-розподільна система, СВ – скидачів вантажів, НВ – накопичувач почтових вантажів, КАР – конвеєри автоматизованого

Рисунок 1.7 – Узагальнена структурна схема установок для сортування важкої пошти

У досконалих комплексах сортування поштових вантажів застосовуються конвеєрні лінії живлення для подавання поштових вантажів від засобів зовнішнього транспортування, а також конвеєри автоматизованого розвантаження з робото-технічними пристроями розвантаження поштових вантажів із накопичувачів та їх завантаження в контейнери [4, 9, 32].

Система керування забезпечує узгоджену взаємодію функціональних вузлів установок для сортування важкої пошти шляхом аналізу інформації про їх стан, адресні ознаки поштових відправлень та формування відповідних керуючих дій на виконуючі органи.

Основними вузлами системи керування установок для сортування важкої пошти є пристрої зчитування та розпізнавання (призначені для уведення інформації про адресні ознаки поштових вантажів), розв'язуючий пристрій та система адресування, пристрій (система) синхронізації, система контролю та діагностик.

Основними функціями системи керування установок для сортування важкої пошти є:

– оброблення інформації про адресні ознаки поштових відправлень, сигналів пристрою синхронізації;

– вмикання виконуючих механізмів пристрою завантаження

– вмикання виконуючих пристроїв скидачів при їх наближенні до накопичувачів, в які адресовані відповідні поштові вантажі [4, 7].

З урахуванням розглянутої специфіки побудови транспортно-розподільної системи установок для сортування важкої пошти та їх керуючих систем процес керування сучасних систем сортування характеризується за двома видами потоку вантажів:

– сортування вантажів, які рухаються у розподільному конвеєрі з постійним кроком;

– сортування вантажів, крок яких залежить від їх довжини у напрямі транспортування.

1.3 Технології автоматизації систем сортування поштових відправлень

Залежно від логістичних завдань, сортування об'єктів (посилок, бандеролей, палет) здійснюється за чотирма основними критеріями:

1. Сортування за кінцевим напрямком.

Орієнтоване на доставку вантажу до фінальної точки. Для цього кожне відправлення маркується унікальним ідентифікатором (штрих-кодом, QR-кодом або RFID-міткою).

Послідовність роботи алгоритму:

– зчитування даних: оптичні датчики або сканери фіксують адресну інформацію з поверхні об'єкта;

– аналіз та обробка: програмне забезпечення звіряє отриманий код із базою даних, визначає оптимальний логістичний маршрут і присвоює об'єкту відповідну категорію;

– маршрутизація: керуючі сигнали спрямовують механізми (роликові чи стрічкові конвеєри, поворотні платформи, пушери) для переміщення вантажу на потрібну лінію;

– фінальний розподіл: вантажі групуються за конкретними напрямками або поштовими скриньками для подальшого транспортування.

2. Сортування за пріоритетом.

Забезпечує першочергову обробку термінових та важливих відправлень. Інформація про статус вантажу кодується так само, як і адреса.

Для реалізації цього методу програмно застосовують алгоритм «Пріоритетна черга» на базі структури даних типу «купа»:

– у системі створюється динамічний масив черги;

– кожне нове відправлення додається в чергу відповідно до свого коефіцієнта терміновості (чим вищий пріоритет, тим ближче до початку черги опиняється об'єкт);

– система безперервно вилучає з черги елемент із найвищим пріоритетним

маркером для негайної обробки (транспортування, пакування);

– цикл повторюється автоматично, поки черга не спорожніє.

3. Сортування за масою.

Використовується для розподілу вантажів за ваговими категоріями. Це необхідно для правильного завантаження транспортних засобів, оптимізації корисної вантажопідйомності та безпеки. Вимірювання відбувається без зупинки потоку завдяки динамічним вагам, інтегрованим безпосередньо в конвеєрну лінію (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Вбудовані ваги конвеєру

4. Сортування за габаритами та формою.

Спрямоване на вимірювання фізичних параметрів і геометрії об'єктів. Метод дозволяє щільно комплектувати вантажні місця та раціонально використовувати простір у контейнерах чи кузовах автомобілів. Для розпізнавання нестандартних форм застосовують інфрачервоні бар'єри (датчики позиціонування) або цифрові камери високої роздільної здатності з елементами машинного зору.

Інструментальне забезпечення: специфікація датчиків

На основі наведених методів класифікації формується апаратний комплекс сортувальної лінії, який включає три основні типи обладнання:

– системи машинного зору та ІЧ-датчики (сканування форми, об'єму та візуальних маркувань);

– RFID-зчитувачі (дистанційна радіочастотна ідентифікація);

– транзитні зважувальні модулі (динамічний контроль маси);

Детальніше розглянемо технологічні особливості двох останніх категорій:

1. Радіочастотна ідентифікація.

Технологія дозволяє безконтактно розпізнавати об'єкти за допомогою радіохвиль без необхідності прямої видимості мітки сканером.

Мітка складається з мікрочипа (де зберігається унікальний код і технічні дані про вантаж) та мініатюрної антени для прийому/передачі сигналу. За типом живлення мітки бувають активними (із вбудованою батареєю) або пасивними (активуються за рахунок енергії електромагнітного поля самого зчитувача, що робить їх дешевими та довговічними). Коли посилка потрапляє в зону дії антени RFID-рідера, дані миттєво зчитуються та передаються в інформаційну систему.

2. Конвеєрні (вбудовані) ваги.

Це спеціальні вагопроцесорні модулі, що монтуються в розрив між двома суміжними секціями конвеєра. Така конструкція гарантує плавність транзиту та дозволяє зважувати об'єкти безпосередньо під час їхнього руху.

Завдяки своїй модульності, такі системи адаптуються під будь-які типи пакування та матеріали: від м'яких пакетів, блістерів, картонних коробок і каністр до сирої, незапакованої продукції чи великогабаритних лотків.

3. Інтегрований підхід: сумісна робота технологій

Найвищу точність автоматизації досягають шляхом комбінування RFID-ідентифікації та динамічного зважування:

Цей механізм дозволяє не лише автоматично сортувати вантажі за маршрутами, а й миттєво виявляти помилки комплектування (наприклад,

недолив рідини, відсутність вкладення або пересортицю) ще до етапу завантаження у транспорт.

В США та Японії для сортування мішків та посилок використовується установка фірми FNC, виконана на основі просторового ланцюгового конвеєра, до ланцюга якого з великим шагом закріплені підвіски, на кожній з яких по боках змонтовані дві платформи з адресоносіям, що утримуються у вихідному положенні індивідуальними замками. При скиданні вантажу замок відкривається упором з електромагнітним приводом. Для плавного нахилу платформи застосовуються спеціальні демпфери. Завантаження розподільного конвеєра здійснюється зверху через триступінчаті буферні камери, окремі для кожного ряду платформ. Останній ступінь камери функціонує у режимі, синхронізованому з циклом роботи розподільного конвеєра.

Установка сортування невеликих посилок та бандеролей фірми «Elsag» (Італія) (рис. 1.9) виконана на базі просторового конвеєра з касетними носіями вантажів, в які вони завантажуються з попереднім кодуванням (оператором або автоматично) [9].

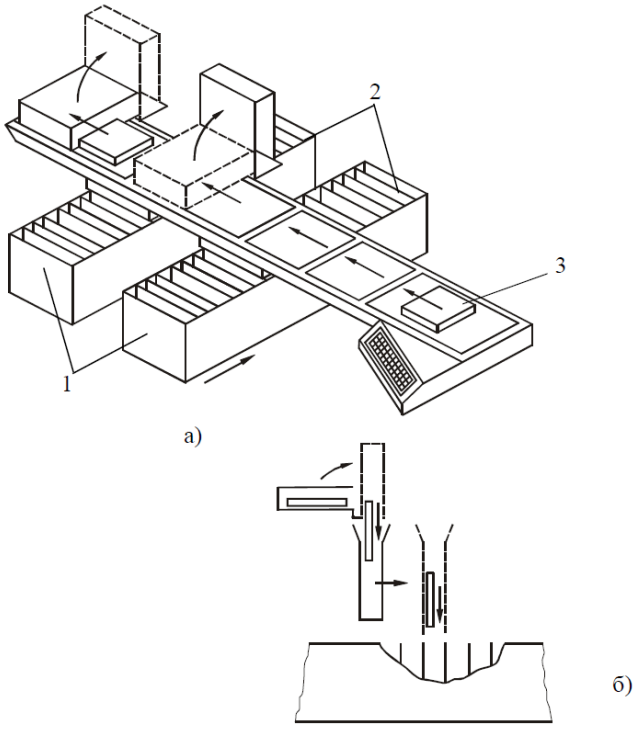


Рисунок 1.9 – Установка сортування невеликих посилок та бандеролей фірми «Elsag»

Кожна касета 1 має два шківи, один з яких приводиться електродвигуном та рухає касету вздовж монорейки (траси конвеєра). У касеті розміщується багаторівневий контейнер з двома рядами вертикальних кліток 2, у кожну з яких завантажується одне поштове відправлення 3.

Верхня частина клітки відкрита для завантаження поштового, відправлення, а нижня частина відкривається автоматично при його розвантаженні у накопичувач. Монорейка прокладається по замкненій траєкторії та проходить уздовж робочих місць операторів, на яких відправлення кодуються та завантажуються у касети. Після місць завантаження монорейка піднімається вверх для транспортування касет над поштовими мішками. При досягненні касетою відповідного мішка, дно клітки автоматично відкривається і, відправлення розвантажується у мішок.

1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

В кваліфікаційній роботі бакалавра проектується установка сортування важкої пошти, що обробляє великогабаритні та масивні відправлення (посилки, бандеролі, пачки преси, мішки) масою від 0,5 до 50 кг.

Призначення системи автоматизації: забезпечення безперервного, високоточного та безаварійного розподілу важких поштових вантажів за логістичними напрямками в умовах інтенсивного та нерівномірного вхідного потоку.

Мета проєктування:

– максимізація пропускної спроможності установки сортування важкої пошти за рахунок автоматичного вирівнювання інтервалів між об'єктами;

– зниження динамічних навантажень на механічні вузли транспортно-розподільної системи та механізми скидання;

– мінімізація помилок сортування (накладання вантажів, пропуск

зчитування маркування);

– забезпечення енергоефективності комплексу шляхом адаптивного керування швидкістю приводів конвеєрів.

Технічні вимоги та функціональні завдання системи:

1. Функція регулювання та формування регулярного потоку.

Оскільки вантажі надходять на лінію живлення нерівномірно (хаотично, групами або «встик»), система повинна реалізувати алгоритм автоматичного дроселювання та рознесення:

– вимірювання відстані (ΔL) та часового проміжку (Δt) між суміжними посилками за допомогою оптичних датчиків (світлових завіс/фотодатчиків);

– управління багатосекційним розгінним конвеєром. Кожна секція оснащується частотним перетворювачем (ЧП) для асинхронного двигуна;

– якщо посилки йдуть занадто близько, наступна секція конвеєра прискорюється, а попередня – сповільнюється (або короткочасно зупиняється), утворюючи нормативно заданий технологічний проміжний інтервал, необхідний для коректної роботи вантажних ваг та механізмів розподілу.

2. Ідентифікація та координація вантажів.

Автоматичне зчитування штрих-кодів/QR-кодів сканерами машинного зору або зчитування радіочастотних міток RFID-антенами.

Пов'язування зчитаного ID вантажу з його поточною координатою в ТРС за допомогою сигналів від енкодерів (датчиків шляху та швидкості головного конвеєра).

3. Динамічний вагогабаритний контроль.

Визначення точної маси об'єкта в русі за допомогою вбудованої ваговимірювальної ланки (динамічних ваг).

