

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Конвеєрна лінія для системи автоматизованого сортування»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-21

Ширяєв Назар Вікторович _____

Керівник:

доцент, к.т.н. Галаган Роман Михайлович _____

Рецензент:

доцент, к.т.н. Вислоух Сергій Петрович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП.ПМ2114.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП.ПМ2114.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	83	
3	A1	ДП.ПМ2114.01.002 СхС	Схема структурна	1	
4	A1	ДП.ПМ2114.01.003 СхЕЗ	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ДП.ПМ2114.01.004 СхА	Алгоритм роботи системи	1	
6	A1	ДП.ПМ2114.01.005 СК	Складальний кресленник	1	
7	A4	ДП.ПМ2114.01.006 ПЕЗ	Перелік елементів	1	

				ДП.ПМ2114.1760.01.001		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Ширяєв Н. В.				1	1
Керівн.	Галаган Р. М.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю. В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-21	

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Конвеєрна лінія для системи
автоматизованого сортування»**

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Ширяєв Назар Вікторович

1. Тема проєкту «Конвеєрна лінія для системи автоматизованого сортування», керівник проєкту Галаган Роман Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри АНСК, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2026 _____

3. Вихідні дані до проєкту Розмір стрічки: в ширину 200 міліметрів, в довжину не більше 1000 міліметрів; вага повинна бути менше 5 кілограм; повинен використовувати ESP32-C3 Super Mini як головний мікроконтролер; повинен мати зручний інтерфейс для керування. _____

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Основна частина: аналітичний огляд, структурна схема та вибір компонентів, розробка електричної схеми, розробка алгоритмічного та програмного забезпечення. Висновки. Список використаних джерел. Додатки. _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): _____

6. Дата видачі завдання 06.04.2026 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Отримання завдання на виконання дипломного проєкту	06.04.2026-12.04.2026	
2	Огляд існуючих рішень	13.04.2026-19.04.2026	
3	Розробка структурної схеми та вибір компонентної бази для її реалізації	20.04.2026-26.04.2026	
4	Розробка електричної схеми	27.04.2026-30.04.2026	
5	Розробка алгоритму роботи системи	01.05.2026-08.05.2026	
6	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	09.05.2026-17.05.2026	
7	Перевірка та нормоконтроль документації дипломного проєкту	18.05.2026-25.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	26.05.2026-06.06.2026	

Студент

Назар ШИРЯЄВ

Керівник

Роман ГАЛАГАН

Анотація

Дипломний проєкт присвячено проєктуванню та практичній реалізації діючого прототипу конвеєрної лінії для системи автоматизованого сортування. Актуальність роботи зумовлена гострою потребою сучасних логістичних та промислових підприємств у високоефективних, гнучких транспортних системах безперервної дії, здатних забезпечити швидке переміщення та прецизійне сортування вантажів. У межах проєкту сформовано технічні вимоги та розроблено структурну й електричну принципову схеми системи управління на базі мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini. Апаратна архітектура об'єднує обчислювальне ядро з модулями користувацького інтерфейсу (OLED-дисплей, інкрементальний енкодер) та силовим контуром керування кроковим двигуном через спеціалізований драйвер. Механічну частину прототипу реалізовано на основі екструдованого алюмінієвого профілю з використанням кастомних деталей, надрукованих на 3D-принтері з інженерного пластику PETG, що забезпечило високу жорсткість та точність конструкції. Також розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, яке реалізує логіку обробки користувацького меню через апаратні переривання та прецизійну генерацію керуючих сигналів для двигуна. Практичне значення проєкту полягає у створенні надійного, компактного та енергоефективного інструменту для транспортування поштучних вантажів, який має високий рівень гнучкості.

Ключові слова: конвеєрна лінія, автоматизоване сортування, мікроконтролер ESP32, кроковий двигун, драйвер двигуна, 3D-друк, електрична принципова схема, алгоритм керування.

Anotation

The diploma project is focused on the design and practical implementation of a working prototype of a conveyor line for an automated sorting system. The relevance of the work is driven by the acute need of modern logistics and industrial enterprises for highly efficient, flexible continuous transport systems capable of ensuring rapid movement and precise sorting of goods. Within the scope of the project, technical requirements were formulated, and structural and electrical schematic diagrams of the control system were developed based on the ESP32-C3 Super Mini microcontroller. The hardware architecture integrates the computational core with user interface modules (OLED display, incremental encoder) and a power control circuit for a stepper motor via a specialized driver. The mechanical part of the prototype was implemented using an extruded aluminum profile and custom parts 3D-printed from PETG engineering plastic, ensuring high rigidity and precision of the structure. Algorithmic and software support was also developed, implementing the logic of user menu processing through hardware interrupts and precise generation of control signals for the motor. The practical significance of the project lies in the creation of a reliable, compact, and energy-efficient tool for transporting piece goods, which has a high level of flexibility.

Keywords: conveyor line, automated sorting, ESP32 microcontroller, stepper motor, motor driver, 3D printing, electrical schematic diagram, control algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1 Класифікація, конструктивні особливості та порівняльний аналіз сучасних видів конвеєрних систем	8
1.1.2 Роликові конвеєри (рольганги) привідного та гравітаційного типів	9
1.1.3 Пластинчасті, скребкові та гвинтові (шнекові) транспортери: експлуатаційні межі застосування.....	11
1.1.4 Спеціалізовані кінематичні архітектури конвеєрів для систем високошвидкісного автоматизованого сортування	11
1.2 Обґрунтування та аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів конвеєрних стрічок.....	12
1.2.1 Гумовотканинні та гумовотросові стрічки підвищеної зносостійкості для промислових навантажень.....	13
1.2.2 Полівінілхлоридні (ПВХ) транспортні стрічки: хімічна стійкість та технологічні параметри	13
1.2.3 Поліуретанові (ПУ) стрічки: прецизійна гнучкість, зносостійкість та експлуатаційні характеристики у системах автоматизації	14
1.2.4 Модульні пластикові та силіконові полотна: особливості використання в специфічних технологічних процесах	15
1.3 Дослідження методів стикування, зварювання та механічного з'єднання транспортних стрічок.....	15
1.3.1 Метод гарячої вулканізації: фізико-хімічна суть процесу, етапи реалізації та міцнісні характеристики стику.....	16
1.3.2 Метод холодної вулканізації за допомогою спеціалізованих двокомпонентних клейових складів.....	17
1.3.3 Технології термічного зварювання (зрощування) полімерних стрічок (ПВХ та ПУ) за допомогою гарячого повітря або струмів високої частоти.....	18
1.3.4 Механічні методи нероз'ємного та роз'ємного стикування (замкові, шарнірні, скобові та болтові з'єднання)	19
1.4 Математичний апарат та нормативно-методичні основи інженерного розрахунку конвеєрних ліній	20
1.4.1 Методика розрахунку технічної продуктивності конвеєра та погонного навантаження транспортного полотна.....	20
1.4.2 Розрахунок тягових та погонних сил опору руху стрічки за методом послідовного контурного обходу по точках.....	21

1.4.3 Математичне визначення параметрів натягу стрічки та перевірка умови відсутності просковзування на привідному валу (застосування рівняння Ейлера)	22
1.4.4 Розрахунок кінематичних параметрів приводу та визначення необхідної номінальної потужності електродвигуна.....	23
Висновки до розділу.....	25
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГОТОВИХ КОМПОНЕНТІВ	27
2.1 Структурна схема	27
2.2 Формування вимог до компонентів системи.....	30
2.2.1 Вимоги до мікроконтролера.....	31
2.2.2 Вимоги до елементів управління.....	32
2.2.3 Вимоги до дисплейного модуля	33
2.2.4 Вимоги до виконавчого модулю.....	34
2.2.5 Вимоги до драйвера двигуна.....	35
2.3 Підбір компонентів згідно вимог.....	36
2.3.1 Вибір мікроконтролера	37
2.3.2 Вибір елементів управління	39
2.3.3 Вибір дисплейного модуля.....	40
2.3.4 Вибір виконавчого модулю	42
2.3.5 Вибір драйвера двигуна	44
2.3.6 Вибір компонентів живлення.....	47
Висновки до розділу.....	48
3 РОЗРОБКА СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ	50
3.1 Підключення драйвера двигуна	51
3.1.1 Підключення драйвера до мікроконтролера	51
3.1.2 Підключення драйвера до крокового двигуна та підсистеми живлення....	52
3.2 Підключення та інтеграція модуля енкодера	53
3.3 Підключення та інтеграція дисплейного модуля.....	54
3.3.1 Підключення за інтерфейсом 4-wire SPI.....	55
3.3.2 Підключення за інтерфейсом I2C	56
3.4 Електрична принципова схема системи.....	57

Висновки до розділу.....	59
4 КОНСТРУЮВАННЯ ТА ЗБИРАННЯ ПРОТОТИПУ КОНВЕЄРНОЇ ЛІНІЇ .	60
4.1 Обґрунтування вибору конструкційної основи рами конвеєра на базі алюмінієвого верстатного профілю.....	60
4.2 Комп'ютерне тривимірне (3D) моделювання вузлів та деталей конвеєра в CAD-системах.....	62
4.3 Обґрунтування застосування адитивних технологій (3D-друку) для виготовлення кастомних елементів.....	65
4.4 Порівняльний аналіз та вибір конструкційного пластику для друкування деталей.....	66
4.4.1 Полілактид (PLA).....	67
4.4.2 Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS).....	67
4.4.3 Поліетилентерефталатгліколь (PETG).....	67
4.5 Кінцева 3D-модель та фізична збірка прототипу.....	68
Висновки до розділу.....	70
5 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА	72
5.1 Узагальнений алгоритм роботи системи	72
5.2 Алгоритм попереднього налагодження системи	73
5.3 Алгоритм обробки користувацького інтерфейсу (меню).....	75
5.4 Алгоритм генерації керуючих сигналів для двигуна	77
Висновки до розділу.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ.....	3

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсифікації промислового виробництва, масштабної модернізації складського господарства та стрімкого розвитку внутрішньозаводської логістики однією з ключових інженерно-технічних проблем є створення високоефективних, гнучких та надійних транспортних систем безперервної дії. Стабільне, швидке та безперебійне переміщення вантажів, сировини чи готової продукції є базовою основою, яка безпосередньо визначає загальну пропускну здатність будь-якого сучасного промислового чи логістичного підприємства. Головною технологічною артерією, що забезпечує глибоку автоматизацію цих процесів, оптимізацію складних логістичних потоків та суттєве зниження собівартості обробки матеріальних об'єктів, виступає промислова конвеєрна лінія.

Традиційні підходи до організації транспортування або використання дискретних засобів переміщення вантажів часто створюють критичні затримки у виробничих ланцюжках, обмежуючи динаміку розвитку підприємства. Крім того, класичні конвеєрні системи, які не мають гнучких механізмів регулювання та інтелектуального цифрового керування, характеризуються низькою адаптивністю до зміни темпів роботи, підвищеним рівнем енергоспоживання та прискореним зносом рухомих механічних частин. Це зумовлює гостру потребу у розробці, інженерному розрахунку та впровадженні модернізованих конвеєрних ліній нового покоління, які здатні ефективно функціонувати в режимах значних динамічних навантажень, забезпечувати прецизійне регулювання швидкості та виступати надійною базою для інтеграції суміжних технологічних вузлів, зокрема систем автоматизованого сортування.

Завдяки стрімкому розвитку мікропроцесорної техніки, адитивних технологій та датчикової апаратури з'явилась можливість створення інтелектуальних конвеєрних ліній, де параметри руху, позиціонування об'єктів та стан полотна безперервно контролюються в режимі реального часу. Цифрова трансформація галузі в рамках концепції Індустрії 4.0 дозволяє впроваджувати автоматизовані системи діагностики на базі технологій Інтернету речей та комп'ютерного зору, що стає новим стандартом

предиктивного обслуговування промислового транспорту. Розробка, конструювання та виготовлення малогабаритного діючого прототипу такої системи дозволяє інженерно обґрунтувати та відпрацювати складні алгоритми мікропроцесорного управління рухом вантажів перед їх масштабним промисловим впровадженням.

Метою дипломного проєкту є технічне проєктування, обґрунтування конструктивних параметрів та практична реалізація діючого прототипу ефективної конвеєрної лінії для системи автоматизованого сортування на базі сучасного мікропроцесорного керування та адитивних технологій виготовлення деталей.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

Перший розділ дипломного проєкту присвячений глибокому теоретичному огляду, комплексному аналізу спеціалізованої науково-технічної літератури та вивченню сучасного стану розвитку систем безперервного транспорту. Ця частина роботи формує фундаментальну базу для подальшого інженерного проєктування та практичної реалізації діючого прототипу.

1.1 Класифікація, конструктивні особливості та порівняльний аналіз сучасних видів конвеєрних систем

Сучасні конвеєрні системи є фундаментальним елементом внутрішньозаводської логістики (інтралогістики) та автоматизованих складських комплексів. Залежно від фізико-механічних властивостей вантажу, необхідної продуктивності, просторової геометрії траси та вимог до енергоефективності, у промисловості застосовуються різні типу транспортуючих машин. Загальноприйнята інженерна класифікація передбачає поділ конвеєрів за типом тягового та вантажонесучого органів, а також за характером передачі рушійного зусилля [7, 17]. Стрічкові конвеєрні системи: загальна архітектура, сфера застосування та аналіз переваг і недоліків

Стрічкові конвеєри є найпоширенішим та найбільш універсальним типом машин безперервного транспорту. Їхня кінематична архітектура базується на використанні гнучкої замкненої нескінченної стрічки, яка одночасно виконує функції як вантажонесучого, так і тягового органу. Рух стрічки забезпечується за рахунок фрикційної передачі тягового зусилля — сил тертя, що виникають між внутрішньою поверхнею полотна та привідним барабаном. Необхідний для створення тертя початковий натяг підтримується спеціальною натяжною станцією (гвинтовою, вантажною або пневматичною). По всій довжині транспортної траси робоча гілка стрічки спирається на ролюпоори (для важких вантажів) або на суцільний металевий чи полімерний настил — слайдер (для легких поштучних об'єктів) [7,17,15].

Переваги: Здатність транспортувати як штучні вантажі різної форми, так і сипучі матеріали ; висока швидкість руху (до 5–8 м/с у сучасних сортувальних хабах) ; плавність та безшумність ходу, що мінімізує пошкодження крихких об'єктів ; можливість створення складних просторових трас великої протяжності ; високий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з іншими типами [7, 17, 15].

Недоліки: Обмеження максимального кута нахилу траси (зазвичай до 18–22° для гладких стрічок, після чого вантаж починає ковзати вниз) ; висока чутливість полімерної або гумової стрічки до механічних пошкоджень (порізів, проколів) та абразивного зносу ; необхідність періодичного обслуговування для контролю натягу та запобігання боковому сходженню (перекосу) полотна [7, 15].

Приклад схеми стрічкового конвеєра показано на рис. 1.1.