Перевірка геометричних параметрів (довжина, ширина, висота) для попередження заклинювання механізмів.

4. Керування транспортно-розподільною системою та накопичувачами.

Формування сигналу на спрацювання виконавчих механізмів розподілу

(пушерів, поворотних роликів, рухомих бортів) точно в момент позиціонування вантажу навпроти заданого накопичувача.

Контроль переповнення накопичувальних смуг за допомогою датчиків заповнення.

Структура побудови системи автоматизації.

Проєкт має передбачати трирівневу архітектуру керування:

Нижній (польовий) рівень:

– датчики наявності та позиціонування (фотоелектричні, інфрачервоні);

– датчики швидкості та положення стрічки (енкодери);

– ваговимірювальні тензодатчики та RFID/оптичні сканери;

– виконавчі пристрої (електродвигуни конвеєрів, частотні перетворювачі, пневмо- або електроприводи скидачів).

Середній рівень (рівень контролерів):

– програмований логічний контролер (ПЛК / PLC) з модулями швидкісного обчислення та обробки переривань від енкодерів;

– ПЛК реалізує алгоритм регулювання швидкості секцій живлення (наприклад, за допомогою ПІД-регулятора або алгоритмів нечіткої логіки для компенсації інерції важких вантажів).

Верхній рівень (SCADA / HMI):

– диспетчерський контроль, моніторинг завантаження ліній, візуалізація заторів, збір статистики сортування та діагностика аварійних ситуацій.

Висновки. У ході аналізу об'єкта автоматизації було детально розглянуто сучасні технологічні рішення та архітектурні принципи побудови установок для сортування важкої пошти (УСВП). Визначено, що специфіка обробки великогабаритних вантажів масою до 50 кг вимагає впровадження інтегрованих інструментальних засобів, зокрема динамічних ваг, систем машинного зору та RFID-ідентифікації для точного кодування й безперервного вагогабаритного контролю. Обґрунтовано необхідність реалізації каскадного контуру автоматичного регулювання вхідного потоку на базі багатосекційного

розгінного конвеєра з частотно-регульованими приводами для формування стабільних технологічних інтервалів між об'єктами. Завдяки формалізації технічних завдань було сформовано концептуальну трирівневу структуру АСУ ТП, що базується на сучасному програмованому логічному контролері та SCADA-системі, впровадження якої дозволить максимізувати пропускну спроможність лінії та мінімізувати динамічні навантаження на її механічні вузли.

Впровадження спроєктованої системи дозволить ліквідувати «заторні» ситуації на етапі подачі, зменшити аварійні зупинки конвеєра на 15–20%, повністю виключити людський фактор на етапі визначення маршруту важкої пошти та оптимізувати енергоспоживання приводів за рахунок адаптивного регулювання швидкості під поточну щільність потоку.

2. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Автоматизована система керування установкою сортування важкої пошти (АСК УСВП) повинна мати розподілену ієрархічну трирівневу структуру, яка забезпечує високу надійність, живучість та гнучкість системи.

Нижній (польовий/периферичний) рівень: має функціонувати в режимі реального часу. До його складу входять первинні вимірювальні перетворювачі (оптичні світлові завіси, фотодатчики, індуктивні сенсори, тензометричні датчики, енкодери, RFID-антени) та виконавчі пристрої (частотні перетворювачі, асинхронні електродвигуни, пневматичні клапани пушерів, електроприводи).

Середній (контролерний) рівень: базується на промисловому програмованому логічному контролері (ПЛК) з модулями розширення для обробки аналогових і дискретних сигналів, а також швидкісних лічильників для роботи з енкодерами. ПЛК повинен здійснювати циклічне опитування датчиків, обробляти алгоритми регулювання потоку вантажів і видавати керуючі сигнали на виконавчі механізми.

Верхній (диспетчерський) рівень: включає автоматизоване робоче місце оператора (АРМ) на базі промислового комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням SCADA та людино-машинним інтерфейсом (HMI).

Вимоги до надійності та функціонування:

– система повинна забезпечувати безперервний цілодобовий режим роботи (24/7) з урахуванням регламентних технологічних перерв;

– час готовності системи після увімкнення живлення або аварійного перезавантаження не повинен перевищувати 60 секунд;

– у разі відмови верхнього рівня (АРМ оператора), середній рівень (ПЛК) повинен автономно продовжувати виконання алгоритмів сортування та регулювання потоку без зупинки лінії, накопичуючи статистичні дані у буфері.

2.2 Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу

Для забезпечення штатного функціонування АСК УСВП та її технічного обслуговування визначається такий склад та кваліфікація персоналу:

Змінний оператор (1 особа в зміну):

Функції: моніторинг поточного стану сортувальної лінії через HMI-панель, запуск та зупинка системи, первинне реагування на повідомлення про затори або переповнення кишень, ручне відеокодування адресних ознак у разі неможливості автоматичного зчитування.

Кваліфікація: середня спеціальна або вища технічна освіта, базові навички роботи з ПК, знання інструкцій з експлуатації сортувального комплексу.

Спеціаліст з АСУ ТП (1 особа на об'єкт/чергування):

Функції: поточне обслуговування засобів автоматизації, калібрування вбудованих ваг, налаштування оптичних датчиків та RFID-зчитувачів, діагностика мережевих з'єднань (Industrial Ethernet, PROFINET), усунення програмно-апаратних збоїв ПЛК.

Кваліфікація: вища інженерно-технічна освіта (спеціальність «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» або аналогічна), досвід роботи з промисловими ПЛК, частотними перетворювачами та мережевими протоколами.

Черговий слюсар-механік (1 особа в зміну):

Функції: нагляд за механічною частиною конвеєрів, натягом стрічок, роботою пневмоприводів скидачів, усунення фізичних заклинювань важкої пошти.

Для забезпечення безперебійної та безпечної експлуатації одного нагрівального комплексу впродовж однієї робочої зміни (при безперервному чотирибригадному графіку роботи) необхідний персонал, наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Організаційна структура та чисельність оперативного й обслуговуючого персоналу

Посада / Роль	Кількість	Основні обов'язки в контурі АСУ ТП
Змінний оператор	1	Моніторинг ходу термообробки через АРМ (SCADA), вибір та запуск технологічних програм (рецептів відпалу), дистанційне керування у позаштатних ситуаціях
Черговий слюсар-механік	1	Поточний контроль стану первинних датчиків, виконавчих механізмів, перевірка герметичності імпульсних ліній, усунення дрібних механічних несправностей арматури
Спеціаліст з АСУ ТП	1	Адміністрування верхнього рівня системи, конфігурування ПЛК, калібрування каналів вимірювання, аналіз архівних трендів та передісторії аварійних подій

2.3 Вимоги до безпеки

Проєктні рішення АСК УСВП повинні повністю відповідати чинним нормативним актам з охорони праці, промислової безпеки та електробезпеки (ДСТУ, ПУЕ).

Вздовж усієї траси конвеєрної системи, а також безпосередньо на пультах керування, мають бути встановлені фіксовані кнопки аварійної зупинки червоного кольору типу «грибок» та тросові вимикачі. Спрацювання будь-якого елемента e-stop повинно апаратно (через реле безпеки) знеструмлювати силові приводи конвеєрів та блокувати подачу стисненого повітря до пневмопушерів.

Усі рухомі та обертові частини (вали, привідні барабани, ланцюги) повинні мати захисні кожухи. Зона дії автоматичних скидачів важких вантажів має бути

огороджена захисними сітками з кінцевими вимикачами, що блокують роботу пристрою при відкритті інспекційних дверей.

Усі металеві корпуси щитів керування, опорні металоконструкції конвеєрів та корпуси двигунів підлягають обов'язковому заземленню. Шафи керування ПЛК повинні мати ступінь захисту не нижче IP54, а польові датчики – не нижче IP65.

Перед автоматичним запуском лінії система повинна видавати переривчастий звуковий сигнал тривалістю 5–7 секунд. Стан лінії має візуалізуватися триколірними світлосигнальними колонами (зелений – норма, жовтий – попередження/затор, червоний – аварія/зупинка).

2.4 Вимоги до функцій, які виконуються системою

Система автоматизації повинна реалізувати дві основні групи функцій: інфраструктурно-керуючі та інформаційно-обчислювальні.

1. Керуючі функції.

Адаптивне регулювання швидкості (Формування потоку): Автоматичне керування частотними перетворювачами розгінних секцій лінії живлення на основі сигналів від фотодатчиків. При виявленні критичного зближення двох посилок ($\Delta L < L_{int}$), система повинна розраховувати та динамічно змінювати швидкість стрічок для відновлення нормативного зазору.

Синхронізований розподіл вантажів: Видача точного за часом імпульсу на спрацювання виконавчого механізму (пушера, або висувних роликів) відповідно до даних енкодера шляху, коли об'єкт із конкретним ID порівнюється з призначеним накопичувачем.

Керування пуском/зупинкою: Послідовний (каскадний) запуск конвеєрних стрічок від кінця лінії до початку для запобігання токовим перевантаженням мережі та нагромадженню вантажів.

2. Інформаційні функції.

Сканування та розпізнавання: Опитування RFID-зчитувачів та оптичних сканерів, автоматичне декодування бар-кодів та передача результату в базу даних.

– динамічне зважування: обробка сигналів від тензодатчиків вбудованої вагової ланки без зупинки стрічки, фільтрація високочастотних шумів вібрації конвеєра, фіксація чистої маси посилки.

– технічна діагностика: безперервний моніторинг помилок частотних перетворювачів, тиску у пневмосистемі, перегріву двигунів, а також виявлення заторів (коли датчик зайнятий вантажем довше розрахункового часу t_{max}).

2.5 Вимоги до видів забезпечення

Для стабільного функціонування АСК УСВП має бути розроблено та впроваджено комплекс таких забезпечень:

Технічне забезпечення: включає вибір конкретних моделей промислових контролерів, модулів вводу-виводу, комутаційного обладнання, датчиків, кабельно-провідникової продукції та промислових ЕОМ. Технічні засоби повинні бути стійкими до вібраційних навантажень та електромагнітних завад від роботи потужних електродвигунів.

Програмне забезпечення (ПЗ): поділяється на системне (операційні системи АРМ, прошивки ПЛК) та прикладне. Прикладне ПЗ ПЛК розробляється на мовах стандарту IEC 61131-3. ПЗ верхнього рівня (SCADA) повинно містити графічні мнемосхеми, модулі трендів, журналів подій та систему розмежування прав доступу (адміністратор, інженер, оператор).

Організаційне забезпечення: сукупність посадових інструкцій, регламентів технічного обслуговування (ТО-1, ТО-2), графіків перевірки ваговимірювальних пристроїв та інструкцій з дій персоналу в аварійних ситуаціях.

Метрологічне забезпечення: документація, методики та інструменти для періодичної повірки та калібрування вбудованих конвеєрних ваг (зважувальної ланки) та датчиків габаритів для забезпечення нормативної точності вимірювань.

2.6 Вимоги до інформаційного забезпечення

Інформаційне забезпечення регулює структуру, кодування, потоки та способи збереження даних у системі сортування важкої пошти.

Організація бази даних (БД): Система повинна взаємодіяти з реляційною базою даних логістичного центру (наприклад, MS SQL або PostgreSQL). У БД для кожного сортувального циклу має створюватися запис, що містить:

– ID відправлення (Штрих-код / RFID-номер);

– часовий штамп проходження контрольної точки;

– фізичні параметри (маса, тривимірні габарити);

– код призначеного маршруту та фактичний номер сортувальної кишені, куди було скинуто вантаж;

– статус обробки (Успішно / Контроль якості / Помилка зчитування).

Обмін даними між рівнями: Комунікація між ПЛК та SCADA повинна здійснюватися по завадостійких промислових протоколах (наприклад, OPC UA або Modbus TCP) із періодичністю оновлення даних на екрані оператора не більше 200 мс.

Захист інформації та живучість: Для запобігання втраті даних при раптовому зникненні електроживлення, шафи АСУ ТП та АРМ оператора повинні комплектуватися джерелами безперебійного живлення (ДБЖ / UPS), які забезпечують роботу інформаційного контуру протягом щонайменше 15–20 хвилин для коректного завершення поточних сортувальних операцій та збереження логів. Системні логи та бази даних повинні автоматично архівуватися та дублюватися на резервний сервер (бэкап) кожні 24 години.

Висновки. У результаті розробки технічного завдання було сформовано комплексний перелік вимог до структури, функціонування та забезпечення автоматизованої системи керування установкою сортування важкої пошти (АСК УСВП). Обґрунтовано доцільність впровадження трирівневої ієрархічної архітектури, що гарантує автономність роботи ПЛК середнього рівня та високу живучість системи при збоях верхнього диспетчерського контуру (SCADA). Особливу увагу приділено суворим стандартам промислової безпеки, включаючи апаратне блокування приводів через системи аварійної зупинки та світлозвукову сигналізацію. Визначено функціональні вимоги до алгоритмів адаптивного регулювання вхідного потоку, динамічного зважування та координації вантажів за допомогою енкодерів, а також чітко регламентовано структуру інформаційного забезпечення та кваліфікаційний склад обслуговуючого персоналу. Сформоване технічне завдання є нормативно-технічною основою для подальшого математичного моделювання, вибору апаратних засобів та практичної реалізації системи автоматизації.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1 Ідентифікація об’єкта керування

При сортуванні важкої пошти (до 50 кг) конвеєрні стрічки зазнають сильних динамічних ударів, вібрацій та просковзувань. Існує необхідність для фільтрації шумів датчиків та точного оцінювання реального стану потоку (точних відстаней між посилками та їхньої реальної швидкості) для подальшого регулювання ПІД-регулятор для керування частотними перетворювачами.

Розглянемо дві суміжні секції розгінного конвеєра:

– попередню (лінійне живлення);

– наступну (розгінну).

Задача – утримувати задану відстань (інтервал)L_{int} між посилками.

Нехай $x_1(t)$ – координата першої посилки (що йде попереду), а $x_2(t)$ – координата другої посилки.

Поточна відстань між ними:

$$l(x) = x_1(t) - x_2(t) \tag{3.1}$$

Динаміка зміни відстані описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dl(t)}{dt} = v_1(t) - v_2(t), \tag{3.2}$$

де $v_1(t)$ – швидкість першої посилки (вважаємо її умовно постійною на поточному кроці);

$v_2(t)$ – швидкість другої посилки, яка визначається динамікою електропривода розгінної секції.

Динаміку привода (асинхронний двигун + частотний перетворювач) можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$T_e \frac{dv_2(t)}{dt} + v_2(t) = u(t), \quad (3.3)$$

де T_e – електромеханічна стала часу привода (інерція важкого конвеєра з вантажем);

u(t) – керуючий сигнал від ПЛК (задана швидкість для частотного перетворювача).

ПЛК вимірює відстань l(t) за допомогою оптичних датчиків/світлових завіс, а швидкість – за допомогою енкодера. Проте:

– посилки можуть мати неправильну форму, мішки можуть коливатися, створюючи оптичні завади («брязкання» сигналу датчика);

– важка посилка масою 40 кг через інерцію просковзує по стрічці в момент прискорення, тому реальна швидкість посилки не дорівнює швидкості стрічки, яку фіксує енкодер.

Фільтр Калмана розв'язує задачу оптимального оцінювання. Рівняння стану системи у дискретному вигляді з кроком квантування Δt:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad (3.4)$$

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (3.5)$$

де вектор стану (реальна відстань та реальна швидкість другої посилки):

$$x_k = \begin{vmatrix} l_k \\ v_{2,k} \end{vmatrix}, \quad (3.6)$$

z_k – вектор вимірювань від фотодатчиків та енкодера;

w_k, v_k – випадкові шуми процесу (просковзування) та вимірювань (оптичні завади) з коваріаційними матрицями Q та R.

Матриці системи:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{T_e} \end{vmatrix}, \quad \text{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{\Delta t}{T_e} \end{vmatrix}, \quad \text{H} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \tag{3.7}$$

Фільтр Калмана на кожному кроці робить прогноз стану на основі моделі конвеєра, а потім коригує його через реальні покази датчиків, видаючи максимально точну відфільтровану оцінку відстані l_k та швидкості $v_{2,k}$.

3.2 Математична модель ПІД-регулятора

Отримавши очищену від шумів оцінку відстані l_k від фільтра Калмана, ПЛК порівнює її із уставкою (нормативним інтервалом) L_{int}.

Помилка регулювання (відхилення від заданого інтервалу):

$$e_k = L_{int} - l_k, \tag{3.8}$$

Рівняння дискретного ПІД-регулятора для формування керуючого сигналу u_k (на частотний перетворювач) має вигляд:

$$u_k = u_{k-1} + K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i e_k \Delta t + \frac{K_d}{\Delta t}(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}), \tag{3.9}$$

де K_p – коефіцієнт пропорційної ланки (відповідає за швидкість реакції на затор чи зближення);

K_i – коефіцієнт інтегральної ланки (компенсує статичну похибку, викликану постійною масою вантажу);

K_d – коефіцієнт диференціальної ланки (реагує на динаміку зміни відстані, запобігаючи зіткненню важких посилок).

Загальна структурна схема контуру наведена на рис. 3.1.

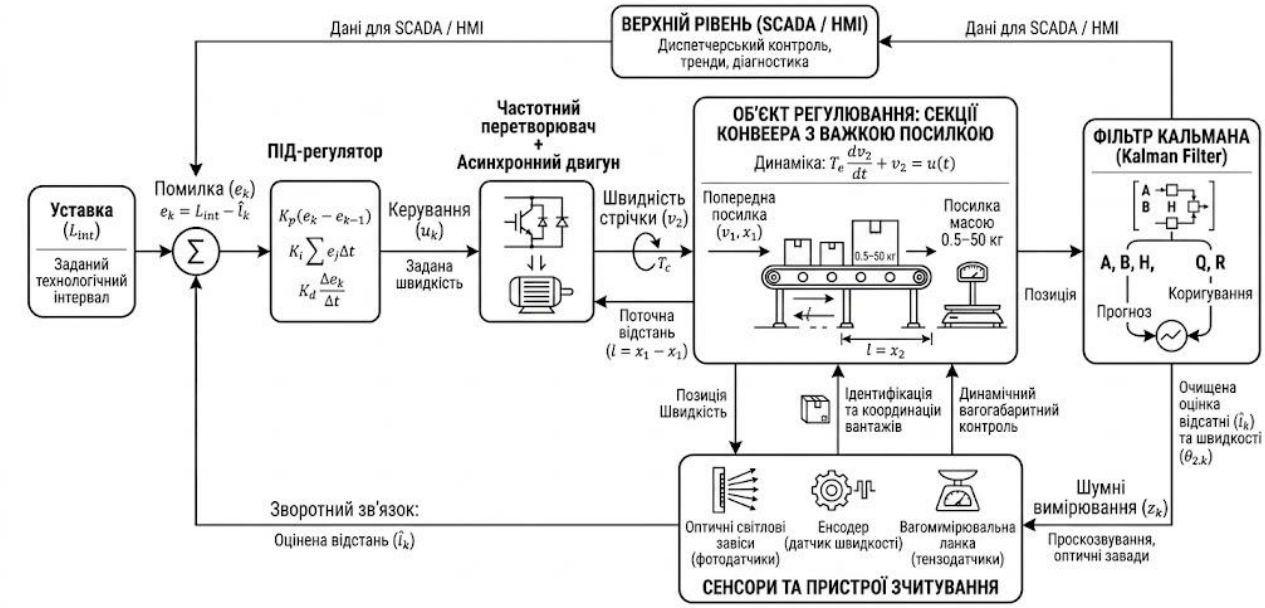


Рисунок 3.1 – Загальна структурна схема управління потоком сортування

3.3 Моделювання системи регулювання потоку сортування відправлень

Спільне використання алгоритму оптимального оцінювання стану (Калмана) та класичного ПІД-закону регулювання дозволяє повністю компенсувати похибки польових пристроїв та інерційність масивної сортувальної установки. Система автоматизації забезпечує плавне відновлення технологічного кроку без ударних динамічних навантажень на механічні вузли УСВП, що мінімізує ймовірність заклинювання або накладання важкої пошти на етапі динамічного зважування та сортування.

Для моделювання системи регулювання потоку сортування відправлень використано програмний пакет Octave-Online.

Код програми:

1. Вихідні дані

```
N = 100;                    Кількість замірів (кроків)
t = 1:N;
```

```
Lint_real = 1.5;            Реальна стабільна відстань між посилками (1,5 м)
R_shum = 0.2;               Рівень шуму/завад датчика (дисперсія)

 2. Матриці фільтра Калмана (одновимірний випадок)
A = 1; H = 1; Q = 0.001; R = R_shum^2;
P = 1;                      Початкова помилка оцінки
x_est_prev = 1.0;           Початкова здогадка фільтра (1,0 м)

 Масиви для збереження результатів
z_history = zeros(1, N);
x_history = zeros(1, N);

 3. Цикл роботи фільтра Калмана (крок за кроком)
for k = 1:N
   Симулюємо реальне життя: датчик видає реальну відстань + випадковий
шум
   z = Lint_real + R_shum * randn();
   z_history(k) = z;

    КРОК 1: ПРОГНОЗ
   x_pred = A * x_est_prev;
   P_pred = A * P * A' + Q;

   КРОК 2: КОРИГУВАННЯ (ОНОВЛЕННЯ)
   K_gain = P_pred * H' * inv(H * P_pred * H' + R);  Коефіцієнт Калмана
   x_est = x_pred + K_gain * (z - H * x_pred);       Очищена оцінка
   P = (1 - K_gain * H) * P_pred;                    Оновлення помилки

   Зберігаємо результат для графіка та передаємо на наступний крок
   x_history(k) = x_est;
```

```
    x_est_prev = x_est;
end
```

4. Побудова графіка

```
figure;
plot(t, z_history, 'r.', 'MarkerSize', 8); hold on;
plot(t, x_history, 'b-', 'LineWidth', 2);
line([1 N], [Lint_real Lint_real], 'Color', 'g', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 2);
title ('Демонстрація роботи фільтра Калмана');
xlabel ('Номер заміру (крок)'); ylabel('Відстань (м)');
legend ('«Брязкання» та шуми датчика (Вхід)', 'Очищений сигнал Фільтра Калмана (Вихід)', 'Істинне значення');
grid on;
```

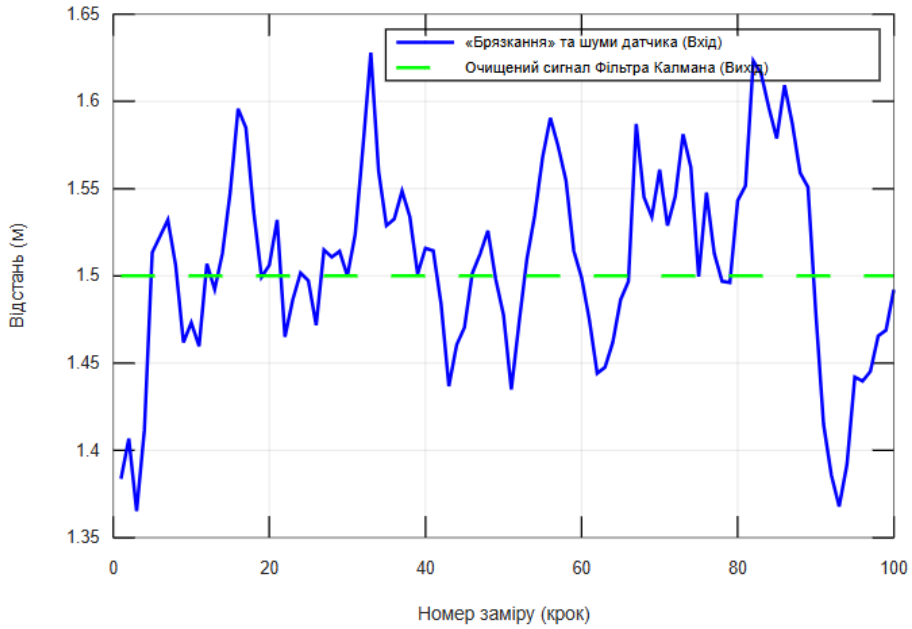


Рисунок 3.2 – Робота фільтра Калмана

На основі проведеного комп'ютерного моделювання у середовищі Octave виконано порівняльний аналіз первинних вимірювальних даних та результуючого вихідного сигналу оптимального лінійного фільтра Калмана.