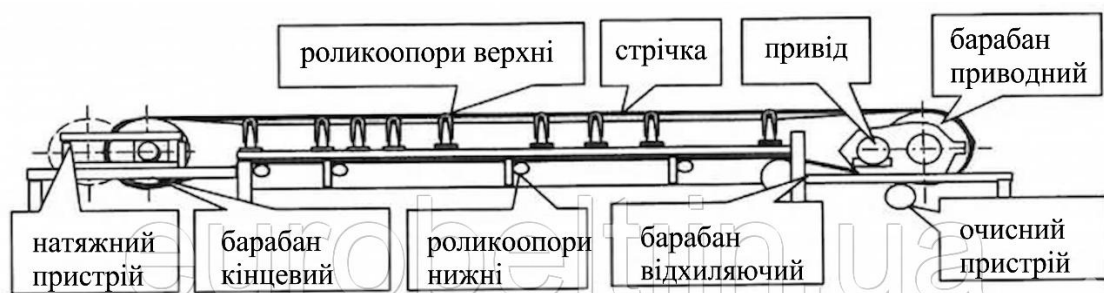


Рисунок 1.1 Загальна схема та основні конструктивні вузли стрічкового конвеєра

1.1.2 Роликові конвеєри (рольганги) привідного та гравітаційного типів

Роликові конвеєри (рольганги) призначені виключно для переміщення поштучних вантажів із плоскою та жорсткою основою, таких як палети, пластикові контейнери або картонні коробки. Вантажонесучим органом у таких системах виступає лінійна послідовність циліндричних роликів, осі яких паралельно закріплені на нерухомій жорсткій рамі. За принципом дії та способом передачі енергії вони поділяються на дві великі категорії [7, 17]:

Гравітаційні (непривідні) рольганги: Встановлюються під невеликим кутом нахилу до горизонту (зазвичай від 2° до 5°). Рух вантажу відбувається виключно під дією тангенціальної складової сили тяжіння вантажу. Вони відрізняються максимальною простотою конструкції, високою надійністю та нульовим енергоспоживанням. Проте гравітаційні рольганги не дозволяють точно контролювати швидкість руху об'єктів [7, 17].

Привідні роликові конвеєри: У цих системах ролики отримують обертальний момент від зовнішнього двигуна через ланцюгову чи пасову (зубчасту, клинову, круглу) передачу, або ж шляхом застосування сучасних мотор-роликів, де безколекторний двигун постійного струму вбудований безпосередньо всередину циліндра ролика. Привідні рольганги забезпечують суворий контроль швидкості руху, дозволяють реалізувати логіку накопичення без дотику вантажів та забезпечують точне позиціонування об'єктів перед сканерами штрих-кодів або сортувальними механізмами [7, 17].

Приклад роликового конвеєра зображено на рис 1.2.

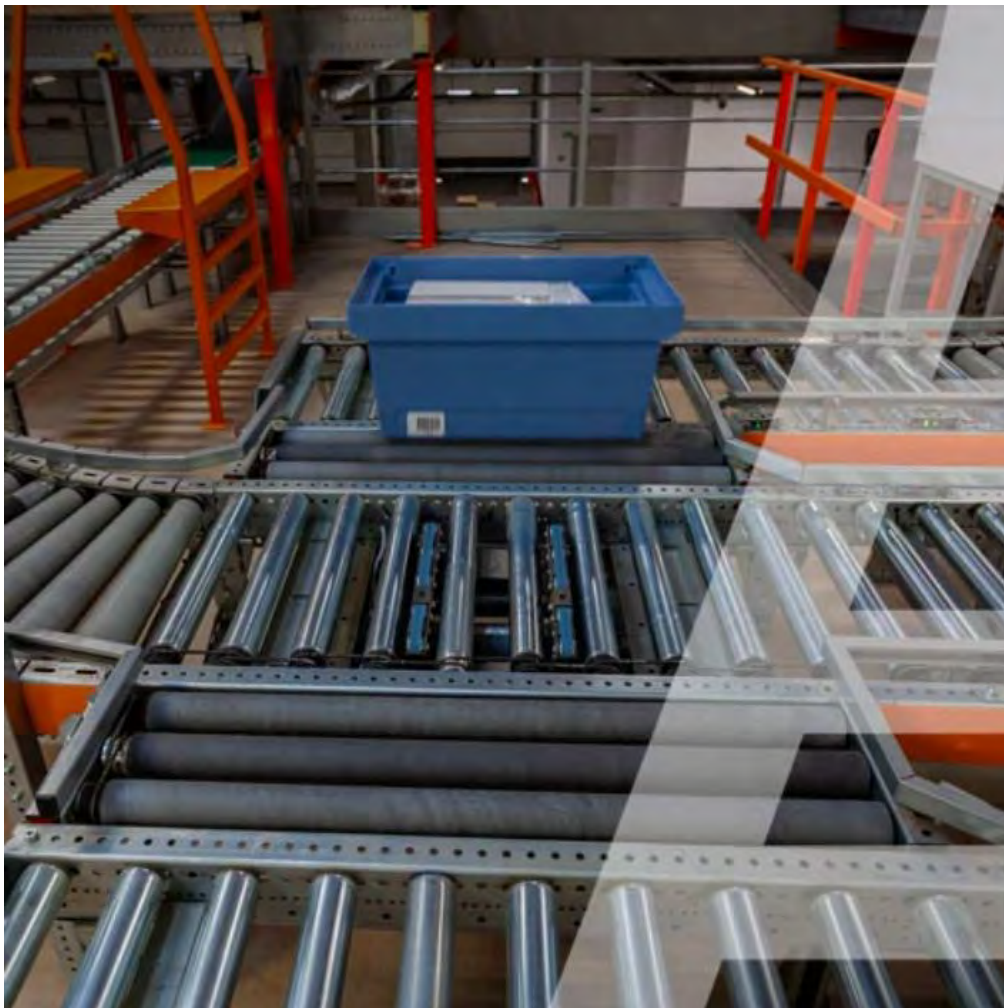


Рисунок 1.2 Конструкція приводного роликового конвеєра для штучних вантажів

1.1.3 Пластинчасті, скребкові та гвинтові (шнекові) транспортери: експлуатаційні межі застосування

Ця група конвеєрів має вузькоспеціалізоване промислове застосування (металургія, гірничодобувна, хімічна промисловість, агросектор) і практично не використовується у складській чи поштовій логістиці [7, 15]:

Пластинчасті конвеєри: Їхній вантажонесучий орган складається з жорстких металевих або полімерних пластин, що шарнірно закріплені на одному або двох тягових ланцюгах. Такі системи здатні транспортувати надважкі, великогабаритні, гострокутні абразивні або розпечені вантажі, які миттєво знищили б звичайну гумову стрічку [7].

Скребкові конвеєри: Переміщують виключно сипучі, кускові або пилоподібні вантажі шляхом їх примусового волочіння нерухомим жолобом (трубою) за допомогою рухомих металевих або пластикових скребків, прикріплених до тягового ланцюга [7].

Гвинтові (шнекові) транспортери: Робочим тяговим органом є обертовий гвинт (шnek) із суцільною або лопатевою спіраллю, розташований у закритому циліндричному корпусі. Ідеально підходять для герметичного транспортування пилоподібних хімічних матеріалів або зерна [7, 15].

Впровадження таких систем в автоматизовані сортувальні комплекси поштучних вантажів є абсолютно недоцільним через низькі швидкості руху, високу металоємність, значні енерговитрати на тертя та високий ризик пошкодження упаковки (наприклад, картонних коробок) [17].

1.1.4 Спеціалізовані кінематичні архітектури конвеєрів для систем високошвидкісного автоматизованого сортування

Для вирішення складних завдань ідентифікації, маршрутизації та фізичного розподілу інтенсивних потоків вантажів у сучасних поштових та дистрибуційних центрах застосовуються спеціалізовані архітектури, що глибоко інтегрують транспортні та виконавчі механізми [17]:

Системи передачі під прямим кутом (Right-Angle Transfer / Pop-up sorters): Ці модулі інтегруються безпосередньо у класичні стрічкові або роликові лінії. Вони

оснащені підйомними механізмами з приводними поперечними роликами, вузькими стрічками або поворотними колесами. Під час проходження ідентифікованого вантажу над таким модулем, механізм за частку секунди піднімається вище основного рівня конвеєра і різко змінює вектор руху об'єкта, скидаючи його на бічну накопичувальну лінію під кутом 90° або 45° [17, 15].

Поперечно-стрічкові сортери (Crossbelt Sorters): Являють собою складну систему у вигляді замкненого ланцюга з безлічі незалежних рухомих візків, які безперервно рухаються по головній магістралі зі швидкістю до 2-3 м/с. На кожному візку змонтовано власну мініатюрну конвеєрну стрічку з індивідуальним сервоприводом, яка орієнтована перпендикулярно до загального напрямку руху. Після досягнення візком цільового накопичувального шлюзу (chute), міні-стрічка блискавично активується, акуратно виштовхуючи посилку у відсік. Така архітектура забезпечує безпрецедентну продуктивність сортування — до кількох десятків тисяч одиниць на годину [17, 15]. Приклад сортувального конвеєра типу Crossbelt зображено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 Принцип дії високошвидкісного сортувального конвеєра типу Crossbelt

1.2 Обґрунтування та аналіз фізико-механічних властивостей матеріалів конвеєрних стрічок

Транспортна стрічка є найбільш відповідальним, капіталомістким та схильним до зносу елементом стрічкового конвеєра, який одночасно виконує функції вантажонесучого та тягового органу системи. Правильний вибір матеріалу полотна

безпосередньо визначає довговічність механічної частини, величину тягового опору, енергоефективність приводу та експлуатаційні обмеження всього сортувального комплексу. Комплексне обґрунтування матеріалу вимагає глибокого аналізу таких фізико-механічних параметрів, як границя міцності на розрив, модуль пружності, зносостійкість при абразивному терті, коефіцієнт фрикційної взаємодії з привідним валом, а також стійкість до температурних та хімічних впливів навколишнього середовища [7, 17, 6].

1.2.1 Гумовотканинні та гумовотросові стрічки підвищеної зносостійкості для промислових навантажень

Гумовотканинні та гумовотросові стрічки складають основу важкого машинобудування, гірничодобувної та металургійної промисловості, де ключовою вимогою є здатність витримувати екстремальні погонні та ударні навантаження. Структурно гумовотканинна стрічка складається з багатошарового тканинного каркаса (поліамідні нитки типу Р або комбіновані поліефір-поліамідні типу ЕР), який забезпечує поздовжню міцність, та зовнішніх захисних гумових обкладок (робочої та неробочої). Гумові обкладки захищають каркас від механічних пошкоджень, вологи та зносу [7, 6].

У випадках, коли довжина транспортування вимірюється кілометрами, а розривні зусилля сягають критичних значень, застосовують гумовотросові стрічки, де замість тканини всередину гумового масиву інтегровано сталеві троси високої міцності. Це забезпечує практично нульове відносне подовження полотна під навантаженням та мінімізує хід натяжної станції. Проте, через високу питому вагу, значну товщину, великий мінімальний радіус вигину та високу металоємність, застосування гумовотканинних і гумовотросових стрічок у системах автоматизованого поштового або легкого промислового сортування є технічно та економічно недоцільним [7, 17, 6].

1.2.2 Полівінілхлоридні (ПВХ) транспортні стрічки: хімітка стійкість та технологічні параметри

Для систем інтралогістики, складського розподілу та поштової автоматизації стандартним і найбільш раціональним інженерним рішенням є застосування стрічок

на основі синтетичних полімерів, серед яких перше місце за популярністю посідає полівінілхлорид (ПВХ). Конструктивно такі стрічки складаються з одного або кількох шарів поліефірного тканинного корду, який з обох боків покривається термопластичним ПВХ різної товщини та текстури [17, 6].

Головними перевагами ПВХ-стрічок є їхня висока хімічна стійкість до впливу мінеральних масел, жирів, більшості кислот, лугів та агресивних миючих засобів, а також низька питома вага. Технологічні параметри ПВХ дозволяють виготовляти стрічки з різноманітною структурою робочої поверхні: від абсолютно гладких (для горизонтального транспортування) до текстурованих типу «Supergrip» (для похилого переміщення посилок під кутом до 30–35° без ризику їх зворотного ковзання). Обмеженням ПВХ є помірна стійкість до низьких температур (матеріал втрачає еластичність при температурах нижче -10 °C) та середні показники стійкості до інтенсивного абразивного стирання [17, 6].

1.2.3 Поліуретанові (ПУ) стрічки: прецизійна гнучкість, зносостійкість та експлуатаційні характеристики у системах автоматизації

Поліуретанові (ПУ) транспортні стрічки є преміальним класом полімерних полотен, які розроблені спеціально для роботи в умовах високошвидкісних та прецизійних систем автоматизації. Поліуретан як конструкційний матеріал володіє унікальним комплексом фізико-механічних властивостей, що суттєво перевершують характеристики ПВХ. Вони відзначаються винятково високою механічною міцністю та зносостійкістю при тривалому абразивному навантаженні, що гарантує тривалий життєвий цикл полотна навіть при безперервному режимі роботи комплексу [17, 6].

Найважливішою експлуатаційною перевагою ПУ-стрічок є їхня прецизійна гнучкість. Матеріал здатний витримувати постійні циклічні деформації вигину без руйнування та деградації структури. Це дозволяє проектувати конвеєрні переходи з мінімальними діаметрами привідних та натяжних валів. Таке рішення є критично важливим для мікропроцесорних сортувальних ліній, оскільки дозволяє безперешкодно передавати малогабаритні поштучні вантажі з одного конвеєра на інший без ризику їх застрягання в міжконвеєрних зазорах. Додатково ПУ є абсолютно

біологічно та хімічно інертним матеріалом, сертифікованим за стандартами FDA для безпосереднього контакту з продуктами харчування [17, 6].

1.2.4 Модульні пластикові та силіконові полотна: особливості використання в специфічних технологічних процесах

У специфічних або важких умовах експлуатації, де стандартні гнучкі стрічки не забезпечують необхідної надійності, застосовуються особливі типи вантажонесучих полотен [17]:

Модульні пластикові стрічки: Конструктивно збираються у цегляному порядку з окремих литих пластикових модулів (виготовлених із поліпропілену PP, поліетилену PE або поліацеталю POM), що з'єднуються між собою поперечними сполучними штифтами (пінами). Модульні полотна мають винятково високу механічну міцність, стійкі до гострих країв вантажів, легко ремонтуються шляхом заміни окремого пошкодженого модуля та дозволяють будувати складні поворотні (радіусні) траси. Завдяки перфорованій структурі, вони ідеально підходять для процесів, де потрібне відведення рідини, сушіння або охолодження об'єктів під час руху [17, 6].

Силіконові конвеєрні стрічки: Застосовуються в технологічних процесах із високими температурами експлуатації (до +200 °C і вище), наприклад, у сушильних камерах чи тунелях термоусадки упаковок. Силікон володіє унікальними антиадгезійними (непригарними) властивостями, що повністю виключає прилипання липких, клейких або напівфабрикатних об'єктів до поверхні транспортного полотна в процесі їх автоматизованого переміщення [6].

1.3 Дослідження методів стикування, зварювання та механічного з'єднання транспортних стрічок

Транспортні стрічки постачаються заводами-виробниками у вигляді рулонів скінченної довжини, тому для їх функціонування в конвеєрній системі необхідно здійснити процес стикування (з'єднання кінців) у замкнений нескінченний контур. Надійність стикового з'єднання є критичним фактором, оскільки саме стик є найслабшим місцем конвеєрної стрічки, де найчастіше відбуваються розриви. Вибір

методу стикування залежить від матеріалу стрічки, конструкції конвеєра, діаметра привідних валів та умов експлуатації системи [7, 17].

1.3.1 Метод гарячої вулканізації: фізико-хімічна суть процесу, етапи реалізації та міцнісні характеристики стику

Гаряча вулканізація є найбільш надійним та довговічним методом стикування гумовотканинних та гумовотросових стрічок, який забезпечує міцність з'єднання на рівні 90–95 % від міцності цільного полотна. Фізико-хімічна суть процесу полягає у зшиванні молекул каучуку за допомогою сірки (або інших вулканізуючих агентів) під одночасним впливом високого тиску та температури, внаслідок чого сира гума перетворюється на міцний та еластичний матеріал, утворюючи монолітну структуру [7, 6].