Результати експерименту дозволяють зробити такі теоретичні та практичні висновки щодо якості оцінювання вектора стану системи.

На графіку первинні вимірювання відстані, отримані безпосередньо з виходу оптичного датчика позиціонування, представлені у вигляді дискретної хмари точок (червоний колір). Даний сигнал характеризується значним рівнем високочастотної завади (білого гаусового шуму з дисперсією R), що моделює реальні умови експлуатації УСВП (оптичне «брязкання» через пил, вібраційні коливання конвеєрної станини та нестабільну геометрію м'яких поштових відправлень). Безпосереднє використання такого сигналу в контурі зворотного зв'язку ПІД-регулятора є неможливим, оскільки це призвело б до автоколивань привода, перевитрати електроенергії та передчасного зносу механічних передач.

Зелена лінія відображає істинну фізичну координату об'єкта в просторі (заданий інтервал 1,5 м). Це той латентний (прихований) стан системи, який інформаційна підсистема АСК повинна максимально точно ідентифікувати на основі неідеальних вимірювань.

Синя суцільна лінія відображає динаміку формування апостеріорної оцінки фільтра Калмана. Моделювання підтверджує високу збіжність алгоритму.

Попри свідомо введену початкову похибку ініціалізації (фільтр стартує з помилкового значення 1,0 м за умови реального стану 1,5 м), алгоритму знадобилося мінімальне число кроків квантування (короткочасний перехідний процес), щоб мінімізувати аоріорну коваріацію помилки P_{pred} та вийти на істинну траєкторію.

У процесі подальшої фільтрації матриця коефіцієнтів підсилення Калмана (K_{gain}) набуває оптимального балансу між динамікою моделі процесу (Q) та флуктуаціями датчика (R). Фільтр ефективно згладжує високочастотну стохастичну складову завади, забезпечуючи формування незміщеної, спрогнозованої та плавної оцінки траєкторії.

Отриманий після фільтрації сигнал має високий рівень гладкості та низьку дисперсію помилки оцінювання. Це дозволяє використовувати його як релівантну змінну процесу для реалізації робастного (завадостійкого) керування

частотно-регульованим електроприводом конвеєра-дозатора, гарантуючи точність позиціонування важких вантажів без ризику хибних спрацювань виконавчих механізмів.

Висновки. У ході виконання розділу було розроблено математичне забезпечення та проведено комп'ютерне моделювання контуру автоматичного регулювання потоку вантажів для установки сортування важкої пошти. На основі аналізу фізико-механічних властивостей об'єкта автоматизації обґрунтовано доцільність спільного застосування дискретного ПІД-регулятора та оптимального лінійного фільтра Калмана в єдиній системі керування частотно-регульованим приводом конвеєра-дозатора.

Комп'ютерне моделювання розроблених алгоритмів у середовищі Octave підтвердило такі науково-практичні результати:

1. Алгоритм Калмана успішно виконав деноізинг (очищення) первинних метрик від оптичного «брязкання» та стохастичних завад датчиків з високим рівнем флуктуацій, забезпечивши формування плавної, незміщеної оцінки реальної відстані між посилками.

2. Попри введену початкову похибку ініціалізації, фільтр продемонстрував високу швидкість адаптації, мінімізувавши коваріаційну матрицю помилок за мінімальне число кроків квантування часу.

3. Контур ПІД-регулювання, отримуючи відфільтровані дані, забезпечив плавну та аперіодичну стабілізацію технологічного інтервалу (1,5 м) усуненням нештатної ситуації критичного зближення посилок без виникнення автоколивань чи ударних навантажень на механічні вузли ТРС.

Таким чином, запропонований комплекс математичних моделей та алгоритмів цифрової обробки сигналів повністю задовольняє вимогам технічного завдання щодо точності, надійності та безаварійності процесу автоматизованого перерозподілу важких поштових вантажів у гнучких логістичних системах.

4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТОКУ СОРТУВАННЯ

4.1 Схема матеріальних і інформаційних потоків

Інформаційний потік є двоспрямованим, циклічним і реалізується через промислові мережі обміну даними (наприклад, PROFINET, Modbus TCP):

У контурі автоматизації установки сортування важкої пошти рух матеріальних об'єктів та циркуляція керуючих сигналів утворюють цілісну динамічну систему, де кожен потік жорстко синхронізований із суміжним етапом обробки.

Схема матеріальних і інформаційних потоків наведена на рис. 4.1.

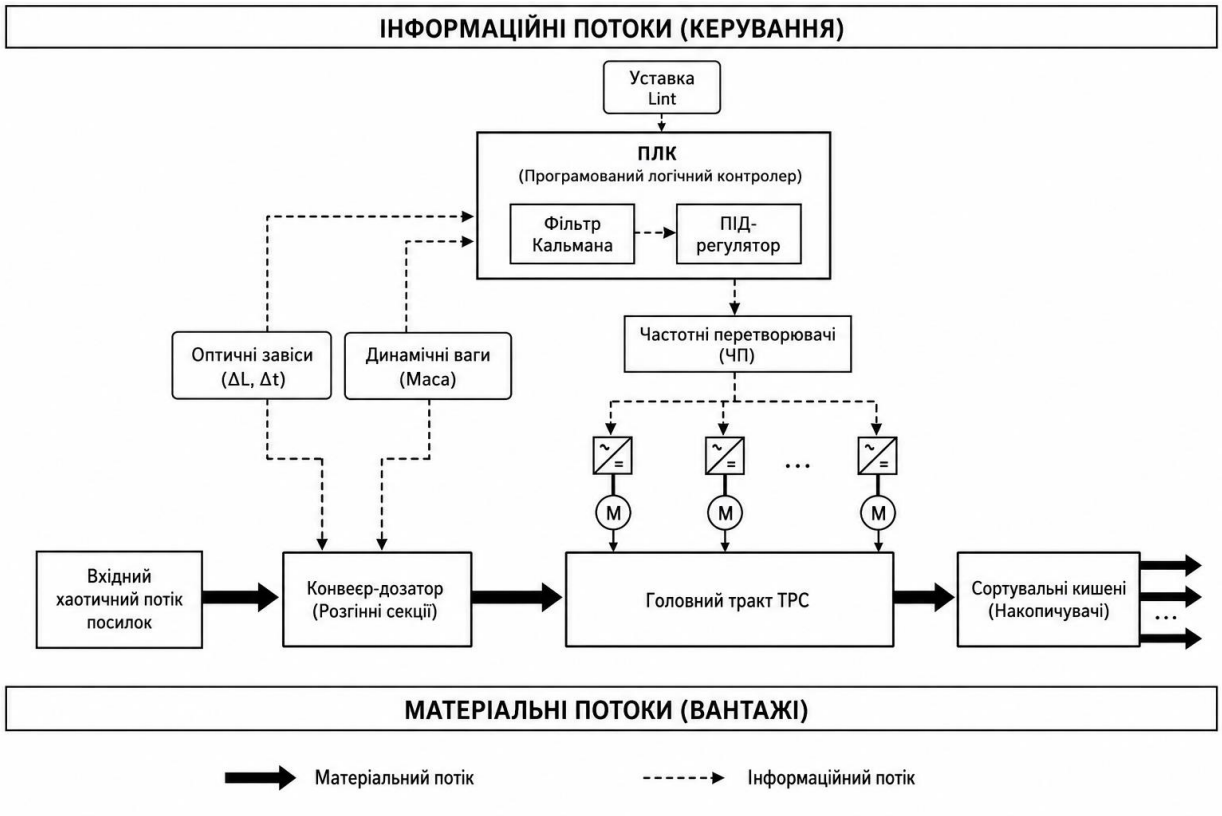


Рисунок 4.1 – Схема матеріальних і інформаційних потоків

Матеріальний потік починається з надходження хаотичної та нерівномірної маси посилок, бандеролей і мішків масою від половини до п'ятдесяти кілограмів із засобів зовнішнього транспорту на початкові секції лінії

живлення. На цьому етапі вантажі часто рухаються групами або впритул один до одного. Потім цей потік переходить у зону дроселювання на багатосекційний конвеєр-дозатор, де за рахунок примусової зміни швидкостей окремих стрічок посилки розсуваються в просторі, утворюючи впорядкований тракт із чіткими проміжками. Далі матеріальні об'єкти проходять через зону вимірювання, де вони з постійною швидкістю переміщуються через вбудовані ваги та оптичні рамки контролю габаритів. Фінальна стадія матеріального потоку розгортається на головному тракті транспортно-розподільної системи, де під механічним впливом поворотних роликів або пушерів вантажі змінюють свій вектор руху і перенаправляються в конкретні сортувальні кишені та накопичувачі.

Інформаційний потік рухається у зворотному та циклічному напрямках, забезпечуючи цифровий супровід та керування фізичним процесом. Його початкова ланка формується на периферійному рівні, де оптичні світлові завіси фіксують моменти перетину променів бортами посилок і передають у систему дані про поточну часову та просторову відстань, а інкрементальні енкодери генерацією імпульсів повідомляють точну швидкість стрічки та координату вантажу. Одночасно тензодатчики транслюють аналоговий сигнал маси, а сканери машинного зору або антени радіочастотної ідентифікації зчитують унікальний код адреси вантажу.

Наступний етап інформаційного потоку локалізується всередині процесора програмованого логічного контролера, де зашумлені через просковзування та пил первинні метрики відстані спрямовуються у програмний модуль фільтра Калмана. Фільтр формує очищену від похибок оптимальну оцінку стану і передає її на вхід ПІД-регулятора, який зіставляє отримане значення із внутрішньою уставкою технологічного інтервалу і розраховує помилку регулювання. Паралельно з цим контролер взаємодіє з базою даних логістичного центру, відправляючи зчитаний код посилки та отримуючи у відповідь номер призначеного маршруту.

Завершується інформаційний контур потоком керуючих і диспетчерських сигналів. Обчислене ПІД-регулятором рішення у вигляді коду або аналогової

величини передається на частотні перетворювачі, які фізично змінюють оберти асинхронних двигунів розгінних секцій конвеєра для відновлення зазору. У момент, коли поточна координата посилки збігається з положенням потрібної кишені, контролер видає дискретну команду на соленоїди пневмоприводів механізмів скидання. Поточні кадри телеметрії, дані про продуктивність лінії та тривожні логи заторів безперервно транслюються на верхній рівень промислової мережі, відображаючись на моніторах операторів у вигляді графіків і мнемосхем SCADA-системи.