Процес реалізується у кілька технологічних етапів: спочатку кінці стрічки розшаровуються у вигляді сходинок (звільняються шари тканинного каркаса). Далі ці поверхні ретельно зачищаються, обробляються спеціальними праймерами та покриваються шарами сирої невулканізованої гуми. Після цього кінці накладаються один на одного і затискаються у спеціальному портативному вулканізаційному пресі. Під дією температури близько 145–150 °C та тиску до 1.0–1.2 МПа протягом визначеного часу (залежить від товщини стрічки) відбувається монолітизація стику. Незважаючи на високу трудомісткість, значну вартість обладнання та тривалість процесу, цей метод гарантує відсутність потовщень на стику, рівномірну гнучкість та повну герметичність з'єднання [7, 17, 6]. Приклад гарячої вулканізації зображено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 Процес підготовки та стикування стрічки методом гарячої вулканізації

1.3.2 Метод холодної вулканізації за допомогою спеціалізованих двокомпонентних клейових складів

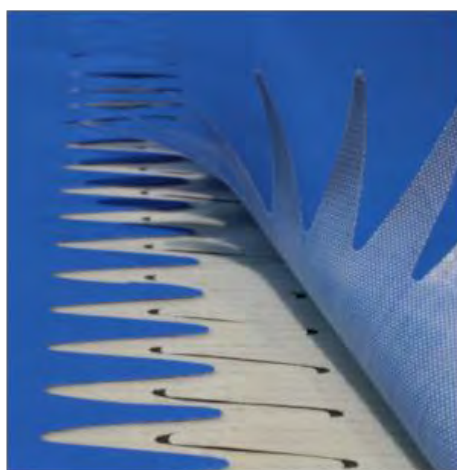
Метод холодної вулканізації базується на хімічному склеюванні шарів стрічки без застосування термічного впливу та громіздких пресів. Для цього використовуються спеціалізовані промислові двокомпонентні клеї (найчастіше на основі хлоропренових каучуків), які після змішування з затверджувачем ініціюють процес полімеризації при кімнатній температурі [17, 6].

Етап геометричної підготовки кінців стрічки (нарізання сходинок) аналогічний гарячому методу [7]. Після зачищення та знежирення на поверхні наноситься клейовий склад у кілька шарів із проміжним підсушуванням. Далі кінці з'єднуються і ретельно прикочуються ручними роликами для видалення повітря та забезпечення щільного контакту. Міцність такого з'єднання досягає 70–80 % від міцності стрічки. Головною перевагою методу є мобільність та швидкість виконання ремонту безпосередньо на конвеєрі, проте холодний стик є менш стійким до високих температур (понад +80 °C), агресивних хімічних середовищ та сильного запилення під час проведення робіт [17, 6].

1.3.3 Технології термічного зварювання (зрощування) полімерних стрічок (ПВХ та ПУ) за допомогою гарячого повітря або струмів високої частоти

Для сучасних полімерних стрічок із полівінілхлориду (ПВХ) та поліуретану (ПУ), що широко використовуються в автоматизованих системах сортування, методи гумової вулканізації не застосовуються. Натомість використовується технологія термічного зварювання (сплайсингу), що дозволяє розплавити та змішати термопластичні матеріали кінців стрічки в однорідну масу [17, 6].

Найбільш поширеним способом підготовки є метод «зубчастого стику» (Finger splice або Z-splice). Кінці стрічки вирубуються спеціальним штампом у вигляді зигзагоподібних зубців, які ідеально входять один в одного. Після суміщення зубців місце стику поміщається у термопрес, де під впливом заданої температури (близько 170–190 °C) та тиску полімер плавиться, надійно спаюючи зубці між собою. У промислових умовах також застосовується зварювання струмами високої частоти (СВЧ), коли нагрівання полімеру відбувається зсередини за рахунок електромагнітного поля. Цей метод створює ідеально гладкий стик без потовщень та втрати гнучкості, що є критично важливим для проходження стрічки по валах малого діаметра [17, 6]. Приклад зубчастого стику зображено на рис. 1.5.



Finger Overlap Splicing - DS/DEC



Narrow single finger splice - DSP

Рисунок 1.5 Метод зубчастого термічного зварювання полімерних ПВХ та ПУ стрічок

1.3.4 Механічні методи нероз'ємного та роз'ємного стикування (замкові, шарнірні, скобові та болтові з'єднання)

Механічні методи стикування передбачають використання металевих або пластикових кріпильних елементів для швидкого з'єднання кінців стрічки без застосування хімічних реагентів чи термічного обладнання. Це найшвидший спосіб монтажу, який дозволяє запустити конвеєр у роботу відразу після встановлення замків (ремонт займає від 15 до 30 хвилин) [7, 6].

За конструкцією механічні з'єднання поділяються на роз'ємні (шарнірні замки) та нероз'ємні (болтові або заклепкові пластини). Шарнірні замки складаються з двох металевих смуг із гачками (петлями), які запресовуються на кінцях стрічки [6]. При з'єднанні петлі входять одна в одну, а крізь них протягується фіксуючий металевий або нейлоновий трос (пін), що дозволяє за необхідності швидко розімкнути стрічку для обслуговування конвеєра. Попри швидкість ремонту, механічні стики мають низку недоліків: міцність з'єднання не перевищує 50–60 %, металеві деталі спричиняють підвищений знос роликів і привідних барабанів, стик не є герметичним (прокидається дрібний вантаж), а також такі з'єднання неможливо використовувати на валах дуже малого діаметра [7, 17].

Приклад механічного з'єднання зображено на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 Механічне роз'ємне з'єднання кінців конвеєрної стрічки шарнірного типу

1.4 Математичний апарат та нормативно-методичні основи інженерного розрахунку конвеєрних ліній

Проектування засобів безперервного транспорту вимагає суворого аналітичного обґрунтування їхніх кінематичних, конструктивних та силових параметрів. Інженерний розрахунок конвеєрної лінії є взаємопов'язаною системою математичних залежностей, що базуються на законах класичної механіки, теорії фрикційного зчеплення гнучких тіл та нормативних положеннях розрахунку підйомно-транспортних машин [7]. Метою даного етапу є точне визначення масових та продуктивних характеристик системи, розрахунок сил опору на всіх ділянках траси, знаходження оптимальних параметрів натягу полотна, а також вибір та розрахунок приводної потужності виконавчого електродвигуна [17].

1.4.1 Методика розрахунку технічної продуктивності конвеєра та погонного навантаження транспортного полотна

Основним вихідним параметром, що характеризує ефективність конвеєрної лінії, є її технічна продуктивність. Оскільки розроблювана система призначена для автоматизованого сортування поштучних об'єктів (коробок, пакунків), розрахунок ведеться для штучного режиму завантаження [17]. Годинна штучна продуктивність конвеєра Q (шт/год) визначається за формулою:

$$Q = \frac{3600 \cdot v}{a}, \quad (1.1)$$

де v — лінійна швидкість руху транспортної стрічки, м/с;

a — крок розташування штучних вантажів на стрічці (відстань між центрами суміжних об'єктів), м [7].

Якщо відома середня маса одного сортувального об'єкта m (кг), масова продуктивність системи Q_m (кг/год) набуває вигляду:

$$Q_m = \frac{3600 \cdot v \cdot m}{a}, \quad (1.2)$$

Для проведення подальших тягових розрахунків необхідно визначити розподілені масові сили, що діють на несучу конструкцію конвеєра. Погонне

навантаження (лінійна щільність) від вантажу q_w (Н/м) характеризує вагу об'єктів, що припадає на один метр довжини лінії, і обчислюється як:

$$q_w = \frac{m \cdot g}{a}, \quad (1.3)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння [7].

Погонне навантаження від власної маси транспортної стрічки q_B (Н/м) діє по всій довжині замкненого контуру і визначається через геометричні та фізичні параметри полотна:

$$q_B = B \cdot \delta \cdot \rho \cdot g, \quad (1.4)$$

де B — ширина конвеєрної стрічки, м;

δ — сумарна товщина стрічки (включаючи тканинний корд та полімерне покриття), м;

ρ — усереднена щільність матеріалу стрічки (для PETG/ПВХ/ПУ структур $\rho \approx 1100 \dots 1350 \text{ кг/м}^3$) [6].

1.4.2 Розрахунок тягових та погонних сил опору руху стрічки за методом послідовного контурного обходу по точках

Для визначення повного тягового зусилля, яке повинен розвивати привід, застосовується класичний метод послідовного обходу контуру за характерними точками траси [7]. Суть методу полягає в тому, що весь замкнений контур конвеєра розділяється на лінійні ділянки та вузли перегину, які нумеруються за напрямком руху стрічки, починаючи від точки її збігання з привідного вала [6]. Натяг у кожній наступній точці S_{i+1} дорівнює натягу в попередній точці S_i , збільшеному на величину сил опору руху $W_{i \rightarrow i+1}$, що виникають на даній ділянці:

$$S_{i+1} = S_i + W_{i \rightarrow i+1}. \quad (1.5)$$

Для прямолінійної горизонтальної ділянки робочої гілки (де стрічка переміщується разом із вантажем по суцільному слайдерному настилу) розподілена сила опору руху W_p (Н) обчислюється за формулою:

$$W_p = (q_w + q_B) \cdot L \cdot w \cdot \cos \beta \pm (q_w + q_B) \cdot L \cdot \sin \beta, \quad (1.6)$$

де L — довжина розрахункової ділянки конвеєра, м;

β — кут нахилу лінії до горизонту (для горизонтального транспортера $\beta = 0$);

w — коефіцієнт опору руху (при використанні слайдерного опорного ложа w відповідає коефіцієнту тертя ковзання матеріалу внутрішньої сторони стрічки по опорній поверхні пластику чи металу, зазвичай $w = 0,2 \dots 0,35$) [17]. Знак «+» приймається при русі вантажу вгору, знак «-» — при русі вниз.

Для холостої (зворотної) гілки конвеєра, де стрічка повертається без корисного вантажу, розподілена сила опору W_h (Н) має вигляд:

$$W_h = q_B \cdot L \cdot w \cdot \cos \beta \mp q_B \cdot L \cdot \sin \beta. \quad (1.7)$$

Зосереджені опори, що виникають у вузлах повороту стрічки навколо ведених (натяжних) валів та підшипникових опор W_b (Н), враховують жорсткість полотна на вигин та тертя у цапфах вала. Їх розраховують через коефіцієнт опору на барабані k_b :

$$S_{out} = S_{in} \cdot k_b, \quad (1.8)$$

де S_{in} та S_{out} — натяг стрічки відповідно на вході та на виході з поворотного вала;

k_b — коефіцієнт опору на барабані (зазвичай $k_b = 1,03 \dots 1,05$) [7].

1.4.3 Математичне визначення параметрів натягу стрічки та перевірка умови відсутності просковзування на привідному валу (застосування рівняння Ейлера)

Після вираження натягів у всіх точках контуру через початковий натяг S_1 , виконується розрахунок екстремальних значень сил натягу на привідному елементі. Найбільший натяг стрічка відчуває в точці набігання на привідний вал (S_{max}), а найменший — у точці збігання (S_{min}), що безпосередньо пов'язано з реалізацією корисного тягового зусилля P_T (Н) [7]:

$$P_T = S_{max} - S_{min}. \quad (1.9)$$

Для забезпечення стабільної передачі крутного моменту без буксування та просковзування стрічки відносно привідного вала, граничне співвідношення сил натягу повинно суворо задовольняти класичне рівняння Ейлера для фрикційних передач гнучким зв'язком [6]:

$$S_{\max} \leq S_{\min} \cdot e^{\mu\alpha}, \quad (1.10)$$

де μ — коефіцієнт фрикційної взаємодії (тертя спокою) між робочим покриттям привідного вала та стрічкою;

α — кут охоплення стрічкою привідного вала, рад (для двовальних систем без притискних роликів $\alpha = \pi \approx 3,14$ рад);

e — основа натурального логарифма [7].

Шляхом сумісного розв'язання наведених рівнянь визначається мінімально необхідний натяг збігаючої гілки стрічки $S_{\min}$ (Н), що гарантує відсутність кінематичного просковзування під навантаженням:

$$S_{\min} \geq \frac{P_T}{e^{\mu\alpha} - 1}. \quad (1.11)$$

Паралельно виконується перевірка стрічки за критерієм допустимого провисання між опорними елементами. Для запобігання надмірному деформаційному провисанню, натяг у будь-якій точці траси S_i повинен відповідати умові [7]:

$$S_i \geq \frac{(q_w + q_B) \cdot l_r}{8 \cdot [h/l]}, \quad (1.12)$$

де l_r — крок розташування підтримуючих елементів (для слайдера приймається як відстань між точками фіксації або довжина вільного прогону полотна), м;

$[h/l]$ — нормативне допустиме відносне провисання стрічки (для логістичних конвеєрів $[h/l] \leq 0,01 \dots 0,02$) [17].

1.4.4 Розрахунок кінематичних параметрів приводу та визначення необхідної номінальної потужності електродвигуна

На основі знайденого повного тягового зусилля P_T та заданої лінійної швидкості руху стрічки виконується розрахунок динамічних та потужнісних параметрів

приводної станції конвеєра. Потреба в корисній потужності на привідному валу N_0 (кВт) обчислюється як [7]:

$$N_0 = \frac{P_T \cdot v}{1000}. \quad (1.13)$$

Для компенсації втрат енергії у передавальних механізмах (редукторі, пасовій або зубчастій передачі) та підшипникових вузлах, а також для забезпечення надійного пуску системи під навантаженням, номінальна потужність електродвигуна $N_{дв}$ (кВт) визначається з урахуванням коефіцієнта запасу та сумарного ККД приводу [6]:

$$N_{дв} = \frac{k_3 \cdot N_0}{\eta}, \quad (1.14)$$

де k_3 — коефіцієнт експлуатаційного запасу потужності (для малих автоматизованих конвеєрів із можливими нерівномірностями завантаження приймається $k_3 = 1,15 \dots 1,25$);

η — загальний коефіцієнт корисної дії приводного механізму [7].

Для правильного підбору або верифікації крутного моменту крокового двигуна розраховується необхідний статичний крутний момент на привідному валу $M_{кр}$ (Н·м):

$$M_{кр} = \frac{P_T \cdot D}{2}, \quad (1.15)$$

де D — зовнішній робочий діаметр виготовленого привідного вала, м.

Кутова швидкість обертання привідного вала ω (рад/с) та його частота обертання n (об/хв) жорстко пов'язані із лінійною швидкістю стрічки через діаметр вала [6]:

$$\omega = \frac{2 \cdot v}{D}, \quad (1.16)$$

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}. \quad (1.17)$$

Отримані в результаті розрахунку значення необхідного крутного моменту $M_{кр}$ та частоти обертання n виступають базовими критеріями для вибору двигуна та

конфігурування режимів мікрокроку його драйвера в системі автоматичного керування [17].

Висновки до розділу

У першому розділі було виконано комплексний аналітичний огляд науково-техничної літератури та сучасних промислових рішень у сфері конвеєрного транспорту, що дозволило сформулювати теоретичне підґрунтя для подальшого інженерного проектування лінії автоматизованого сортування. За результатами порівняльного аналізу різних конструктивних архітектур конвеєрних систем встановлено, що для переміщення та розподілу штучних вантажів у логістичних комплексах найбільш ефективними є стрічкові конвеєри завдяки їхній плавності ходу, високій швидкості та універсальності щодо геометрії об'єктів. Дослідження спеціалізованих високошвидкісних рішень типу Crossbelt та систем передачі під прямим кутом підтвердило тенденцію до глибокої інтеграції транспортних і виконавчих сортувальних механізмів, проте їх впровадження у межах малогабаритних прототипів обмежене значною конструктивною складністю та металоємністю.