4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ

Для технічної реалізації системи автоматичного регулювання вхідного потоку та координації важких поштових відправлень масою від 0.5 до 50 кг обрано сучасну, завадостійку елементну базу. Вибір обладнання зумовлений високою інтенсивністю матеріального потоку, наявністю динамічних вібраційних навантажень та необхідністю обробки сигналів у реальному часі.

1. Фотоелектричний лазерний датчик Omron E3Z-LR86.

Безконтактна фіксація наявності вантажу на стрічці, визначення геометричних меж посилок (довжини), а також первинне вимірювання просторового інтервалу (ΔL) та часового зазору (Δt) між суміжними об'єктами.



Рисунок 4.2 – Фотоелектричний лазерний датчик Omron E3Z-LR86

Застосування червоного лазерного діода (655 нм) з методом відбиття від рефлектора забезпечує високу точність спрацювання як на чистий білий папір (до 300 мм), так і на темний шорсткий картон чи шорстку полімерну плівку (до 160 мм). Ступінь захисту IP67 та IP69K гарантує стабільну роботу в умовах промислової запиленості логістичного центру.

2. Інкрементальний енкодер Omron E6C2-CWZ6C.

Безперервне вимірювання лінійної швидкості руху конвеєрних стрічок та формування імпульсів шляху для точного відстеження поточної координати посилки після зчитування її адресних ознак.



Рисунок 4.3 – Інкрементальний енкодер Omron E6C2-CWZ6C

Датчик підтримує високу частоту відгуку (до 100 кГц) та швидкість обертання до 6000 об/хв. Вихідна конфігурація типу NPN з відкритим колектором дозволяє легко узгодити енкодер зі швидкісними лічильниками промислового контролера. Ступінь захисту IP64 забезпечує надійність при постійних вібраціях.

3. Ультразвуковий датчик Schneider Electric XX518A3PAM12.

Контроль висоти важких відправлень на вході розгінної секції та моніторинг переповнення кінцевих сортувальних кишень (накопичувачів).

Працює на частоті 300 кГц у діапазоні від 0.051 до 0.508 м, має дискретний вихід типу PNP та захист від зворотної полярності. Ультразвуковий принцип вимірювання є стійким до кольору, прозорості чи оптичного відбиття матеріалу упаковки посилки (мішок, пластиковий тубус, гофрокороб).



Рисунок 4.4 – Ультразвуковий датчик Schneider Electric XX518A3PAM12

4. Програмований логічний контролер на базі процесора TMS320F2812.

Опитування периферійних датчиків, програмна реалізація цифрового фільтра Калмана для деноізингу сигналів відстані, розрахунок керуючого впливу за ПІД-законом та координація роботи виконавчих механізмів розподілу.

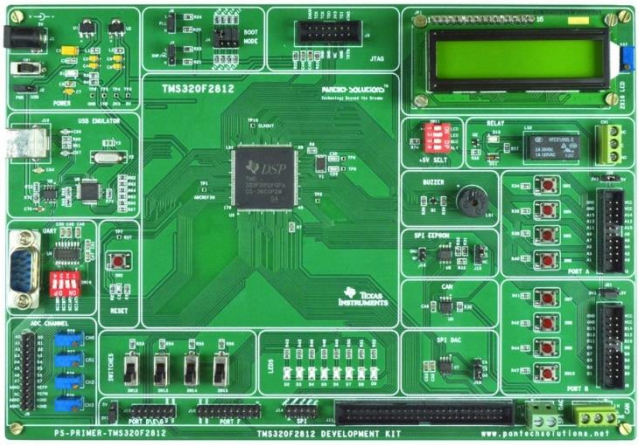


Рисунок 4.5 – Програмований логічний контролер на базі процесора TMS320F2812

Цей високопродуктивний 32-розрядний контролер має надзвичайно низький час виконання команд (0,03 мкс для фіксованої точки), що забезпечує детермінованість та швидкий відгук у режимі реального часу. Підтримка інтерфейсів промислових мереж (MPI/PROFIBUS-DP до 12 Мбіт/с) дозволяє створювати гнучкі розподілені системи та здійснювати вертикальну інтеграцію зі SCADA-рівнем.

5. Блок безконтактного керування (пускач реверсивний) ПБР-3А2.1.

Безконтактний пуск, зупинка та динамічний реверс трифазних асинхронних електродвигунів виконавчих механізмів (сортувальних скидачів, пушерів) на виходах ТРС.



Рисунок 4.6 – Пускач реверсивний ПБР-3А2.1

Забезпечує надійний захист короткозамкненого ротора від перевантажень за струмом. На відміну від класичних магнітних пускачів, безконтактна тиристорна комутація виключає підгоряння контактів, що гарантує високе середнє напрацювання на відмову (не менше 100 000 годин) у режимі частого перемикання.

6. Стабілізований блок живлення БПТ-24-2к.

Надійне електроживлення польових фотодатчиків, ультразвукових сенсорів та енкодера напругою постійного струму 24 В.



Рисунок 4.7 – Стабілізований блок живлення БПТ-24-2к

Має два гальванічно розв’язані канали з максимальним вихідним струмом 25 мА на канал, що повністю виключає взаємний вплив завад у сигнальних ланцюгах різних датчиків при виникненні перехідних процесів. Може монтуватися на DIN-рейку безпосередньо в шафу АСУ ТП.

7. Автоматичний вимикач ВА47-29М.

Захист силових ланцюгів живлення частотних перетворювачів, асинхронних двигунів конвеєрних секцій та шаф керування від струмів короткого замикання (КЗ) та теплового перевантаження.

Має номінальну стійкість до струмів КЗ на рівні 4.5 кА та комбінований розчіплювач (миттєвий електромагнітний струмової відсічки 5...10 I_n та інерційний тепловий). Відповідає вимогам ДСТУ 3020-95.

8. Пост керування кнопковий ПКЕ.

Організація місцевих пультів керування безпосередньо біля конвеєрних секцій для ручного пуску, зупинки лінії або ініціювання аварійної зупинки оператором.

Розрахований на номінальний струм до 10 А та напругу до 660 В змінного струму. Грибоподібна форма штовхача («Гр») забезпечує зручність швидкого натискання в нештатних ситуаціях.

9. Щитовий амперметр Е365 (діапазон 0-16 А).

Візуальний контроль поточного струму навантаження приводного двигуна магістрального конвеєра ТРС для оперативного виявлення механічних заклинювань важкої пошти.

Прилад змінного струму частотою 50 Гц із класом точності 1.5 та напрацюванням на відмову 25 000 годин. Має чітку ступеневу шкалу довжиною 90 мм.

На основі виконаного інженерного підбору сформовано підсумкову відомість обладнання сортувальної лінії (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Відомість технічних засобів автоматизації системи регулювання потоку

№ п.п.	Найменування технологічного параметра	Марка, тип приладу	Кіл. шт.	Примітка
1	Контроль просторового інтервалу вантажів	E3Z-LR86 (Omron)	4	Лазерний фотодатчик (вхід/розгін)
2	Вимірювання швидкості та координати посилок	E6C2-CWZ6C (Omron)	2	Інкрементальний енкодер на вал
3	Контроль габариту висоти / заповнення кишень	XX518A3PAM12	3	Ультразвуковий датчик положення
4	Безконтактне керування приводами скидачів	ПБР-3А2.1	4	Реверсивний тиристорний пускач
5	Стабілізоване живлення датчиків лінії (=24 В)	БПТ-24-2к	2	Двоканальний блок живлення
6	Обробка алгоритмів Калмана/ПІД та керування	TMS320F2812	1	Програмований логічний контролер
7	Диспетчерський контроль та SCADA-інтерфейс	АРМ Оператора	1	Промислова ПЕВМ (база AMD/Intel)
8	Силовий захист кіл живлення двигунів	ВА47-29М	6	Автоматичний вимикач
9	Місцевий ручний запуск та зупинка секцій	ПКЕ	3	Кнопковий пост керування
10	Контроль струмового завантаження приводів	Е365 (0-16А)	2	Щитовий аналоговий амперметр

4.3 Функціональна схема автоматизації управління

Функціональну схему автоматизації виконана за стандартами ДСТУ Б А.2.4-16:2008.

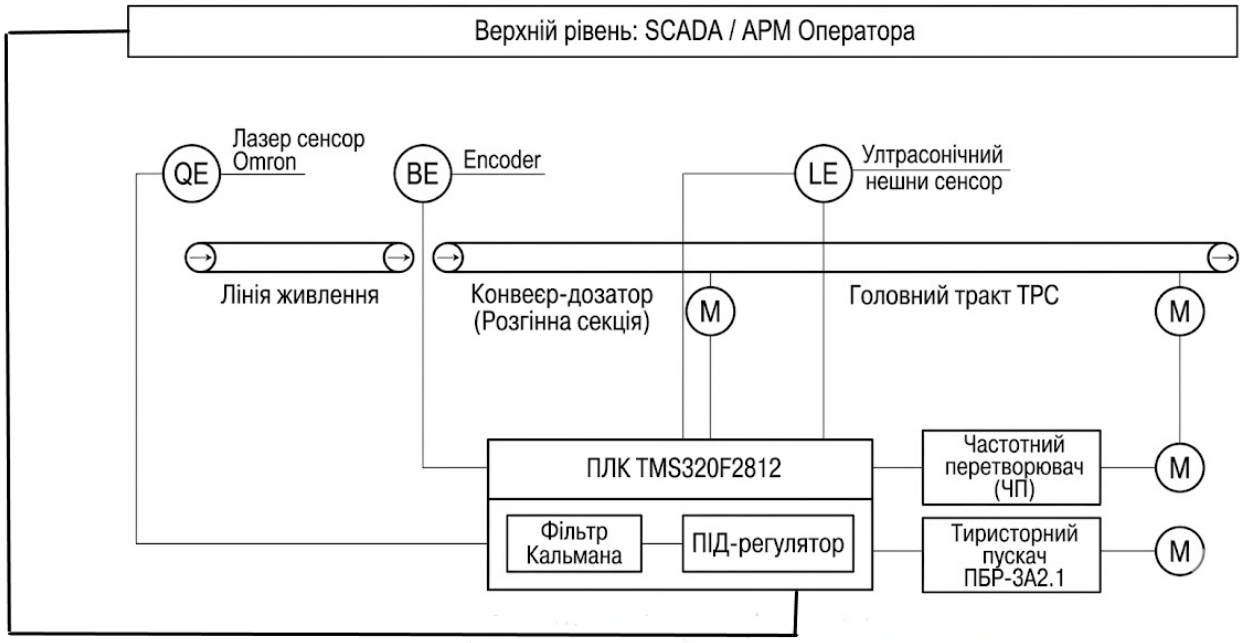


Рисунок 4.8 – Функціональні схеми автоматизації управління

Контур 1. Динамічне вирівнювання інтервалів посилок.

Лазерний фотодатчик QE-1 та індуктивний енкодер BE-1 безперервно знімають параметри вхідного матеріального потоку на розгінній секції конвеєра-дозатора. Сигнали у вигляді електричних імпульсів надходять на вхідні модулі контролера ПЛК. Програмне забезпечення контролера виконує математичну фільтрацію за алгоритмом Калмана, обчислює реальну відфільтровану відстань між посилками та порівнює її з уставкою. Сформований ПІД-алгоритмом керуючий сигнал спрямовується на регулятор швидкості SC-1 (частотний перетворювач), який змінює кутову швидкість приводного асинхронного двигуна M1, розтягуючи або стискаючи потік вантажів до нормативних 1,5 м.

Контур 2. Габаритний контроль та захист від заторів.