На основі аналізу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів конвеєрних стрічок обґрунтовано, що традиційні промислові гумовотканинні та гумовотросові полотна є нераціональними для систем легкої автоматизації через велику питому вагу й жорсткість. Натомість доцільним для логістичних сортувальних ліній визначено використання полімерних полотен на основі полівінілхлориду (ПВХ) та поліуретану (ПУ). Зокрема, поліуретанові стрічки завдяки своїй прецизійній гнучкості та стійкості до циклічних деформацій дозволяють реалізувати міжконвеєрні переходи мінімального діаметра («ножові розвороти»), що мінімізує ризик застрягання дрібних посилок під час транспортування.

Дослідження технологій замикання транспортних стрічок показало, що методи гарячої та холодної вулканізації гуми є непридатними для тонких полімерних полотен. Визначено, що найбільш технологічним методом з'єднання ПВХ та ПУ

стрічок є термічне зварювання за типом зубчастого стику (Finger splice), яке забезпечує однорідність і монолітність структури на молекулярному рівні, зберігає постійну товщину та еластичність полотна у зоні з'єднання, що критично важливо для стабільного проходження валів малого радіуса. Механічні методи стикування через їхній високий трибологічний знос і геометричну неоднорідність визначено як суто аварійні засоби оперативного ремонту.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГОТОВИХ КОМПОНЕНТІВ

Метою даного розділу є розробка структурної схеми та обґрунтування вибору готових компонентів для конвеєрної лінії системи автоматизованого сортування. На основі аналітичного огляду літератури та існуючих рішень було визначено, що побудова системи на базі прямого мікропроцесорного керування є найбільш ефективним інженерним рішенням для автоматизації логістичних процесів.

2.1 Структурна схема

Структурна схема являє собою графічне подання системи, у якому основні функціональні елементи відображаються у вигляді окремих блоків із зазначенням взаємозв'язків між ними. Такий спосіб представлення дозволяє наочно продемонструвати загальну архітектуру пристрою, принципи його побудови та організацію обміну даними й керуючими сигналами між окремими компонентами. За допомогою структурної схеми можна визначити призначення кожного модуля системи, оцінити їхню взаємодію та зрозуміти логіку функціонування пристрою в цілому.

Розробка структурної схеми є одним із важливих етапів проектування мікропроцесорних систем керування, оскільки вона забезпечує формування цілісного уявлення про майбутню систему ще до етапу детальної реалізації. Наявність такої схеми значно спрощує процес аналізу технічного рішення, дозволяє оцінити доцільність використання окремих компонентів та виявити можливі недоліки у структурі системи. Крім того, структурна схема допомагає визначити надлишкові або відсутні елементи, оптимізувати побудову пристрою, а також підвищити ефективність його роботи та надійність функціонування.

Для реалізації структурної схеми для конвеєрної лінії потрібно поєднати такі компоненти:

- Мікроконтролер
- Елементи управління (кнопки, енкодер, ін)

- Засіб виведення інформації (Екран)
- Драйвер двигуна
- Двигун

Для реалізації взаємодії користувача із системою доцільно використати елементи керування, такі як кнопки, енкодер та інші органи введення. За їх допомогою оператор зможе запускати та зупиняти конвеєрну лінію, змінювати режими роботи, регулювати швидкість руху стрічки та виконувати налаштування системи. Використання таких елементів забезпечує просте та зручне керування обладнанням.

Для виконання обчислень, обробки команд та організації взаємодії між усіма компонентами системи використовується мікроконтролер. Саме він є центральним обчислювальним модулем системи прямого мікропроцесорного керування. Мікроконтролер здійснює аналіз вхідних сигналів від елементів керування, формує сигнали для драйвера двигуна, забезпечує керування режимами роботи конвеєра та контролює загальне функціонування системи. Використання сучасного мікроконтролера дозволяє зменшити габарити пристрою, спростити побудову системи та знизити її енергоспоживання.

Для виведення службової та технологічної інформації використовується дисплейний модуль. Екран дозволяє відображати поточний режим роботи системи, швидкість обертання двигуна, стан конвеєрної лінії, меню налаштувань та інші параметри. Це забезпечує зручний контроль роботи системи оператором та підвищує ефективність експлуатації обладнання.

Для узгодження роботи мікроконтролера із виконавчим двигуном застосовується драйвер крокового двигуна. Драйвер виконує функцію силового керування двигуном, формує необхідні сигнали керування та забезпечує стабільну роботу виконавчого механізму. Також він дозволяє регулювати швидкість і напрямок обертання двигуна, а також забезпечує захист системи від перевантажень.

Як виконавчий механізм системи використовується кроковий двигун, який забезпечує переміщення конвеєрної стрічки. Використання крокового двигуна дозволяє реалізувати точне керування швидкістю та позиціонуванням, що є важливим

для автоматизованих конвеєрних систем. Завдяки високій точності та надійності роботи двигун забезпечує стабільне функціонування конвеєрної лінії в різних режимах експлуатації.

На рис. 2.1 було сформовано структурну схему для конвеєрної лінії, яка демонструє взаємодію елементів системи між собою для реалізації поставленого завдання.

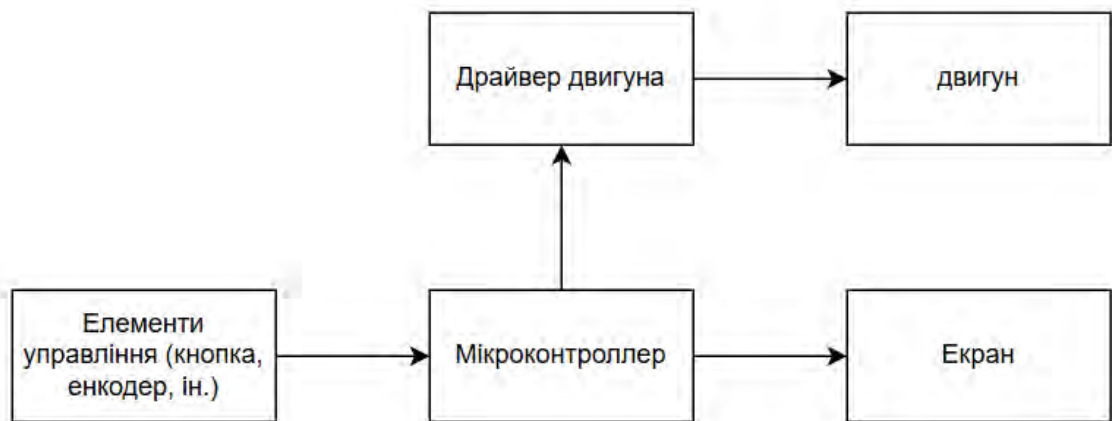


Рисунок 2.1 Структурна схема для конвеєрної лінії для системи автоматизованого сортування.

Як можна побачити із запропонованої структурної схеми, центральним елементом системи є мікроконтролер, який виконує функції основного обчислювального та керуючого модуля. Саме він забезпечує координацію роботи всіх компонентів системи керування конвеєрною лінією та організовує обмін сигналами між окремими функціональними блоками. Керування системою здійснюється за допомогою елементів управління, до яких належать кнопки, енкодер та інші засоби введення. За допомогою цих компонентів оператор може задавати режими роботи конвеєрної лінії, змінювати швидкість руху стрічки, виконувати запуск або зупинку системи, а також здійснювати навігацію по меню налаштувань. Сигнали від елементів керування надходять до мікроконтролера, де відбувається їх обробка та формування відповідних команд керування. Після аналізу отриманих команд мікроконтролер формує сигнали для драйвера двигуна, який виконує роль силового модуля керування

виконавчим механізмом. Драйвер забезпечує узгодження низьковольтних сигналів мікроконтролера із параметрами живлення двигуна та формує необхідні імпульси для його стабільної роботи. Завдяки цьому забезпечується можливість регулювання швидкості, напрямку та режимів обертання двигуна залежно від встановлених параметрів роботи системи. Виконавчим елементом системи є двигун, який приводить у рух конвеєрну стрічку та забезпечує транспортування об'єктів по лінії. Використання крокового двигуна дозволяє реалізувати точне керування рухом конвеєра, що є важливим для автоматизованих виробничих процесів, де необхідна стабільність та повторюваність роботи. Для відображення поточного стану системи використовується дисплейний модуль, підключений до мікроконтролера. На екран може виводитися інформація про вибраний режим роботи, швидкість обертання двигуна, стан системи, параметри налаштувань та інші службові повідомлення. Це забезпечує зручну взаємодію оператора із системою та спрощує процес контролю роботи конвеєрної лінії.

Таким чином, запропонована структурна схема демонструє принцип організації системи прямого мікропроцесорного керування конвеєрною лінією, у якій мікроконтролер виконує функцію центрального вузла обробки даних і керування. Реалізована структура забезпечує ефективну взаємодію між елементами введення, виконавчими пристроями та засобами відображення інформації, що дозволяє створити компактну, гнучку та надійну систему автоматизованого керування конвеєром.

2.2 Формування вимог до компонентів системи

Після розробки структурної схеми системи керування конвеєрною лінією необхідно сформулювати технічні вимоги до її основних компонентів. Визначення таких вимог є важливим етапом проєктування, оскільки саме від правильного вибору елементної бази залежить стабільність, надійність та ефективність роботи всієї системи. Сформовані вимоги дозволяють забезпечити сумісність між окремими модулями, оптимізувати енергоспоживання системи, а також гарантувати необхідну продуктивність і точність роботи конвеєрної лінії.

2.2.1 Вимоги до мікроконтролера

Для реалізації системи прямого мікропроцесорного керування конвеєрною лінією до мікроконтролера висувається ряд важливих технічних вимог, оскільки саме він виконує функції центрального обчислювального та керуючого модуля системи. Мікроконтролер повинен забезпечувати стабільну обробку команд керування, взаємодію з периферійними пристроями та формування сигналів для керування виконавчими механізмами у режимі реального часу.

Оскільки система передбачає постійне зчитування даних з елементів керування, обробку команд користувача та керування кроковим двигуном, мікроконтролер повинен мати достатню обчислювальну продуктивність та високочастотне ядро. Наявність процесора з тактовою частотою від 100–160 МГц дозволить забезпечити швидке виконання програмного коду, стабільне формування керуючих сигналів та коректну роботу системи без затримок навіть при одночасному виконанні декількох задач.

Для зберігання програмного коду, бібліотек керування периферією та службових даних мікроконтролер повинен мати достатній обсяг вбудованої Flash-пам'яті. Також важливою характеристикою є обсяг оперативної пам'яті RAM, яка використовується для тимчасового зберігання змінних, буферів даних та виконання програмних процесів. Наявність достатнього обсягу пам'яті дозволяє реалізувати складні алгоритми керування, підтримку дисплейного інтерфейсу та роботу з декількома периферійними модулями одночасно.

Для забезпечення взаємодії з іншими елементами системи мікроконтролер повинен підтримувати достатню кількість цифрових входів та виходів GPIO. Це необхідно для підключення кнопок керування, енкодера, дисплейного модуля та драйвера двигуна. Крім того, контролер повинен підтримувати сучасні інтерфейси зв'язку, зокрема UART, SPI та I²C, що забезпечить можливість підключення різноманітних периферійних пристроїв та спростить інтеграцію компонентів у єдину систему.

Важливою вимогою є підтримка апаратного формування PWM-сигналів, оскільки вони використовуються для керування драйвером двигуна та регулювання

параметрів роботи виконавчого механізму. Наявність вбудованих таймерів та апаратних модулів керування дозволить підвищити точність формування сигналів та зменшити навантаження на центральне ядро мікроконтролера.

Також важливою характеристикою є низьке енергоспоживання мікроконтролера, оскільки система повинна працювати стабільно протягом тривалого часу без надмірного нагріву компонентів. Використання енергоефективного контролера дозволить знизити загальне споживання електроенергії системою та підвищити її надійність.

Окрім цього, мікроконтролер повинен мати компактні габарити, простоту програмування та підтримку сучасних середовищ розробки. Це спрощує процес розробки програмного забезпечення, налагодження системи та подальшу модернізацію проєкту. Таким чином, правильно обраний мікроконтролер дозволить забезпечити ефективну, стабільну та надійну роботу системи керування конвеєрною лінією.

2.2.2 Вимоги до елементів управління

Для забезпечення зручної та ефективної взаємодії оператора із системою автоматизованого сортування до елементів управління висувається ряд технічних вимог. Засоби керування повинні забезпечувати швидке та коректне введення команд, необхідних для налаштування параметрів роботи конвеєрної лінії, зміни режимів функціонування системи та керування процесом сортування. Елементи управління повинні мати високу надійність роботи та стабільно функціонувати при тривалій експлуатації. Оскільки система може працювати у безперервному режимі, важливо забезпечити стійкість компонентів до механічного зношування та великої кількості циклів використання. Це дозволить знизити ймовірність виникнення помилок під час введення команд та підвищити загальну надійність системи. Для зручності користування елементи керування повинні забезпечувати просте та інтуїтивно зрозуміле налаштування параметрів роботи конвеєрної лінії. Оператор повинен мати можливість швидко змінювати швидкість руху конвеєра, запускати або зупиняти систему, а також виконувати навігацію по меню налаштувань без складних

додаткових дій. Це особливо важливо для автоматизованих систем, де необхідна оперативна зміна режимів роботи.

Таким чином, правильно обрані елементи управління забезпечують зручну взаємодію користувача із системою автоматизованого сортування, підвищують ефективність керування конвеєрною лінією та сприяють стабільній роботі всієї системи в цілому.

2.2.3 Вимоги до дисплейного модуля

Для забезпечення зручної взаємодії оператора із системою автоматизованого сортування до дисплейного модуля висувається ряд технічних вимог. Засіб відображення інформації повинен забезпечувати чітке та зрозуміле виведення основних параметрів роботи конвеєрної лінії, а також дозволяти оператору контролювати стан системи у режимі реального часу.

Дисплейний модуль повинен мати достатню роздільну здатність для відображення текстової інформації, пунктів меню, службових повідомлень та параметрів роботи системи. Важливо забезпечити хорошу читабельність інформації при різних умовах освітлення, що дозволить оператору комфортно працювати із системою без додаткових засобів візуалізації.

Однією з основних вимог є компактні габарити дисплейного модуля, оскільки система керування конвеєрною лінією повинна залишатися компактною та зручною для монтажу. Невеликі розміри дисплея дозволяють ефективно інтегрувати його у корпус системи без значного збільшення її габаритів.

Також важливою характеристикою є низьке енергоспоживання дисплея, оскільки система автоматизованого сортування може працювати тривалий час у безперервному режимі. Використання енергоефективного дисплейного модуля дозволить зменшити загальне споживання електроенергії системою та знизити нагрів компонентів.

Дисплейний модуль повинен забезпечувати достатню швидкість оновлення інформації для своєчасного відображення змін параметрів роботи конвеєрної лінії. Це особливо важливо під час налаштування системи або зміни режимів роботи, коли оператору необхідно оперативно отримувати актуальну інформацію.

Крім цього, дисплей повинен мати просту інтеграцію з програмним забезпеченням мікроконтролера та підтримувати роботу з доступними програмними бібліотеками. Це значно спрощує процес розробки інтерфейсу користувача, налагодження системи та подальшу модернізацію програмного забезпечення.