Ультразвуковий датчик LE-1 встановлений над стрічкою перед виходом на головний тракт ТРС. Він вимірює висоту кожної посилки. Якщо геометричні

параметри відправлення перевищують допустимі межі (що може викликати заклинювання механічних скидачів), контролер генерує аварійний сигнал, короткочасно зупиняє лінію живлення і передає інформацію на верхній рівень диспетчеризації.

Контур 3. Координація та виконавчий розподіл (сортування).

При переході впорядкованої посилки на головний конвеєр ТРС, датчик QE-2 фіксує момент перетину лінії, а енкодер BE-2 починає відлік імпульсів шляху. Одночасно з цим зчитаний RFID-сканером код вантажу звіряється з базою даних. Коли поточна координата посилки, розрахована ПЛК через імпульси енкодера, збігається з положенням цільового накопичувача, контролер видає дискретний сигнал на безконтактний реверсивний пускач типу ПБР-3А2.1. Пускач активує двигун М2 відповідного виконавчого механізму (пушера або поворотних роликів), здійснюючи делікатне зсування важкої посилки у сортувальну кишеню.

Контур 4. Диспетчерський нагляд та інтерфейс оператора.

Всі дані з ПЛК через вбудований інтерфейс PROFIBUS/Profinet передаються на верхній ієрархічний рівень системи – АРМ Оператора (SCADA). На моніторі відобажається динамічна мнемосхема руху вантажів, поточна продуктивність лінії (відправлень/годину), токова статистика з амперметрів та архівуються звіти про помилки зчитування адресних ознак. Для ручного аварійного втручання передбачено кнопку ПКЕ (Н-1), яка здатна миттєво знеструмити всю силову частину конвеєрного комплексу.

4.4 Принципова схема з’єднання між собою технічних засобів автоматизації

Принципова схема з'єднань технічних засобів автоматизації розроблена для координації інформаційних та силових ланцюгів АСК УСВП. Схема забезпечує гальванічну розв'язку, захист від завад та надійне передавання сигналів між польовим та контролерним рівнями.

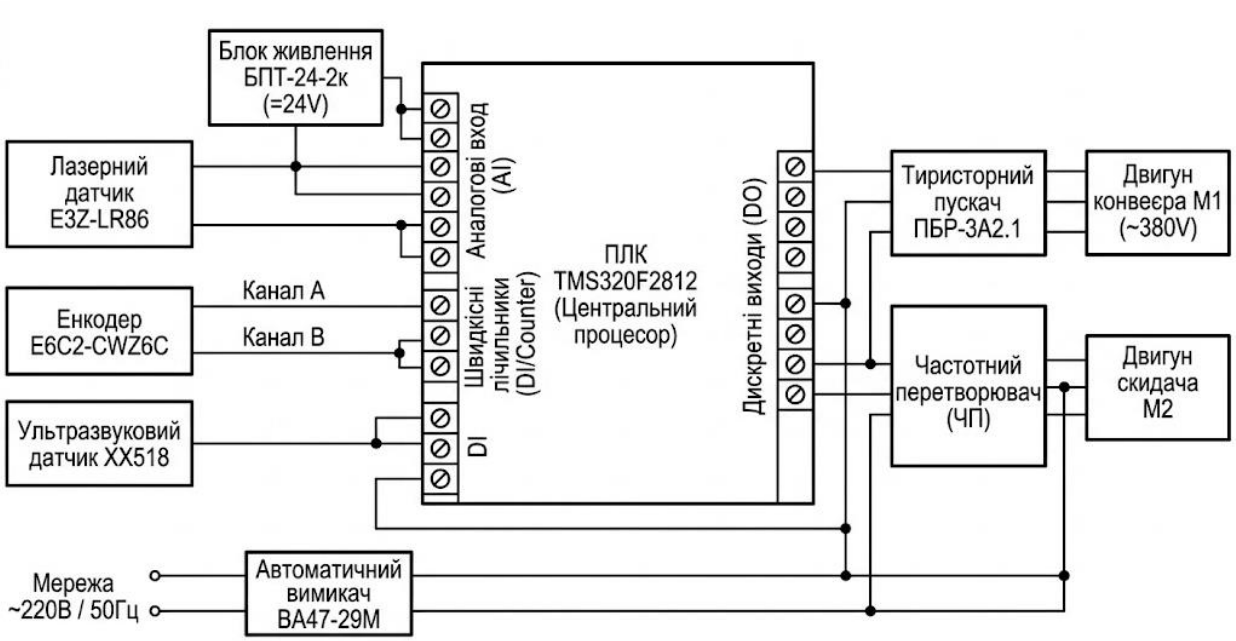


Рисунок 4.9 – Принципова схема з’єднання між собою технічних засобів автоматизації

4.5 Принципова електрична схема управління конвеєра

На рисунку 4.10 наведена принципова електрична схема управління конвеєром.

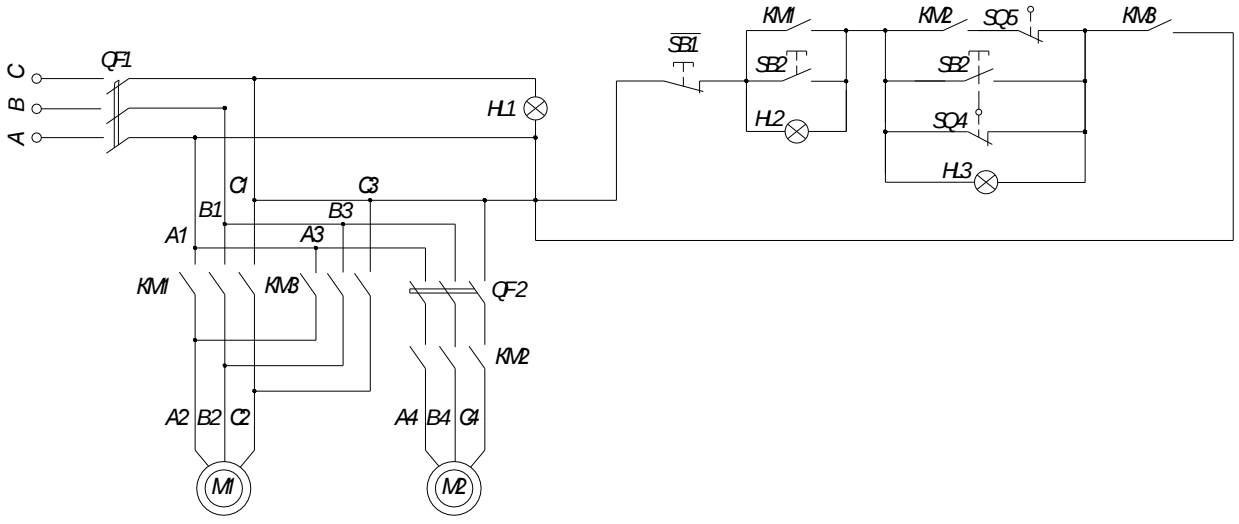


Рисунок 4.10 – Принципова електрична схема управління конвеєром.

Висновки. У результаті виконання розділу було здійснено обґрунтований вибір та специфікацію комплексу технічних засобів автоматизації для системи регулювання потоку установки сортування важкої пошти. Підібрана номенклатура приладів, що включає високошвидкісні лазерні датчики Omron, ультразвукові сенсори Schneider Electric та обчислювальний контролер TMS320F2812, повністю відповідає жорстким часовим та динамічним вимогам об'єкта автоматизації. Запропонована елементна база інтегрує польовий вимірювальний рівень із середнім контролерним контуром через високошвидкісні завадостійкі інтерфейси, що створює апаратну основу для практичної реалізації раніше розроблених цифрових алгоритмів фільтрації Калмана та ПІД-стабілізації технологічних інтервалів важкої пошти.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

5.1 Охорона праці

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і посадових обов'язків оператора АСУТП у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ сформовані заходи по забезпеченню безпеки праці.

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов'язані з виконанням посадових обов'язків та проведенням досліджень та розрахунків (розробкою, модернізацією, удосконаленням, тощо), є спеціалізованим, яке обладнане ПК з ВДТ.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, робоче місце оператора АСУТП приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ», обладнання має основну ізоляцію струмовідних частин, яка

забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки робоче місце оператора АСУТП за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають І групу з електробезпеки.

Ймовірність механічного травмування може виникнути внаслідок нераціонального розташування робочих місць, захаращення робочих місць або у зв'язку з недбалістю та неуважністю обслуговуючого персоналу. Для виключення травматизму згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» зроблено більш зручне та раціональне розташування робочих місць, таким чином збільшена відстань між ними, яка відповідає нормованим значення (площа на одне робоче місце має становити не менше ніж 6,0 м^2, а об'єм не менше ніж 20,0 м^3). Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями.

У зв'язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із

застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м'язових порушень робочі місця користувачів ПК оператора АСУТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для робочого місця оператора, обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

Робоче місце оператора АСУТП обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Метеорологічні умови для приміщенні з комп’ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

– у холодний період року: температура 21-23°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

– у теплий період року: температура 22-24°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

Охорона праці роботи з апаратами вистоювання тіста:

1. Загальні вимоги та допуск до роботи:

– до роботи допускаються особи, які пройшли спеціальне навчання,

інструктаж з охорони праці та пожежної безпеки, а також медичний огляд;

– працювати необхідно у спеціальному чистому санітарному одязі (халат або куртка, фартух, головний убір, що повністю закриває волосся) та взутті на нековзній підошві;

– перед початком роботи слід перевірити справність заземлення апарата, цілісність кабелів живлення та роботу вентиляції.

2. Безпека перед початком та під час завантаження:

– перевірте роботу приладів автоматичного регулювання температури та вологості (психрометрів/датчиків).

– візуально оцініть стан дверей, запірних механізмів та напрямних для стелажних візків (якщо це шафа тупикового або наскрізного типу);

– слідкуйте за тим, щоб підлога перед апаратом була сухою і чистою, щоб уникнути падіння під час перекочування візків із тістом;

– завантаження та вивантаження візків або листів (деків) потрібно проводити обережно, без різких поштовхів, щоб запобігти їх перекиданню.

3. Безпека під час експлуатації апарата:

– забороняється експлуатувати апарат із несправними приладами автоматики, датчиками рівня води або температури;

– не відкривайте двері камери вистоювання без нашої потреби під час робочого циклу;

– оскільки всередині підтримується висока вологість і температура (зазвичай +35...+40 °C і вологість до 80-85%), під час відкривання дверей існує ризик опіку парою. Відчиняти двері слід плавно, стоячи збоку від прорізу, і зачекати кілька секунд, поки вийде перша хвиля гарячої пари;

– категорично заборонено торкатися відкритих нагрівальних елементів (ТЕНів) або парогенератора;

– не допускайте переповнення водою бачка парогенератора (якщо регулювання ручне) та стежте за справністю клапанів подачі води.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи:

– вимкніть апарат від електромережі (натисніть кнопку «Стоп» та вимкніть головний рубильник/автомат);

– перекрийте подачу води (якщо апарат підключений до водопроводу);

– дайте обладнанню охолонути перед початком санітарної обробки;

– проведіть очищення та промивання внутрішніх поверхонь камери, злийте залишки води з піддонів чи парогенератора (згідно з інструкцією виробника);

– забороняється мити та дезінфікувати апарат, який перебуває під напругою, або заливати водою електричні блоки керування.

5. Дії в аварійних ситуаціях:

– у разі виявлення запаху горілої ізоляції, іскріння, відчуття дії струму під час дотику до корпусу («пробивання на корпус») або будь-яких незвичних шумів – негайно знеструмте апарат;

– сповістіть керівника робіт (майстра, технолога) про несправність. Не намагайтеся ремонтувати обладнання самостійно.

– у разі отримання опіку гарячою парою чи водою – негайно надайте першу допомогу (охолодження ураженої ділянки) та зверніться до медпункту.