Таким чином, правильно обраний дисплейний модуль забезпечить зручне відображення інформації, підвищить комфорт роботи оператора та дозволить ефективно контролювати процес функціонування системи автоматизованого сортування на базі конвеєрної лінії.

2.2.4 Вимоги до виконавчого модулю

Для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи автоматизованого сортування до виконавчого модуля висувається ряд важливих технічних вимог. Виконавчий модуль є одним із ключових елементів системи, оскільки саме він забезпечує приведення в рух конвеєрної стрічки та реалізацію процесу транспортування і сортування об'єктів. Однією з основних вимог до двигуна є достатня потужність та крутний момент, необхідні для переміщення конвеєрної стрічки разом із навантаженням. Двигун повинен забезпечувати стабільне обертання навіть при зміні навантаження на систему, що дозволить уникнути зупинок або втрати точності роботи конвеєра під час сортування об'єктів. Для систем автоматизованого сортування важливо забезпечити високу точність керування рухом виконавчого механізму. Тому двигун повинен підтримувати можливість точного регулювання швидкості та положення. Це дозволить реалізувати плавний рух конвеєрної стрічки та забезпечити стабільність процесу сортування, особливо при роботі з невеликими або чутливими об'єктами.

Також важливою характеристикою є стабільність роботи на низьких швидкостях обертання. У системах автоматизації часто виникає необхідність точного позиціонування або плавної зміни швидкості руху конвеєра, тому двигун повинен працювати без ривків, пропусків кроків та значних вібрацій.

Оскільки система може працювати у тривалому безперервному режимі, двигун повинен мати достатню надійність та стійкість до перегріву. Конструкція виконавчого модуля повинна забезпечувати стабільну роботу протягом тривалого

часу без втрати характеристик або зниження ефективності роботи. Це дозволить підвищити ресурс системи та зменшити потребу у технічному обслуговуванні.

Крім цього, виконавчий модуль повинен мати компактні габарити та зручне механічне кріплення для інтеграції у конструкцію конвеєрної лінії. Це спростує монтаж системи та дозволяє ефективно використовувати внутрішній простір конструкції.

Таким чином, правильно обраний виконавчий модуль забезпечить стабільний рух конвеєрної стрічки, високу точність роботи системи автоматизованого сортування та надійне функціонування всієї системи в цілому.

2.2.5 Вимоги до драйвера двигуна

Для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи автоматизованого сортування до драйвера двигуна висувається ряд важливих технічних вимог. Драйвер є проміжною ланкою між мікроконтролером та виконавчим модулем і виконує функцію силового керування двигуном. Саме він забезпечує формування необхідних сигналів для роботи двигуна та узгодження параметрів живлення між керуючою та виконавчою частинами системи. Однією з основних вимог до драйвера є підтримка роботи з обраним типом двигуна та забезпечення необхідних значень струму і напруги для його стабільного функціонування. Драйвер повинен забезпечувати достатню потужність для керування виконавчим механізмом без перевантаження та втрати стабільності роботи системи.

Також драйвер повинен підтримувати роботу із цифровими сигналами від мікроконтролера та бути сумісним із сучасними інтерфейсами керування. Це дозволить спростити інтеграцію компонентів у єдину систему та забезпечить надійну взаємодію між центральним обчислювальним модулем і виконавчим механізмом.

Оскільки система автоматизованого сортування може працювати тривалий час у безперервному режимі, драйвер повинен мати вбудовані засоби захисту від перегріву, короткого замикання та перевантаження по струму. Наявність таких механізмів захисту дозволить підвищити надійність роботи системи та запобігти пошкодженню компонентів під час експлуатації. Для зменшення шуму та вібрацій під час роботи конвеєрної лінії драйвер повинен забезпечувати плавне керування

двигуном. Це дозволить підвищити точність роботи системи, зменшити механічне навантаження на конструкцію та покращити стабільність транспортування об'єктів.

Також важливими вимогами є компактні габарити драйвера, низьке енергоспоживання та простота підключення. Компактний модуль дозволяє ефективно інтегрувати його у конструкцію системи керування, а підтримка поширених програмних бібліотек та типових схем підключення спрощує процес розробки та налагодження системи.

Таким чином, правильно обраний драйвер двигуна забезпечить точне та стабільне керування виконавчим механізмом, підвищить надійність роботи системи автоматизованого сортування та забезпечить ефективне функціонування конвеєрної лінії в різних режимах роботи.

2.3 Підбір компонентів згідно вимог

На основі технічних вимог, сформованих у попередньому підрозділі до компонентів системи прямого мікропроцесорного керування конвеєрною лінією, у даному розділі буде проводитись аналіз та вибір конкретних електронних та електромеханічних компонентів для практичної реалізації прототипу. Вибір компонентів базується на сформованих вимогах та на пошуку оптимального балансу між продуктивністю, точністю позиціонування, габаритами готової системи та загальною вартістю її реалізації, та доступності. Враховуючи, що система автоматизованого сортування та її конвеєрна лінія зазвичай експлуатуються в умовах закритих складських або виробничих приміщень, додатковою вимогою до всіх компонентів має бути забезпечення стабільної роботи при робочій температурі навколишнього середовища від 0 до +50 °C та відносній вологості повітря не більше 80% без утворення конденсату.

Далі буде проведений детальний аналіз технічних характеристик доступних рішень та обрані найбільш доцільні електронні компоненти (мікроконтролер, елементи управління, дисплейний модуль, кроковий двигун та драйвер двигуна) для використання в розроблюваній системі конвеєрної лінії.

2.3.1 Вибір мікроконтролера

Для реалізації центрального вузла керування конвеєрною лінією, базуючись на поставлених вимогах до продуктивності та необхідності забезпечення мінімальних габаритів пристрою, було обрано мікроконтролер ESP32-C3 Super Mini від компанії Espressif Systems.

В основі цього контролера знаходиться високопродуктивний 32-бітний мікропроцесор з архітектурою RISC-V, який працює на тактовій частоті до 160 МГц. Така обчислювальна потужність повністю задовольняє поставлені вимоги, гарантуючи швидку та стабільну обробку сигналів від елементів управління (кнопок, енкодера), оновлення інформації на дисплеї та точне формування високочастотних керуючих імпульсів для драйвера крокового двигуна в режимі реального часу. [14]

Для зберігання програмного коду, буферів дисплейного модуля та службових змінних системи, контролер має 400 КБ SRAM, 384 КБ ROM та 4 МБ вбудованої Flash-пам'яті. Крім того, мікроконтролери серії ESP32 відомі своїми вбудованими модулями бездротового зв'язку. Наявність підтримки Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth 5.0 (LE) відкриває перспективи для подальшої модернізації проєкту, дозволяючи в майбутньому легко інтегрувати конвеєрну лінію в загальну мережу Інтернету речей (IoT) складу або підприємства без використання додаткових зовнішніх модулів. [14]

Головною перевагою використання плати ESP32-C3 Super Mini є її надкомпактні габарити (усього 22.5×18 мм) та висока енергоефективність. У режимі глибокого сну (Deep sleep) плата споживає близько 43 мкА. Для живлення та зручного завантаження програмного коду на платі передбачено сучасний роз'єм USB Type-C, що значно спрощує процес налагодження системи. [14]

Для узгодження мікроконтролера з периферією плата має 11 програмованих GPIO портів загального призначення. Положення та призначення входів/виходів контролера ESP32-C3 Super Mini можна побачити на рисунку 2.2.

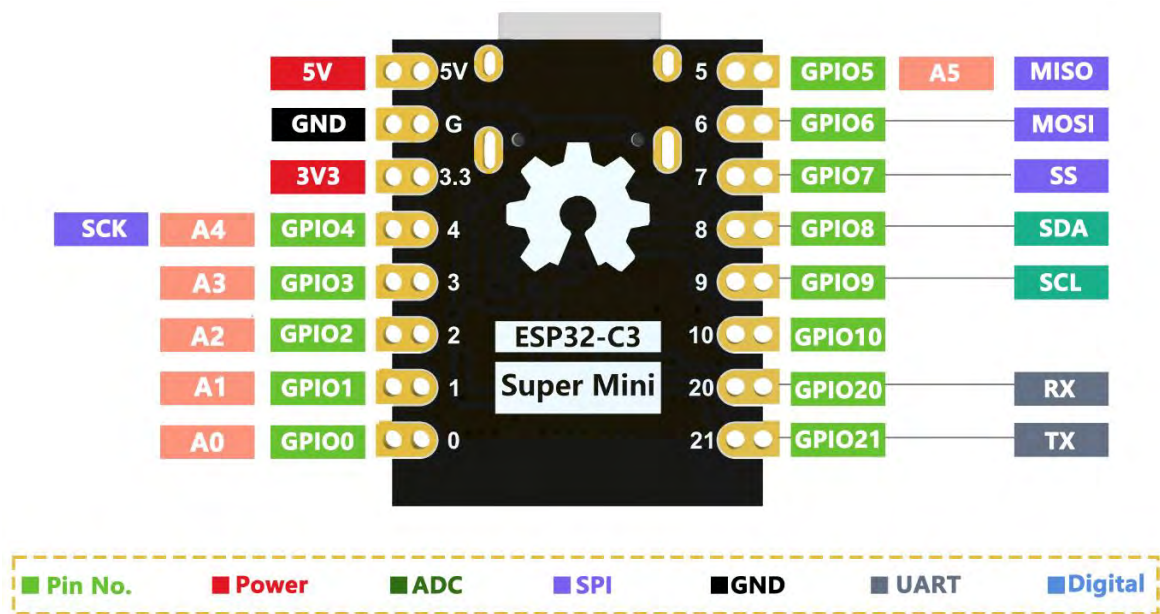


Рисунок 2.2 Призначення пінів ESP32-C3 Super Mini

Як ми можемо побачити з розпіновки, контролер забезпечує достатню кількість виводів з підтримкою необхідних цифрових інтерфейсів (I2C, SPI, UART) та апаратного ШІМ (PWM). Це дозволяє без проблем підключити дисплейний модуль (наприклад, по I2C) та організувати стабільне керування драйвером двигуна. [14]

Загальні технічні характеристики платформи ESP32-C3 Super Mini можна побачити в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики платформи ESP32-C3 Super Mini

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ESP32-C3 (32-біт RISC-V, однопоточний)
Тактова частота	до 160 МГц
Вбудована пам'ять (Flash)	4 МБ
Оперативна пам'ять (SRAM)	400 КБ
Кількість цифрових пінів (GPIO)	11
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi (2.4 ГГц), Bluetooth 5.0 (LE)
Струм у режимі сну (Deep sleep)	~43 мкА
Інтерфейс підключення	USB Type-C
Габарити	22.52 × 18 мм

Таким чином, аналіз характеристик підтвердив доцільність використання платформи ESP32-C3 Super Mini як центрального обчислювального та керуючого модуля розроблюваної системи. Її обчислювальної потужності, обсягу пам'яті та набору периферійних інтерфейсів більш ніж достатньо для стабільного керування кроковим двигуном конвеєра, а мініатюрний розмір дозволить створити максимально компактний та ергономічний електронний блок керування.

2.3.2 Вибір елементів управління

Для забезпечення зручної, швидкої та інтуїтивно зрозумілої взаємодії оператора із системою керування конвеєрною лінією необхідно було обрати ефективний засіб введення даних. Зважаючи на потребу в навігації по меню налаштувань на дисплеї, а також необхідність плавного та точного регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки, використання класичної матричної клавіатури або набору окремих кнопок є нераціональним з точки зору ергономіки та використання вільного простору на панелі керування.

В якості основного та єдиного органу керування було обрано модуль інкрементального енкодера KY-040(Рис. 2.3). Цей модуль є багатофункціональним пристроєм введення, який поєднує у собі поворотний механізм із необмеженим кутом обертання (360 градусів) та вбудовану тактову кнопку, яка спрацьовує при натисканні на вал. Таке конструктивне рішення дозволяє оператору здійснювати прокручування пунктів меню або зміну заданої швидкості шляхом обертання вала, а підтвердження вибору або запуск/зупинку конвеєра – натисканням на нього.



Рисунок 2.3 Зовнішній вигляд модуля інкрементального енкодера KY-040

Важливою схемотехнічною перевагою готового модуля КУ-040 є наявність на друкованій платі вбудованих підтягуючих резисторів (Pull-up) номіналом 10 кОм для ліній даних. Це позбавляє необхідності додавати зовнішні компоненти в електричну принципову схему та гарантує відсутність хибних спрацьовувань через наведення. Згідно з документацією, модуль стабільно працює в діапазоні напруг від 3.3 В до 5 В, що повністю відповідає логічним рівням обраного мікроконтролера.

Основні технічні характеристики модуля енкодера наведено у таблиці 2.4.[9, 16]

Таблиця 2.2 Технічні характеристики модуля енкодера КУ-040

Параметр	Значення
Тип енкодера	Інкрементальний, механічний
Робоча напруга живлення	3.3 В – 5 В
Кількість імпульсів на оберт (PPR)	20
Кут обертання	360° (безперервний)
Вбудована кнопка	натискання на вал
Ресурс обертання	не менше 20 000 циклів
Температура експлуатації	від -30 °С до +70 °С
Габарити модуля	26.20 × 19 × 29 мм

Таким чином, використання модуля енкодера КУ-040 дозволяє реалізувати повноцінний та зручний інтерфейс користувача з використанням лише трьох цифрових входів мікроконтролера (два для відстеження обертання і один для зчитування стану кнопки). Це рішення мінімізує габарити панелі керування, спрощує електричну схему та підвищує загальну надійність експлуатації прототипу конвеєрної лінії.

2.3.3 Вибір дисплейного модуля

Для відображення службової та технологічної інформації, такої як поточна швидкість руху конвеєрної стрічки, стан датчиків позиціонування та забезпечення візуальної навігації по меню налаштувань, в систему необхідно інтегрувати засіб відображення даних. З огляду на жорсткі вимоги до компактності електронного блока керування та прагнення мінімізувати енергоспоживання, використання масивних

рідкокристалічних дисплеїв є недоцільним. Оптимальним інженерним рішенням для розроблюваного прототипу став графічний 0.96" 7pin 128X64 OLED Display Module. Технологія OLED (Organic Light-Emitting Diode) має суттєві переваги над класичними LCD-екранами. Оскільки кожен окремий піксель є самовипромінюючим органічним діодом, такий дисплей не потребує модулів заднього підсвічування. Це дозволяє досягти надзвичайно високого рівня контрастності, глибокого чорного кольору, широких кутів огляду (понад 160°) та відмінної читабельності білої графіки в ультракомпактному корпусі з габаритами всього 27 × 27 × 4.1 мм. [8]

Дисплей побудований на базі популярного контролера SSD1306. Обрана 7-пінова модифікація модуля відзначається високою універсальністю: вона підтримує підключення як через шину SPI, так і через I2C. При використанні інтерфейсу I2C для керування потрібно лише два виводи мікроконтролера: D0 діє як лінія тактування (SCL), а D1 — як лінія даних (SDA). За потреби високошвидкісного оновлення екрана розробник може задіяти додаткові виводи (RES, DC, CS) для реалізації протоколу SPI. На рис. 2.4 зображено зовнішній вигляд модулю дисплея.



Рисунок 2.4 Зовнішній вигляд та призначення виводів 7-pin OLED дисплея 0.96

Модуль сумісний із логічними рівнями 3.3 В та 5 В, що дозволяє підключити його безпосередньо до обраного мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini без схем узгодження. Надзвичайно низьке енергоспоживання під час нормальної роботи, яке становить усього 0.04 Вт, робить цей дисплей ідеальним вибором для енергоефективних вбудованих систем та портативних пристроїв.

Загальні технічні характеристики графічного OLED-модуля наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Технічні характеристики дисплейного модуля 0.96" 7-pin OLED

Параметр	Значення
Керуючий чіп (драйвер)	SSD1306
Технологія матриці	OLED (монохромна, білий колір)
Роздільна здатність	128 × 64 пікселів
Діагональ екрана	0.96 дюйма
Інтерфейс зв'язку	I2C (через контакти SCL та SDA), також підтримується SPI
Робоча напруга живлення	3.3 В – 5 В DC
Споживання потужності	0.04 Вт (нормальний режим роботи)
Кут огляду	> 160°
Температура експлуатації	від -30 °C до +80 °C
Габарити модуля	27 × 27 × 4.1 мм

Таким чином, графічний OLED-дисплей 0.96" повністю задовольняє технічні вимоги системи. Його роздільної здатності достатньо для побудови інформативного інтерфейсу користувача, підтримка I2C/SPI забезпечує зручність інтеграції, а мініатюрні розміри дозволяють зберегти компактність електронного блока.

2.3.4 Вибір виконавчого модулю

Для забезпечення точного та стабільного переміщення конвеєрної стрічки в системі автоматизованого сортування необхідно було обрати надійний виконавчий механізм. Враховуючи вимоги до прецизійного позиціонування об'єктів, можливості

плавного регулювання швидкості та необхідність утримання стрічки в нерухомому стані під час виконання механічних операцій сортування, використання звичайних колекторних двигунів постійного струму без зворотного зв'язку є технічно недоцільним.

Оптимальним інженерним рішенням для даного діючого прототипу став гібридний кроковий двигун NEMA 17 (17PM-H005-P2VA).

Двигуни стандарту NEMA 17 мають розмір переднього фланця 42×42 мм, що дозволяє легко інтегрувати їх у більшість конструкцій конвеєрних ліній (зокрема, створених за допомогою 3D-друку або алюмінієвого профілю) та використовувати стандартизовані механічні кріплення. Обрана модель має базовий кут кроку 1.8° , що відповідає 200 фізичним крокам на один повний оберт вала. Це забезпечує високу роздільну здатність та плавність переміщення, яку можна додатково помножити шляхом використання мікрокрокового режиму (Microstepping) на драйвері керування. Кроковий двигун зображено на рис 2.5. [10, 11]



Рисунок 2.5 Зовнішній вигляд NEMA 17

Особливістю моделі 17PM-H005-P2VA є наявність 6 виводів від обмоток, що робить його універсальним: двигун підтримує як уніполярну, так і біполярну схему керування. Для конвеєрних систем доцільно застосовувати біполярне підключення (здіявши лише 4 крайні виводи обмоток), оскільки воно дозволяє отримати максимальний крутний момент від магнітної системи. Утримуючий момент (Holding Torque) на рівні 200 mN·m гарантує стабільний рух транспортної стрічки без пропусків кроків навіть при наявності динамічного механічного навантаження від вантажів.

Загальні технічні характеристики крокового двигуна наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 2.4 Технічні характеристики крокового двигуна 17PM-H005-P2VA

Параметр	Значення
Типорозмір (стандарт)	NEMA 17
Кут кроку	1.8° (200 кроків/оберт)
Кількість фаз	2 фази (6 виводів, уніполярний/біполярний режим)
Габаритні розміри корпусу	42 × 42 × 34 мм
Діаметр вала	5.0 мм
Утримуючий момент (Holding Torque)	~200 mN·m
Маса	~200 г

Таким чином, використання гібридного крокового двигуна 17PM-H005-P2VA забезпечує необхідну потужність, стабільний крутний момент на низьких обертах та абсолютну точність позиціонування, що є критично важливим для надійного функціонування прототипу конвеєрної лінії в архітектурі системи автоматизованого сортування.

2.3.5 Вибір драйвера двигуна

Для координації роботи низьковольтного мікроконтролера з силовим гібридним кроковим двигуном NEMA 17 необхідна спеціалізована силова ланка. Крокові двигуни вимагають прецизійної комутації обмоток високим струмом і напругою, що унеможливорює їхнє пряме підключення до цифрових виводів

процесора. З метою забезпечення надійності, апаратного захисту мікроконтролера від зворотних ЕРС, а також спрощення процесу монтажу, було обрано кроковий драйвер Allegro A4988 разом із модульною платою розширення (breakout board) для модулів A4988/DRV8825.

Використання плати розширення спільно зі знімним модулем драйвера є класичним інженерним рішенням для прототипування промислових та робототехнічних систем. Воно забезпечує високу ремонтпридатність: у разі випадкового перевантаження чи виходу з ладу силових транзисторів, замінюється лише мініатюрний модуль драйвера A4988, а вся кабельна інфраструктура та плата розширення залишаються неушкодженими.

Мікросхема A4988 являє собою повний мікрокроковий драйвер мотора з вбудованим транслятором для спрощення керування. Вона здатна працювати з напругою живлення силової частини в широкому діапазоні (від 8 до 35 В) і забезпечувати постійний вихідний струм до ± 2 А на одну фазу (за умови встановлення алюмінієвого радіатора для розсіювання тепла).

Головною перевагою використання A4988 є вбудований транслятор, який значно спрощує алгоритм програмування мікроконтролера. Для керування рухом двигуна задіяно лише дві основні логічні лінії: STEP — кожен високочастотний імпульс, що надходить від мікроконтролера, ініціює зміщення ротора двигуна на один крок (або мікрокрок); DIR — рівень напруги на цьому виводі (високий/низький) визначає напрямок обертання вала (за годинниковою стрілкою чи проти неї).

Лінія EN (Enable) використовується для увімкнення або повного знеструмлення обмоток двигуна за потреби. Плата розширення також обладнана гвинтовими клемниками для надійної фіксації кабелів живлення та чотирьох виводів фазних обмоток крокового двигуна (A+, A-, B+, B-). Важливою конструктивною перевагою плати є наявність блоку трипозиційних DIP-перемикачів, які комутують виводи керування мікрокроком драйвера (MS1, MS2, MS3) безпосередньо на лінію живлення або заземлення без задіяння додаткових портів GPIO мікроконтролера. Драйвер A4988 підтримує п'ять режимів дискретизації кроку: повний крок, 1/2, 1/4, 1/8 та 1/16 кроку. Зовнішній вигляд драйверу з платою розширення зображено на рис. 2.6. [5, 12]



Рисунок 2.6 Зовнішній вигляд та інтерфейси плати розширення з драйвером A4988

Загальні технічні та експлуатаційні параметри обраного силового модуля наведено в таблиці .

Параметр	Значення
Напруга живлення логічної частини (VDD)	3.0 В – 5.5 В
Напруга живлення силової частини (VMOT)	8 В – 35 В
Максимальний вихідний струм на фазу	до 2.0 А
Режими мікрокроку (дискретизація)	Повний крок, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 кроку
Спосіб регулювання максимального струму	Вбудований підстроювальний потенціометр (Vref)
Габарити модуля драйвера	20 × 15 мм

Таким чином, вибір мікросхеми драйвера A4988 разом із платою розширення повністю вирішує задачу надійного узгодження низьковольтної логіки мікроконтролера з силовими ланцюгами крокового двигуна конвеєра. Наявність вбудованого апаратного конфігуратора мікрокроку (DIP-перемикачів) дозволяє гнучко адаптувати плавність ходу транспортної стрічки під механічні особливості сортувальної лінії без ускладнення програмного коду мікроконтролера, а модульна архітектура гарантує високу експлуатаційну надійність усього пристрою.

2.3.6 Вибір компонентів живлення

Для забезпечення стабільної та безперебійної роботи всіх електронних та електромеханічних вузлів конвеєрної лінії необхідно реалізувати надійну підсистему живлення. Оскільки обраний гібридний кроковий двигун через силовий драйвер A4988 потребує високої напруги (12 В), а центральний мікроконтролер ESP32-C3 Super Mini разом із периферійними модулями (OLED-дисплей, енкодер) функціонує від низької напруги (3.3 В), система живлення має бути дворівневою.

Зважаючи на те, що елементи комутації та живлення є типовими й у разі потреби можуть бути легко замінені на аналогічні з відповідними електричними характеристиками, нижче наведено стислий огляд обраної компонентної бази:

1. Блок живлення 12 В. В якості первинного джерела енергії обрано стандартний імпульсний мережевий адаптер живлення (AC/DC) з вихідною напругою 12 В постійного струму та максимальним струмом навантаження до 2...3 А. Його потужності повністю достатньо для забезпечення енергією крокового двигуна NEMA 17 у моменти пікових динамічних навантажень.
2. Гніздо живлення (DC-порт). Для підключення зовнішнього блока живлення до друкованої плати пристрою застосовано класичний циліндричний роз'єм типу DC-005. Цей порт є промисловим стандартом для низьковольтної апаратури, монтується безпосередньо на плату або корпус і розрахований на струми до 5 А.
3. Кнопка живлення. Для ручного ввімкнення та вимкнення пристрою у розрив силової лінії живлення встановлюється механічний фіксований

перемикач (наприклад, рокерний тумблер серії KCD1). Він виконує роль загального вимикача системи.

4. Понижувальний конвертер (лінійний/імпульсний регулятор до 3.3 В). Для отримання стабільної напруги 3.3 В із первинних 12 В застосовано інтегральний понижувальний стабілізатор (на базі популярної мікросхеми AMS1117-3.3 або аналогічного DC-DC buck-конвертера). Він забезпечує прецизійну вихідну напругу з низьким рівнем пульсацій, захищаючи чутливу цифрову логіку мікроконтролера від пошкоджень та перегріву.

Оскільки всі перераховані компоненти виготовляються у стандартних крос-платформних корпусах та мають уніфіковані виводи, вони є повністю взаємозамінними з будь-якими іншими аналогами, що мають схожі параметри напруги та струму. Це суттєво спрощує процес обслуговування, ремонту або можливого тиражування електронного блоку керування конвеєрною лінією.

Висновки до розділу

У даному розділі було розроблено структурну схему конвеєрної лінії для системи автоматизованого сортування та здійснено обґрунтований вибір апаратної елементної бази, необхідної для її практичної реалізації.

На початковому етапі проектування було створено структурну схему, яка наочно відображає архітектуру пристрою та принципи взаємодії його ключових вузлів: мікроконтролера, засобів введення/виведення інформації та виконавчих механізмів. На основі побудованої структури були сформовані чіткі технічні та експлуатаційні вимоги до кожного окремого модуля системи з урахуванням специфіки роботи конвеєрного обладнання. В результаті детального аналізу доступних на ринку електронних та електромеханічних компонентів було обрано оптимальні рішення, що повністю задовольняють висунутим критеріям щодо продуктивності, енергоефективності, компактності та вартості: В якості центрального керуючого вузла обрано високопродуктивний мікроконтролер ESP32-C3 Super Mini, що володіє достатнім обсягом пам'яті та вбудованими бездротовими інтерфейсами;

Інтерфейс користувача реалізовано за допомогою модуля інкрементального енкодера KY-040 та графічного OLED-дисплея 0.96" на базі драйвера SSD1306, що гарантує зручну навігацію та інтуїтивне керування системою; Як виконавчий механізм, що забезпечує точне та стабільне переміщення стрічки, обрано гібридний кроковий двигун стандарту NEMA 17 (модель 17PM-H005-P2VA) у зв'язці з модулем драйвера A4988 на спеціалізованій платі розширення; Для стабільного забезпечення системи електроенергією підібрано відповідні компоненти дворівневої підсистеми живлення (імпульсний БЖ 12 В та понижуючий конвертер до 3.3 В).

Таким чином, обрана апаратна база повністю відповідає поставленим технічним завданням, забезпечує високу точність позиціонування вантажів та надійність функціонування прототипу. Отримані у цьому розділі результати є міцним інженерним фундаментом для переходу до наступних етапів проєктування, зокрема — розробки електричної схеми підключення модулів, конструювання механічної частини та створення програмного алгоритму керування мікроконтролером.

3 РОЗРОБКА СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Метою цього розділу є перехід від теоретичного планування системи під час проектування структурної схеми до розробки конкретної фізичної та технічної реалізації пристрою. Створення загальної схеми підключення та інтеграції електронних модулів є одним з головних етапів проектування системи прямого мікропроцесорного керування конвеєрною лінією. Вона визначає точний характер взаємодії між усіма обраними в минулому розділі компонентами, забезпечує їх узгоджене живлення та гарантує загальне функціонування системи в реальних умовах.

Попередньо проведений аналіз та сформовані технічні вимоги дозволили чітко визначити оптимальну елементну базу. Розробка схеми базується на інтеграції обраного енергоефективного мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini з силовим драйвером крокового двигуна A4988, виконавчим гібридним двигуном NEMA 17 (модель 17PM-H005-P2VA), графічним дисплейним модулем 0.96" OLED та інкрементальним енкодером KY-040 як єдиним органом управління. Ключовим завданням на цьому етапі є проектування правильної схеми з'єднань зазначених компонентів для досягнення максимальної точності формування та передачі високочастотних керуючих імпульсів, а також для забезпечення безперебійної координації між обчислювальним центром і периферією.

Під час формування схемотехнічних з'єднань потрібно зробити акцент на правильному розподілі рівнів живлення та мінімізації впливу завад на цифрові інтерфейси зв'язку. Побудова зв'язків розробляється з розрахунком того, щоб силова частина живлення драйвера та крокового двигуна (12 В) була чітко розмежована з чутливою низьковольтною логічною шиною мікроконтролера та периферійних модулів (3.3 В). Таке рішення дозволить уникнути хибних спрацьовувань та пропусків кроків через високочастотні імпульсні шуми, які виникають при комутації обмоток двигуна, що є критично важливим для прецизійного позиціонування об'єктів на транспортній стрічці. Суворий підбір топології з'єднань та вузлів фільтрації

напруги гарантуватиме здатність усіх елементів системи безвідмовно витримувати тривалі динамічні навантаження та забезпечить високу надійність і живучість електронного блоку під час безперервного циклу експлуатації.

3.1 Підключення драйвера двигуна

Важливим етапом розробки схеми підключення є проєктування зв'язків між керуючою логікою, силовим драйвером та виконавчим механізмом конвеєрної лінії. Драйвер Allegro A4988 виступає в ролі інтелектуального силового моста, який приймає слабкоструміві сигнальні команди від мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini та комутує високу напругу й струм на обмотки гібридного крокового двигуна NEMA 17 (модель 17PM-H005-P2VA).

Для повноцінної інтеграції модуля в загальну електричну принципову схему пристрою необхідно реалізувати три основні контури підключення: логічний інтерфейс керування, контур живлення та силове вихідне плече для активації фаз двигуна.

3.1.1 Підключення драйвера до мікроконтролера

Керування драйвером A4988 з боку мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini здійснюється за допомогою цифрових виводів загального призначення (GPIO) за стандартним протоколом «Крок/Напрямок» (STEP/DIR). Схемотехнічне поєднання логічної частини виконується за такою схемою:

- Вивід STEP драйвера підключається до програмованого цифрового виходу мікроконтролера (наприклад, GPIO2). Кожен логічний імпульс (перехід з низького рівня у високий), сформований на цьому піні мікроконтролером, змушує драйвер змістити ротор двигуна на один крок або мікрокрок.
- Вивід DIR драйвера з'єднується з іншим цифровим портом (наприклад, GPIO3). Стан цього виводу (високий логічний рівень або низький) визначає напрямок обертання вала двигуна.
- Вивід EN (Enable) підключається до цифрового порту (наприклад, GPIO4) для забезпечення можливості повного вимкнення живлення обмоток

двигуна в моменти простою конвеєра, що дозволяє уникнути його надмірного нагріву.