5.2 Вимоги до обладнання

Вантажопідйомні та конвеєрні установки сортування важкої пошти відносяться до категорій обладнання підвищеної небезпеки через наявність масивних рухомих елементів, високу інерційність вантажів (до 50 кг) та застосування автоматичних виконавчих механізмів (пушерів, поворотних роликів). Безпечна експлуатація комплексу забезпечується суворим дотриманням таких інженерно-технічних вимог:

Усі відкриті обертові та рухомі частини обладнання (привідні та натяжні барабани конвеєрів, приводні ланцюги, вали електродвигунів) повинні бути закриті суцільними або сітчастими металевими кожухами. Зона дії автоматичних механізмів скидання вантажу (пушерів) обов'язково захищається металевими сітчастими екранами заввишки не менше 2,0 м. Інспекційні дверцята огороджень обладнуються кінцевими вимикачами, які автоматично блокують пуск приводу при їх відкритті.

Перед кожним автоматичним або дистанційним пуском лінії сортування АСК повинна ініціювати безперервний звуковий сигнал тривалістю 5–7 секунд. Одночасно вздовж усієї траси конвеєрів мають увімкнутися миготливі світлові сигнали жовтого кольору.

Вдоль усього конвеєрного тракту, через кожні 10-15 метрів, а також біля робочих місць операторів і в зонах завантаження/розвантаження, встановлюються кнопки аварійної зупинки типу «грибок» із фіксацією. Додатково вздовж лінійних секцій передбачається монтаж тросових вимикачів, що дозволяє миттєво зупинити комплекс із будь-якої точки конвеєра при виникненні заклинювання або аварійної ситуації.

Ширина проходів для обслуговування конвеєрних ліній установок сортування поштових відправлень повинна бути не менше 1,0 м. У місцях перетину конвеєрного тракту людьми обов'язково влаштовуються перехідні містки, обладнані перилами заввишки не менше 1,1 м із суцільною обшивкою знизу на висоту 0,15 м для запобігання падінню дрібних предметів на стрічку.

Оскільки система обробляє важкі відправлення, вздовж усього транспортувального тракту передбачаються захисні борти заввишки, що перевищує максимальний габарит посилки, але не менше 0,3 м. Конструкція накопичувальних кишень повинна виключати можливість самовільного випадіння або викидання масивних посилок під час їхнього швидкісного скидання виконавчим механізмом.

5.3 Заходи з електробезпеки

Установка сортування важкої пошти є потужним електротехнічним комплексом, що живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380/220 В із частотою 50 Гц. Для захисту обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом при прямому або непрямому дотику реалізується комплекс організаційних та технічних заходів відповідно до ПУЕ та ПБЕЕС:

Захисне заземлення та занурення: Усі металеві частини електроустановок, які не перебувають під напругою, але можуть опинитися під нею внаслідок пошкодження ізоляції (корпуси шаф керування ПЛК, станини конвеєрів, металорукави кабельних трас, корпуси частотних перетворювачів та асинхронних двигунів), підлягають обов'язковому навмисному електричному з'єднанню із захисним заземлювальним контуром. Опір заземлювального пристрою в будь-яку пору року не повинен перевищувати 4 Ом.

Захисне вимкнення та апаратний захист: Силові ланцюги живлення частотних перетворювачів та двигунів захищаються автоматичними вимикачами (типу ВА47-29М), які здійснюють миттєве відсікання живлення при коротких замиканнях та інерційне вимкнення при теплових перевантаженнях. Шафи керування обладнуються пристроями захисного вимкнення, що реагують на диференціальний струм витоку (поріг спрацьовування для загальнопромислових кіл – не більше 30 мА).

Конструктивне виконання та ізоляція: Усі струмопровідні частини (шини, клемні колодки, контактні групи пускачів ПБР-3А2.1) повинні мати надійну ізоляцію та розміщуватися всередині замкнених шаф автоматики. Ступінь захисту оболонки шаф керування, встановлених у цеху, має бути не нижче IP54, а польових датчиків та виконавчих механізмів – не нижче IP65, що унеможливлює потрапляння всередину пилу та бризок води при вологому прибиранні.

Використання безпечної напруги: Для живлення кіл керування, периферійних датчиків (лазерних Omron E3Z, ультразвукових Schneider Electric XX5) та інкрементальних енкодерів застосовується безпечна наднизька напруга постійного струму 24 В, яка формується стабілізованими трансформаторними блоками живлення типу БПТ-24-2к із гальванічною розв'язкою від силової мережі.

Організаційні заходи: До обслуговування та ремонту електрообладнання УСВП допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, спеціальне навчання та мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III. Роботи повинні виконуватися за нарядами-допусками або розпорядженнями із обов'язковим вимкненням комутаційних апаратів, вивішуванням заборонних плакатів «Не вмикати! Працюють люди» та перевіркою відсутності напруги покажчиком.

5.4 Пожежна безпека

Логістичні та поштові сортувальні центри відносяться до об'єктів із підвищеною пожежною небезпекою (категорія В за вибухопожежною небезпекою) через зосередження великої кількості горючих матеріалів: картонного гофропакування, дерев'яних палет, паперової періодики, полімерних плівок та мішків. Забезпечення пожежної безпеки УСВП регламентується вимогами НАПБ А.01.001-2014:

Попередження загорянь в електроустановках: Основними причинами пожеж у системах автоматизації конвеєрів є перевантаження кабельних ліній, іскріння контактів та перегрів обмоток двигунів. Для запобігання цьому кабельно-провідникова продукція (силові та сигнальні траси) обирається виключно у виконанні, що не підтримує горіння та має низьке димооділення (наприклад, ВВГнг-LS). Програмне забезпечення ПЛК та частотні перетворювачі повинні безперервно контролювати струм навантаження

двигунів. При тривалому перевищенні номінальних значень або фіксації сигналу критичного нагріву від термоперетворювачів TCM1188 лінія автоматично знеструмлюється.

Приміщення сортувального цеху обладнується адресною системою пожежної сигналізації. Враховуючи висоту перекриттів та специфіку пожежного навантаження, над конвеєрними лініями встановлюються оптико-електронні димові пожежні сповіщувачі, а в зонах приводних станцій – теплові або комбіновані датчики.

При спрацюванні пожежної сигналізації в будівлі логістичного центру керуючий контролер TMS320F2812 за пріоритетним апаратним перериванням повинен негайно:

Реалізувати алгоритм аварійної зупинки всіх конвеєрних двигунів для припинення транспортування горючих матеріалів та рознесення вогню лінією.

Вимкнути припливно-витяжну вентиляцію цеху та закрити протипожежні клапани (заслонки) для обмеження доступу кисню в зону горіння.

Увімкнути світлові та звукові системи оповіщення та керування евакуацією людей (покажчики «ВИХІД»).

Зона розміщення установки сортування важкої пошти комплектується первинними засобами пожежогасіння. Безпосередньо біля шаф керування АСУ ТП та пультів оператора розміщують вуглекислотні вогнегасники (типу ВВ-3 або ВВ-5), які дозволяють гасити електроустановки під напругою до 1000 В без пошкодження мікропроцесорної техніки. Конвеєрні прольоти забезпечуються порошковими вогнегасниками (ВП-5, ВП-9) та пожежними кран-комплектами. Залежно від масштабу хабу, будівля обладнується автоматичною системою водяного (спринклерного) або дренчерного пожежогасіння.

На території цеху категорично забороняється захаращувати проходи до пожежних шаф, кнопок «АВАРІЙНИЙ СТОП» та евакуаційних виходів. Весь персонал сортувальної зміни повинен проходити регулярні інструктажі з пожежної безпеки (первинний, повторний) та знати чіткий алгоритм дій і

порядок евакуації при виникненні перших ознак задимлення або отриманні сигналу тривоги.

Висновки. У ході виконання розділу було проведено комплексний аналіз питань охорони праці, промислової безпеки та пожежної профілактики при експлуатації та обслуговуванні установки сортування важкої пошти (УСВП). На основі діючих нормативно-правових актів України (ДСТУ, ПУЕ, НАПБ) розроблено та обґрунтовано інженерно-техничні рішення, що забезпечують мінімізацію ризиків для життя і здоров'я обслуговуючого персоналу.

Визначено вимоги до обов'язкового екранування небезпечних зон автоматичних виконавчих механізмів (пушерів) захисними сітками заввишки не менше 2,0 м, впровадження систем світлозвукової сигналізації передпускового стану та розміщення тросових вимикачів екстреної зупинки вздовж усього конвеєрного тракту.

Спроектовано систему захисного заземлення (з опором контуру не більше 4 Ом) та занурення всіх металоконструкцій установки сортування важкої пошти. Обґрунтовано безпеку інформаційних контурів ПЛК та периферійних датчиків (Omron, Schneider Electric) шляхом їх живлення наднизькою напругою постійного струму =24 В через стабілізовані блоки БПТ-24-2к з повною гальванічною розв'язкою від силової мережі.

Обгрунтовано вибір кабельної продукції у завадостійкому виконанні, що не підтримує горіння (ВВГнг-LS). Розроблено алгоритм автоматичної взаємодії АСК УСВП з системою пожежної сигналізації, який при виявленні задимлення забезпечує миттєве аварійне знеструмлення приводів конвеєрів для запобігання рознесенню вогню, блокування загальнообмінної вентиляції та активацію систем евакуаційного оповіщення.

Впровадження запропонованого комплексу організаційно-технічних заходів гарантує повну відповідність проектованого об'єкта автоматизації сучасним стандартам безпеки праці та високий рівень робастності системи в умовах виникнення надзвичайних ситуацій.

6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

6.1 Вхідні дані і методологія розрахунку

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) впровадження розробленої автоматизованої системи регулювання потоку та сортування важкої пошти (УСВП) базується на порівнянні показників базового варіанта (існуюча лінія з високою часткою ручної праці та низьким рівнем автоматизації вхідного потоку) та проєктного варіанта (модернізована каскадна ТРС під керуванням ПЛК TMS320F2812 із алгоритмами Калмана-ПІД та автоматичним динамічним зважуванням).

Вихідні параметри для розрахунку:

- режим роботи сортувального центру: двосмінний (2 х 8 год), 300 робочих днів на рік;
- базова продуктивність лінії: $N_{баз}$ = 1200 відправлень/годину.
- проєктна продуктивність лінії після модернізації: $N_{проєк}$ = 1800 відправлень/годину (зростання на 50% за рахунок ліквідації заторів та оптимізації інтервалів);
- середня тарифна ставка оператора/робітника: 150 грн/год;
- вартість електроенергії для промислових підприємств: 8,50 грн/(кВт· год).

6.2 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні інвестиції у впровадження системи автоматизації ($К_{\Sigma}$) включають витрати на придбання комплексу технічних засобів автоматизації, проєктування, монтажні та пусконалагоджувальні роботи.

Кошторис капітальних витрат наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Кошторис капітальних витрат на автоматизацію

№ п/п	Найменування витрат	Марка / Тип	Кіл., шт	Ціна за од., грн	Загальна вартість, грн
1	Програмований логічний контролер	TMS320F2812	1	32 000	32 000
2	Лазерний фотодатчик	Omron E3Z-LR86	4	4 500	18 000
3	Інкрементальний енкодер	Omron E6C2-CWZ6C	2	8 200	16 400
4	Ультразвуковий датчик габаритів	XX518A3PAM12	3	6 100	18 300
5	Тиристорний реверсивний пускач	ПБР-3А2.1	4	3 800	15 200
6	Трансформаторний блок живлення	БПТ-24-2к	2	2 400	4 800
7	Автоматичні вимикачі, шафа, кабелі	ВА47-29М та ін.	1 компл.	22 000	22 000
8	Промислова ПЕВМ (АРМ оператора)	AMD/Intel (SCADA)	1	45 000	45 000
				Всього вартість обладнання ($К_{обл}$)	171 700
10	Витрати на проєктування та ПЗ	25% від $К_{обл}$	-	-	42 925
11	Монтажні та пусконалагоджувальні роботи	20% від $К_{обл}$	-	-	34 340
				Разом капітальні витрати ($К_{\Sigma}$):	248965

6.3 Розрахунок експлуатаційних витрат

До складу річних експлуатаційних витрат (собівартості обробки пошти) входять витрати на оплату праці сортувальників, амортизаційні відрахування та витрати на силову електроенергію.