- Виводи VDD та GND (Logic) підключаються до шини низьковольтного живлення логіки: VDD з'єднується з виводом 3.3V мікроконтролера ESP32-C3, а логічний заземлюючий контакт GND — із загальною шиною заземлення системи.

3.1.2 Підключення драйвера до крокового двигуна та підсистеми живлення

Силова частина драйвера потребує підключення зовнішнього джерела енергії та безпосереднього з'єднання з магнітною системою виконавчого механізму:

- Виводи VMOT та GND (Power) підключаються безпосередньо до первинної силової шини 12 В постійного струму від блока живлення. Критично важливою інженерною вимогою є встановлення електролітичного фільтруючого конденсатора великої ємності (не менше 100 мкФ з робочою напругою до 25–35 В) у безпосередній близькості до виводів VMOT та GND. Цей компонент захищає драйвер від руйнівних імпульсних стрибків напруги (зворотної ЕРС), які виникають під час комутації індуктивного навантаження обмоток.
- Вихідні виводи 1A, 1B та 2A, 2B призначені для керування фазами крокового двигуна.

Графічне відображення повноцінно інтегрованого та підключеного модуля драйвера A4988 в архітектуру електричної принципової схеми блока керування наведено на рисунку 3.1. [18]

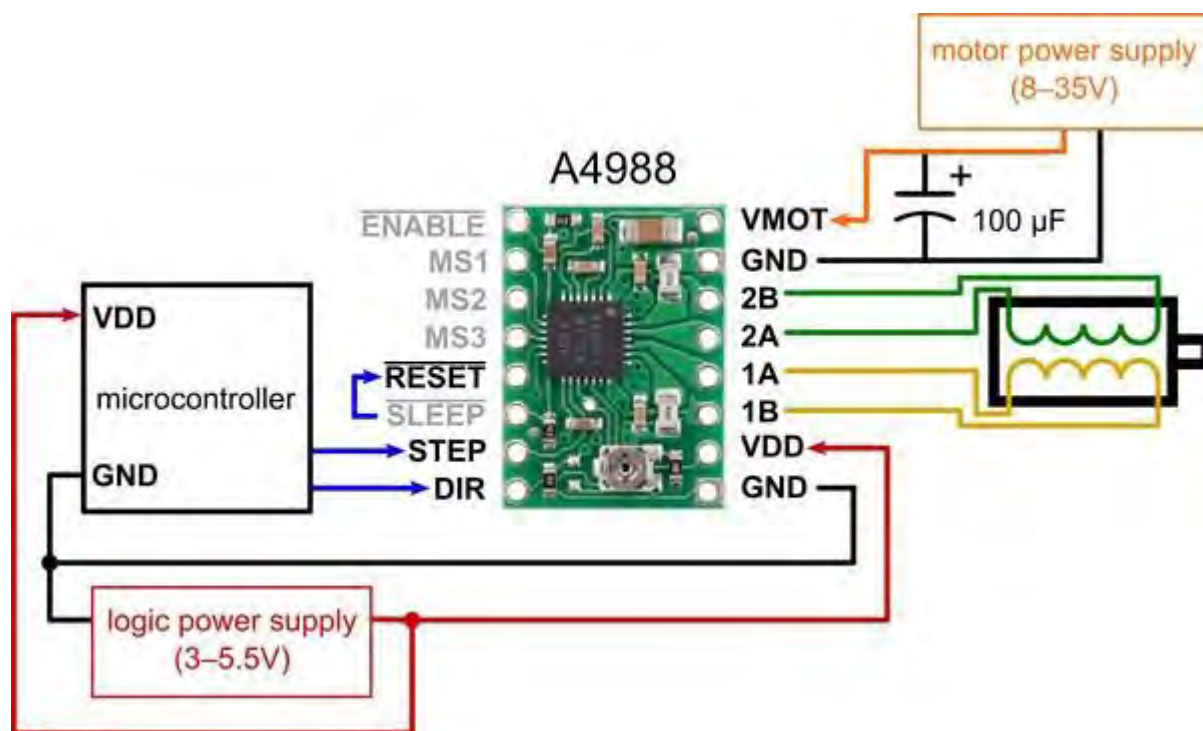


Рисунок 3.1 Схема підключення драйвера A4988 до мікроконтролера та виконавчого двигуна

Реалізована топологія з'єднань дозволяє повністю ізолювати силові високочастотні струми комутації двигуна від чутливих цифрових ліній мікроконтролера, забезпечуючи стабільну роботу конвеєрної лінії без збоїв, пропусків кроків та помилок у програмі керування.

3.2 Підключення та інтеграція модуля енкодера

Для реалізації повноцінного інтерфейсу взаємодії оператора з конвеєрною лінією необхідно забезпечити надійне підключення пристрою введення даних. Інкрементальний енкодер KY-040 виступає в ролі головного органу управління, який дозволяє здійснювати навігацію по меню сортувальної системи, змінювати числові параметри та регулювати швидкість обертання крокового двигуна. Схемотехнічна інтеграція цього модуля вимагає його узгодження з цифровими портами введення-виведення мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini.

Модуль енкодера KY-040 має 5 виводів для підключення: два для забезпечення живлення і три для передачі інформаційних сигналів (обертання та натискання

кнопки) . Інтеграція модуля в загальну схему пристрою виконується за наступним принципом:

- Вивід живлення («+» або VCC) підключається до низьковольтної шини 3.3V мікроконтролера. Оскільки логічні рівні ESP32-C3 становлять 3.3 В, живлення енкодера такою ж напругою гарантує безпечний амплітудний діапазон вихідних імпульсів без ризику пошкодження портів процесора.
- Вивід заземлення (GND) з'єднується із загальною системою заземлення (GND) електронного блоку.
- Вивід CLK (Clock) є основним виходом для відстеження обертання вала. Його підключають до цифрового порту мікроконтролера з підтримкою зовнішніх апаратних переривань (наприклад, GPIO0).
- Вивід DT (Data) є додатковим виходом, сигнал на якому зміщений по фазі відносно CLK на 90 градусів [9]. Він підключається до іншого цифрового порту (наприклад, GPIO1). Аналізуючи, який саме з сигналів (CLK чи DT) першим змінив свій логічний рівень, мікроконтролер визначає напрямок обертання ручки.
- Вивід SW (Switch) підключений до вбудованої тактової кнопки вала енкодера. Він з'єднується з цифровим портом (наприклад, GPIO5). Оскільки на платі KY-040 для лінії кнопки часто відсутній вбудований підтягуючий резистор, цей порт мікроконтролера необхідно програмно сконфігурувати в режим апаратної підтяжки до живлення (Input Pull-Up), щоб уникнути «плаваючого» потенціалу та хибних спрацьовувань.

Така схема підключення дозволяє організувати ефективний та компактний вузол управління, який займає мінімальну кількість ліній зв'язку мікроконтролера і забезпечує миттєвий відгук системи на дії оператора конвеєра.

3.3 Підключення та інтеграція дисплейного модуля

Для забезпечення якісного відображення інформації та зворотного зв'язку з оператором у системі керування конвеєрною лінією необхідно виконати правильне підключення засобу відображення даних. Графічний 0.96" OLED-дисплей на базі

контролера SSD1306 у 7-піновому виконанні є універсальним пристроєм, який апаратно підтримує два різні методи послідовної передачі даних: швидкісну шину SPI та двопровідну шину I2C.

Оскільки вибір способу підключення безпосередньо впливає на кількість задіяних портів мікроконтролера та швидкість оновлення екрана, нижче детально розглянуто обидва можливі шляхи інтеграції дисплея в архітектуру системи на базі мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini.

3.3.1 Підключення за інтерфейсом 4-wire SPI

Послідовний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) є базовим для 7-пінової модифікації плати дисплея і забезпечує максимальну пропускну здатність. При такому підході між мікроконтролером і дисплеєм організовується чотирипровідна лінія зв'язку (не враховуючи контури живлення).

Схемотехнічне з'єднання виводів у режимі SPI виконується за такою схемою:

- GND — підключається до загального заземлення (GND) системи.
- VCC — з'єднується з лінією живлення 3.3V мікроконтролера.
- D0 (SCLK) — лінія тактування шини SPI. Підключається до апаратного піна тактування мікроконтролера (наприклад, GPIO6).
- D1 (SDIN/MOSI) — лінія передачі даних від майстра до веденого. Підключається до виводу даних мікроконтролера (наприклад, GPIO7).
- RES (RESET) — лінія апаратного скидання дисплея. З'єднується з будь-яким вільним цифровим портом (наприклад, GPIO10).
- DC (Data/Command) — сигнальний вивід вибору типу даних (команда чи графічні дані). Підключається до цифрового порту (наприклад, GPIO9).
- CS (Chip Select) — лінія вибору мікросхеми, яка активує роботу з конкретним SPI-пристроєм. Підключається до програмованого виводу (наприклад, GPIO8).

Переваги: Максимальна частота передачі даних (до 10 МГц), що гарантує миттєве візуальне динамічне оновлення графіки, відсутність затримок при швидкому обертанні енкодера та плавне прокручування меню.

Недоліки: Використовує відразу 5 цифрових GPIO портів мікроконтролера, що обмежує можливість підключення іншої периферії за дефіциту вільних виводів.

3.3.2 Підключення за інтерфейсом I2C

Інтерфейс I2C (Inter-Integrated Circuit) дозволяє значно скоротити кількість провідників керування. Для переведення 7-пінової плати в режим I2C зазвичай потрібно виконати невелику апаратну модифікацію на зворотному боці друкованої плати дисплея (перепаяти конфігураційні резистори відповідно до шовкографії виробника). [8]

Схемотехнічне з'єднання виводів у режимі I2C виконується за такою схемою:

- GND та VCC — аналогічно підключаються до шин GND та 3.3V.
- D0 (SCL) — виконує роль лінії тактування шини I2C. Підключається до апаратного або програмного піна SCL мікроконтролера (наприклад, GPIO5).
- D1 (SDA) — виконує роль двонаправленої лінії даних шини I2C. Підключається до відповідного піна SDA мікроконтролера (наприклад, GPIO4).
- DC (SA0) — у цьому режимі цей вивід визначає фізичну I2C-адресу пристрою в мережі (0x3C або 0x3D). Його жорстко з'єднують із землею (GND) або шиною живлення.
- RES (RESET) — лінія скидання. Може бути підключена до GPIO мікроконтролера або з'єднана через RC-ланцюжок із лінією живлення для автоматичного скидання при старті.
- CS — лінія вибору чіпа. У режимі I2C цей вивід не використовується і має бути надійно з'єднаний із шиною заземлення (GND).

Переваги: Для повноцінного обміну даними використовуються лише 2 сигнальні лінії (SCL та SDA), що дозволяє суттєво заощадити GPIO порти мікроконтролера для підключення інших датчиків чи виконавчих пристроїв.

Недоліки: Нижча швидкість обміну даними порівняно зі SPI (стандартно до 400 кГц). При виведенні складних графічних об'єктів або великих обсягів тексту оновлення екрана може відбуватися з візуально помітною затримкою.

3.4 Електрична принципова схема системи

На основі обґрунтованої у попередніх підрозділах елементної бази та розроблених локальних вузлів комутації було синтезовано загальну електричну принципову схему електронного блока керування конвеєрною лінією. Ця схема інтегрує підсистему енергозабезпечення, мікропроцесорний модуль, засоби інтерфейсу користувача та силовий перетворювач виконавчого механізму в єдиний апаратно-програмний комплекс. Повна електрична принципова схема пристрою наведена на рисунку 3.4.

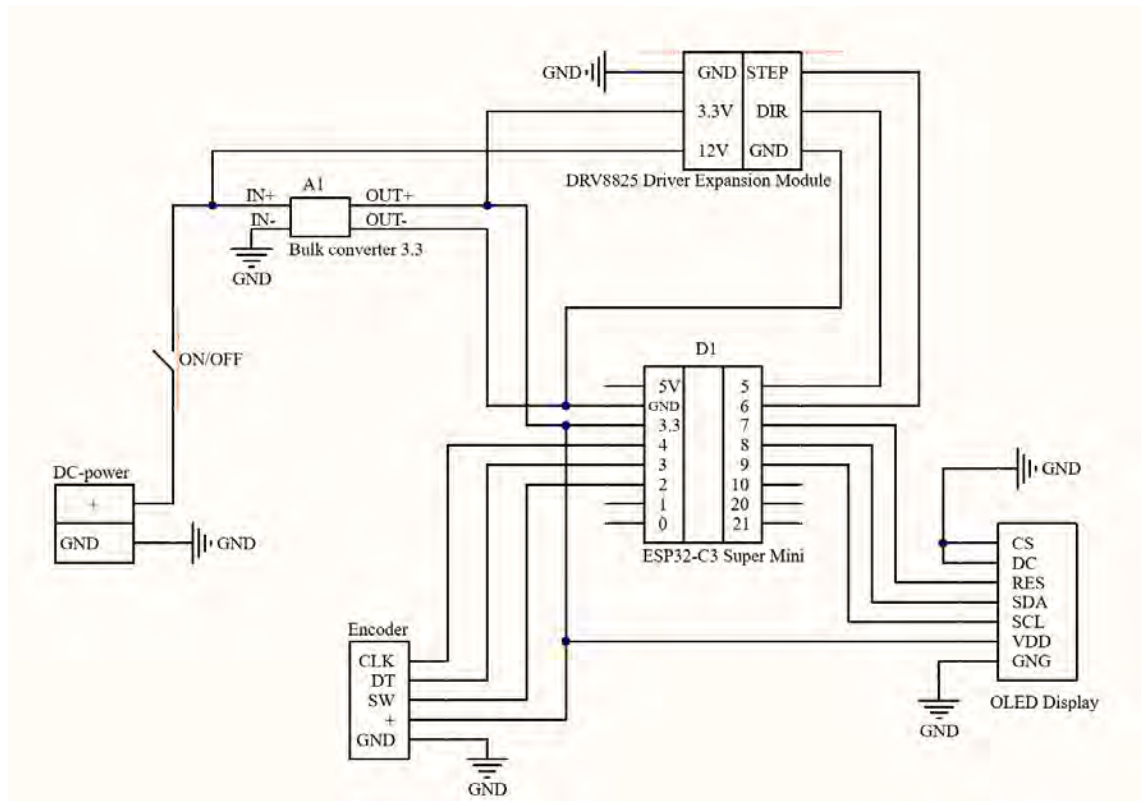


Рисунок 3.2 Загальна електрична принципова схема системи керування конвеєрною лінією

Підсистема живлення та комутації. Первинне електроживлення системи здійснюється від зовнішнього джерела постійного струму (DC-power) з номінальною напругою 12 В. Силова лінія комутується через головний електромеханічний вимикач (ON/OFF), після якого розгалужується на два незалежні контури. Високовольтний контур забезпечує безпосереднє постачання напруги 12 В на силові клеми плати розширення драйвера крокового двигуна. Низьковольтний контур утворений інтегральним понижувальним перетворювачем (Bulk converter 3.3V), що формує

стабілізовану напругу 3.3 В, призначену для живлення мікроконтролера, логічної частини драйвера, модуля енкодера та дисплея.

Центральний обчислювальний вузол. У якості головного керуючого елемента застосовано мікроконтролер ESP32-C3 Super Mini (на схемі позначений як D1). Усі периферійні пристрої сполучені з його портами вводу-виводу загального призначення (GPIO) із забезпеченням спільного контуру заземлення (GND) для вирівнювання потенціалів.