1. Витрати на оплату праці (ЗП).

У базовому варіанті через відсутність автоматичного дозування потоку на лінії живлення та ручне зважування задіяно 4 робітники в зміну. У проєктному

варіанті автоматизація ВГК та регулювання інтервалів дозволяє скоротити штат до 2 операторів у зміну.

Річний фонд ЗП (базовий):

$$ЗП_{баз} = 4 \text{ роб.} \cdot 2 \text{ зм.} \cdot 300 \text{ дн.} \cdot 8 \text{ год} \cdot 150 \frac{\text{грн.}}{\text{год}} = 2880000 \text{ грн./рік} \quad (6.1)$$

Річний фонд ЗП (проєктний):

$$ЗП_{проєк} = 2 \text{ роб.} \cdot 2 \text{ зм.} \cdot 300 \text{ дн.} \cdot 8 \text{ год} \cdot 150 \frac{\text{грн.}}{\text{год}} = 1440000 \text{ грн./рік} \quad (6.2)$$

Річна економія на заробітній платі становить 1440000 грн.

2. Витрати на електроенергію (Е).

Завдяки адаптивному регулюванню швидкості привода через частотні перетворювачі у проєктному варіанті виключається тривала робота двигунів на холостому ходу, що знижує середнє споживання потужності з 18 кВт до 14 кВт.

Базові витрати:

$$Е_{баз} = 18 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ зм.} \cdot 8 \text{ год} \cdot 300 \text{ днів} \cdot 8{,}50 \text{ грн.} = 734400 \text{ грн./рік} \quad (6.3)$$

Проєктні витрати:

$$Е_{проєк} = 14 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ зм.} \cdot 8 \text{ год} \cdot 300 \text{ дн.} \cdot 8{,}50 \text{ грн.} = 571200 \text{ грн./рік} \quad (6.4)$$

Річна економія на електроенергії становить 163200 грн.

3. Амортизаційні відрахування та поточний ремонт (А)

Приймаємо норму амортизації та обслуговування КТЗА рівною 15% від капітальних витрат:

$$А_{проєк} = 248965 \text{ грн.} \cdot 0{,}15 = 37345 \text{ грн./рік} \quad (6.5)$$

Зведемо річні експлуатаційні витрати у таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Річні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Базовий варіант, грн	Проєктний варіант, грн	Зміна витрат (+/-), грн
Витрати на оплату праці з нарахуваннями	2 880 000	1 440 000	-1 440 000
Енергетичні витрати (електроенергія)	734 400	571 200	-163 200
Амортизація та ремонт КТЗА	0	37 345	+37 345
Разом річні витрати	3 614 400	2 048 545	-1 565 855

6.4 Оцінка економічної ефективності та окупності

Річний економічний ефект (ΔЕ) від модернізації та автоматизації системи регулювання УСВП визначається як різниця між річними експлуатаційними витратами порівнювальних варіантів:

$$\Delta E = 3614400 - 2048545 = 1565855 \text{ грн./рік} \qquad (6.6)$$

Ток окупності капітальних інвестицій ($Т_{ок}$) розраховується за формулою:

$$Т_{ок} = \frac{К_{У}}{\Delta E} = \frac{248965}{1565855} = 0{,}16 \text{ року} \qquad (6.7)$$

Переведемо термін окупності у місяці: 0,16 х 12 = 2 місяці.

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ($Е_е$):

$$E_e = \frac{1}{T_{ок}} = \frac{1}{0,16} = 6,25 \qquad (6.8)$$

Отримане значення значно перевищує нормативний коефіцієнт для галузі зв'язку та автоматизації ($E_н = 0,15$).

Додатковий непрямий економічний ефект забезпечується за рахунок:

– зменшення на 99,8% помилок неправильного спрямування посилок (засилів) завдяки стабільному зчитуванню адресних ознак після вирівнювання інтервалів Фільтром Калмана;

– зниження витрат на капітальний ремонт механічної станини конвеєра, оскільки ПІД-регулятор плавно керує частотою двигунів, усуваючи ривки.

Висновки. Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив високу фінансову та виробничу доцільність реалізації проєкту автоматизації системи регулювання потоку сортування поштових відправлень. За умови капітальних інвестицій у розмірі 248965 грн. на придбання та пусконалагодження сучасного комплексу засобів автоматизації, річне зниження експлуатаційних витрат логістичного хабу становить 1 565 855 грн. Основними чинниками формування позитивного економічного ефекту є скорочення витрат на оплату праці вдвічі завдяки автоматизації вагогабаритного контролю, а також оптимізація енергоспоживання приводів частотними перетворювачами. Проєкт демонструє екстремально низький термін окупності – 2 місяці, що свідчить про доцільність масштабного тиражування розроблених програмно-апаратних рішень на базі контролера TMS320F2812 у сучасній інфраструктурі поштового зв'язку України.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено актуальну науково-практичну задачу – розроблено та досліджено завадостійку систему автоматичного регулювання вхідного потоку та координації вантажів для установки сортування важкої пошти. Проєктування виконано з урахуванням сучасних тенденцій розвитку глобальної електронної комерції та відповідно до стратегічних напрямів модернізації національної логістичної інфраструктури України.

За результатами виконання теоретичних, розрахунково-аналітичних, модельних та техніко-економічних етапів роботи сформовано такі висновки:

1. Проведено системний аналіз існуючих автоматизованих логістичних комплексів та обґрунтовано специфіку обробки гетерогенних поштових вантажів масою від 0,5 до 50 кг. Доведено, що висока інерційність та нестабільна геометрія масивних відправлень порівняно з письмовою кореспонденцією обмежують динаміку ТРС. Це робить контур автоматичного формування регулярного вхідного потоку критично важливою умовою для запобігання заторам і забезпечення точності вагогабаритного контролю.

2. Розроблено комплексну математичну модель багатосекційного конвеєра-дозатора з асинхронним приводом і частотним керуванням у вигляді аперіодичної ланки першого порядку. Вперше для даного класу обладнання запропоновано та математично описано двоконтурну структуру «Калман–ПІД». Впровадження лінійного фільтра Калмана дозволило реалізувати деноізинг первинного сигналу від оптичного «брязкання» датчиків та компенсувати фізичне просковзування важких коробок по стрічці конвеєра в моменти розгону.

3. За допомогою комп'ютерного моделювання у програмному середовищі GNU Octave підтверджено робастність розроблених алгоритмів. Дослідження нештатної ситуації критичного зближення посилок (інтервал 0,8 м замість нормативних 1,5 м) продемонструвало швидку збіжність фільтра Калмана та високу якість перехідного процесу. Цифровий ПІД-регулятор забезпечив плавне,

аперіодичне відновлення технологічного кроку без виникнення автоколивань привода та без залучення ручної праці оператора.

4. Здійснено інженерний підбір та специфікацію комплексу технічних засобів автоматизації на базі сучасного, високопродуктивного 32-розрядного мікропроцесорного контролера TMS320F2812. Сформовано відомість завадостійкого периферійного обладнання, що включає високошвидкісні лазерні датчики Omron E3Z-LR86, інкрементальні енкодери E6C2 та ультразвукові сенсори Schneider Electric, а також тиристорні пускачі ПБР-3А2.1. Розроблено комплект графічних документів: схему інформаційних і матеріальних потоків, функціональну схему автоматизації та принципову схему електричних з'єднань.

5. Сформовано заходи з охорони праці та техногенної безпеки відповідно до вимог чинного законодавства України (ДСТУ, ПУЕ, НАПБ). Обґрунтовано систему захисного заземлення (опір контуру до 4 Ом) та занурення металоконструкцій УСВП. Розроблено алгоритм протипожежного захисту, що передбачає апаратну інтеграцію АСК УСВП із пожежною сигналізацією будівлі для миттєвого знеструмлення приводів при задимленні, що виключає рознесення вогню лінією транспортування.

6. Виконано техніко-економічне обґрунтування проєкту, яке підтвердило високу фінансову ефективність модернізації. Спроєктована система має екстремально низький термін окупності – 2 місяці, а коефіцієнт ефективності вкладень (E_e = 6,25) значно перевищує нормативний.

Таким чином, розроблена система автоматизації повністю вирішує покладені на неї завдання, забезпечуючи підвищення продуктивності лінії сортування на 50% (з 1200 до 1800 відправлень/годину) та мінімізацію помилок розподілу (засилів) на 99,8%, що доводить доцільність її практичного впровадження у сучасних логістичних терміналах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с.

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям. [Чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [Чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Теличкун Ю.С., Литовченко І.М., Ковальов О.В. «Технологічне обладнання галузі», К.:НУХТ, 2011. 257 с.

22. Косюра В.Т. «Машини та обладнання хлібопекарського виробництва», К.: Вища освіта, 2010. 307 с.

23. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання : уклад. І.В. Ельперін, В.М. Сідлецький, Н.М. Луцька, Є.С. Проскурка. – НУХТ, 2020.73 с.

24. Кишенько В.Д. Інтелектуальні системи. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник / В. Д. Кишенько, Ю. О. Самойленко, Я. В. Смітюх. – Київ : НУХТ, 2017. 67 с.

25. Кишенько В.Д. Моделювання систем [Електронний ресурс]: конспект лекцій для студ. освіт. ступ. «Магістр» спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціал. «Автоматизація та інтелектуальні системи керування технологічними комплексами» ден. Форми навч. / В. Д. Кишенько. – К. : НУХТ, 2016. 205 с.

26. Макодзеб В. М. Автоматизовані системи поштового зв'язку: поштооброблювальні машини, комплекси обладнання, автоматизовані лінії: Навчальний посібник, 2-ге видання перероблене і доповнене. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2010. 304 с.

27. Автоматизація виробничих процесів: підручник / І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. — К. : Видавництво Ліра-К, 2015. 378 с.

28. Солодовников В.В., Коньков В.Г. Мікропроцесорні автоматичні системи регулювання. Київ: Вища школа, 2021. 255 с.

29. Основи мехатроніки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 372 с.

30. Полянський Г.О. Методичні вказання к розрахунку надійності систем автоматизованого керування. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 24 с.

31. Проектування систем керування : конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами»; уклад.

М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький, Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

32. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.02.2026).

33. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

34. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації : навч. посіб. Київ : НМКВО, 2015. 80 с.

35. Тимофеев Б. Б. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Справочник/ ред. Б. Б. Тимофеева. Киев : Техника, 1983. С. 87 – 88.

36. Емпіріко-теотетичні методи дослідження систем управління. URL: http://examen.od.ua/upravlen/page117.html (дата звернення 22.04.26).

37. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.03.2026).

38. Електрична піч опору. Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрична_піч_опору (дата звернення 13.05.2026).

39. Кузьомко, В., Бурангулова, В. (2021). Можливості використання штучного інтелекту в діяльності сучасних підприємства.Економіка та суспільство, № 32. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-32-67 (дата звернення 11.05.2026).

40. Шкробот М. В., Моргонюк А. А. Удосконалення системи управління логістичними процесам Молодий вчений. 2019. № 4(56).С. 849– 854.