Контур керування виконавчим механізмом. Узгодження керуючих сигналів із силовою частиною крокового двигуна реалізовано за допомогою спеціалізованої плати розширення (позначеної як DRV8825 Expansion Module, сумісної з мікросхемою-драйвером A4988). Мікроконтролер генерує дискретні керуючі імпульси: сигнал кроку (STEP) формується на виводі GPIO 6, а сигнал визначення напрямку обертання (DIR) — на виводі GPIO 5. Логічна частина драйвера інтегрована до загальної шини живлення 3.3 В.

Контур інтерфейсу користувача (Енкодер). Модуль інкрементального енкодера отримує робочу напругу 3.3 В. Його інформаційні виводи комутовані з портами мікроконтролера за наступною топологією: лінія тактування (CLK) з'єднана з виводом GPIO 4, лінія даних (DT) — з виводом GPIO 3, а лінія зчитування стану вбудованої тактової кнопки (SW) — з виводом GPIO 2.

Контур відображення даних. Інтеграція 7-пінового OLED-дисплея 0.96" реалізована за допомогою послідовної шини передачі даних I2C, що дозволило оптимізувати кількість задіяних апаратних портів мікроконтролера. Лінія даних (SDA) сполучена з виводом GPIO 8, а лінія тактування (SCL) — з виводом GPIO 9. Для апаратної конфігурації дисплейного модуля в режим I2C, виводи вибору мікросхеми (CS), вибору режиму даних/команд (DC) та лінія скидання (RES) електрично з'єднані із загальною шиною заземлення (GND).

Синтезована електрична принципова схема повною мірою задовольняє всі сформовані інженерні вимоги проєкту. Дане схемотехнічне рішення забезпечує коректну маршрутизацію сигналів, гарантує надійне розмежування потужних силових струмів (12 В) від чутливих логічних ліній (3.3 В).

Висновки до розділу

У третьому розділі було здійснено повну схемотехнічну розробку та проектування загальної схеми підключення електронних модулів для системи прямого мікропроцесорного керування конвеєрною лінією. В результаті проведеного проектування розроблено та обґрунтовано логічний контур взаємодії між мікроконтролером ESP32-C3 Super Mini та силовим драйвером крокового двигуна Allegro A4988 за інтерфейсом STEP/DIR, що забезпечує координацію високочастотних імпульсів для прецизійного регулювання руху транспортного полотна. Паралельно спроектовано інтерфейсний вузол введення даних на базі інкрементального енкодера KY-040 із визначенням оптимальної топології його підключення до цифрових портів введення-виведення загального призначення обчислювального ядра. Організація контуру візуалізації технологічних параметрів відбулася шляхом інтеграції графічного OLED-дисплея 0.96" на базі контролера SSD1306, причому обґрунтований та реалізований метод його підключення за послідовною шиною I2C дозволив мінімізувати кількість задіяних апаратних ліній зв'язку мікроконтролера. Особливу увагу приділено архітектурі підсистеми дворівневого енергозабезпечення пристрою із чітким розмежуванням високосилового ланцюга напругою 12 В, призначеного для живлення обмоток виконавчого механізму, та низьковольтного ланцюга напругою 3.3 В на основі понижувального інтегрального регулятора для безпечного живлення елементів цифрової логіки.

На основі проведеної роботи синтезовано повну електричну принципову схему, яка інтегрує всі обрані апаратні компоненти в єдиний функціональний комплекс. Створена топологія з'єднань забезпечує коректну маршрутизацію сигналів, гарантує високу стабільність та безвідмовність роботи всього електронного блока конвеєрної лінії.

4 КОНСТРУЮВАННЯ ТА ЗБИРАННЯ ПРОТОТИПУ КОНВЕЄРНОЇ ЛІНІЇ

4.1 Обґрунтування вибору конструкційної основи рами конвеєра на базі алюмінієвого верстатного профілю

Для забезпечення стабільного та безперебійного функціонування механічної частини системи автоматизованого сортування критично важливим є вибір надійної несучої конструкції. Рама конвеєра повинна гарантувати високу просторову жорсткість, точність геометрії для запобігання перекосу транспортної стрічки, а також здатність ефективно поглинати вібрації та витримувати динамічні навантаження від крокового двигуна і рухомих вантажів. Проаналізувавши альтернативні варіанти, такі як зварні сталеві конструкції або гнутий листовий метал, у якості базового матеріалу для конструювання рами діючого прототипу було обрано конструкційний екструдований алюмінієвий профіль із Т-подібним пазом стандарту 2020 з перерізом 20×20 мм. Для виробництва таких промислових профілів використовується конструкційний алюмінієвий сплав марки 6063, поверхня якого додатково піддається глибокому анодуванню для захисту від корозії. Відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 755-2 [1], матеріал піддається термічній обробці до стану T5, що гарантує оптимальне співвідношення границі міцності на розрив та границі плинності, необхідне для побудови жорстких просторових механізмів. Зовнішній вигляд та особливості геометрії перерізу обраного профілю наведено на рисунку 4.1.

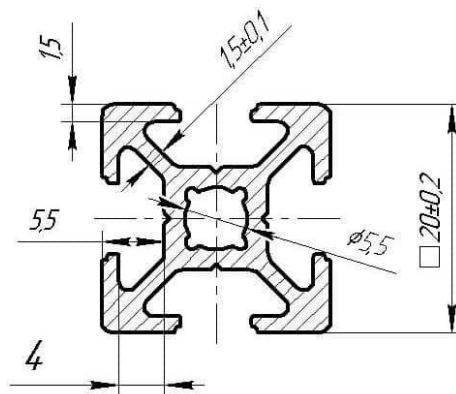


Рисунок 4.1 Зовнішній вигляд та переріз конструкційного алюмінієвого профілю 20x20 мм

Головною експлуатаційною перевагою використання верстатного профілю є наявність поздовжніх Т-подібних пазів по всій довжині граней, що забезпечує надзвичайно високу модульність та технологічність збирання. Це дозволяє здійснювати швидкий і надійний монтаж будь-яких функціональних вузлів, зокрема кріплень крокового двигуна, натяжних роликів, оптичних датчиків та електронного блока керування, за допомогою стандартизованих Т-подібних гайок і сухарів. Такий підхід повністю виключає необхідність проведення зварювальних робіт, точного свердління отворів або нарізання різьби безпосередньо у несучій рамі. Крім того, архітектура з'єднань на базі кутових кронштейнів надає безпрецедентну гнучкість на етапі прототипування, дозволяючи за потреби легко змінювати загальну геометрію рами, довжину траси або положення механізмів скидання з міліметровою точністю.

Завдяки спеціальній складній геометрії внутрішнього перерізу та наявності ребер жорсткості, обраний алюмінієвий профіль володіє високим моментом інерції. Це гарантує відмінну стійкість до деформацій на вигин та кручення при збереженні мінімальної маси конструкції, що є важливим фактором для створення компактного настільного прототипу. Водночас висока точність процесу екструзії, допуски на розміри та форму якої жорстко регламентуються стандартом ДСТУ EN 755-9 [2], забезпечує ідеальну прямолінійність і паралельність напрямних осей рами. Збереження ідеальної геометрії є принципово важливим для дотримання співвісності ведучого та веденого валів конвеєра, що у свою чергу забезпечує плавний рух транспортної стрічки без бокових зміщень та ймовірності заклинювання.

Таким чином, використання алюмінієвого верстатного профілю як конструкційної основи рами є найбільш раціональним технічним рішенням. Воно повною мірою задовольняє усі інженерні вимоги щодо міцності, кінематичної точності та ергономіки, а також суттєво знижує часові витрати на конструювання, збирання та подальше масштабування механічної частини конвеєрної лінії.

4.2 Комп'ютерне тривимірне (3D) моделювання вузлів та деталей конвеєра в CAD-системах

Важливим етапом проектування механічної частини конвеєрної лінії є комп'ютерне тривимірне моделювання її конструкційних елементів у сучасних системах автоматизованого проектування (CAD). Використання твердотільного 3D-моделювання дозволяє ще на етапі розробки верифікувати геометричну сумісність деталей, оптимізувати їхню форму під технологічні вимоги подальшого виробництва за допомогою адитивних технологій (3D-друку), а також мінімізувати ймовірність інженерних помилок при складанні діючого прототипу.

Першим критично важливим вузлом, для якого було розроблено ведучий та ведений вали конвеєрної лінії. Конструкція вала спроектована з урахуванням необхідності забезпечення жорсткої посадки на вісь та досягнення максимальної кінематичної ефективності приводу. Внутрішній діаметр отвору під центральний вал або підшипниковий вузол становить 8 мм, тоді як зовнішній робочий діаметр деталі розширено до 25 мм. Таке інженерне рішення зі збільшенням зовнішнього діаметра було впроваджено цілеспрямовано з метою розширення площі фізичного контакту між циліндричною поверхнею деталі та гнучким матеріалом транспортного полотна. Збільшення радіуса кривини дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт корисного тертя спокою, забезпечуючи надійне зчеплення з конвеєрною стрічкою, що повністю унеможливорює її просковзування під час пуску двигуна або при переміщенні сортувальних вантажів із максимальною масою. Тривимірна модель цього компонента представлена на рисунку 4.2.

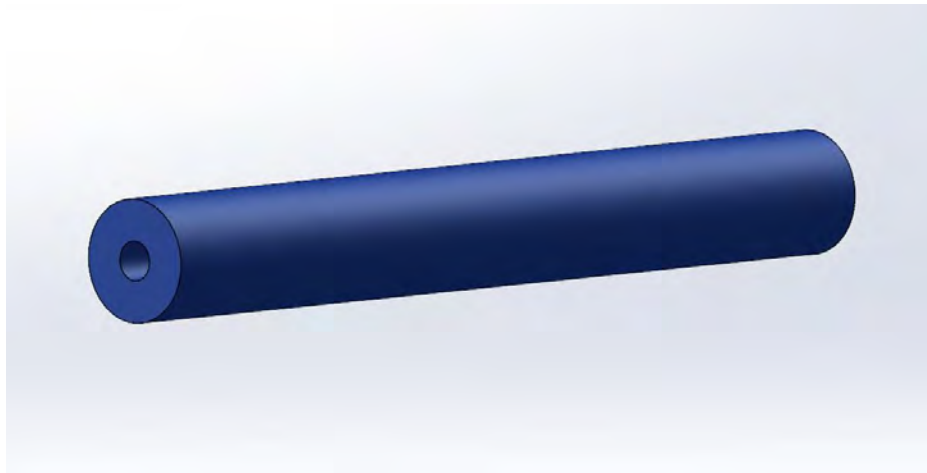


Рисунок 4.2 Тривимірна комп'ютерна модель вала конвеєрної лінії з оптимізованим робочим діаметром

Наступним елементом просторової структури конвеєра, який потребував індивідуального моделювання, став модуль підтримки стрічки. У процесі транспортування об'єктів гнучке робоче полотно під дією власної ваги та вертикального навантаження від маси вантажів неминуче зазнає механічного деформаційного провисання. Просідання стрічки призводить до порушення стабільності траєкторії руху, виникнення додаткових сил опору та нерівномірного розподілу крутного моменту на валу двигуна. Для нівелювання цих негативних факторів було спроектовано спеціальну статичну платформу підтримки стрічки, яка встановлюється безпосередньо всередині несучої рами з алюмінієвого профілю. Вона виконує роль жорсткого опорного ложа (слайдера), що фіксує ідеальну горизонтальну площину руху робочої гілки конвеєра, запобігає її просіданню. Графічне відображення геометрії даного опорного вузла наведено на рисунку 4.3.

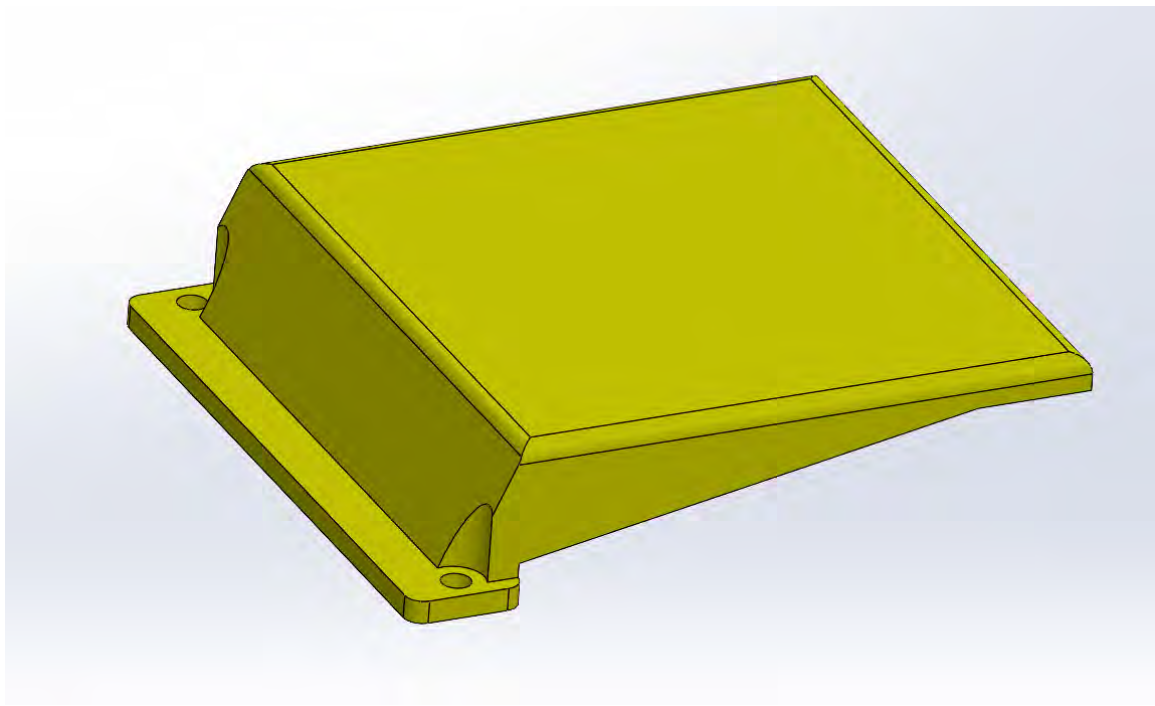


Рисунок 4.3 Тривимірна комп'ютерна модель опорного модуля для підтримки конвеєрної стрічки

Для інтеграції електронної та апаратної частин прототипу в єдину ергономічну конструкцію було змодельовано спеціалізовану панель контролю. Ця деталь виконує роль одночасно фронтального інтерфейсу оператора та захисного шасі, на якому стаціонарно розміщуються всі компоненти раніше розробленої електричної принципової схеми. При проектуванні топології панелі в CAD-системі було заздалегідь розраховано та закладено геометричні координати всіх технологічних та монтажних отворів, пазів і посадкових місць, необхідних для надійної гвинтової або затискної фіксації мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini, плати розширення з драйвером A4988, графічного OLED-дисплея, інкрементального енкодера KY-040, а також вхідного DC-порту та рокового вимикача живлення. Попередня програмна підготовка отворів кріплення дозволяє уникнути потреби в додатковій механічній доробці корпусу після виготовлення та забезпечує високу щільність компонування елементів при збереженні зручності їхнього провідникового сполучення. Візуалізація розробленої панелі контролю представлена на рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 Тривимірна комп'ютерна модель інтегрованої панелі контролю

Таким чином, розробка точних цифрових тривимірних моделей вузлів конвеєра дозволила повністю завершити етап геометричного проектування системи сортування. Отримані CAD-моделі у вигляді уніфікованих файлів форматів твердотільного обміну є повністю готовим технологічним завданням для їхнього безпосереднього експорту в середовища програм-слайсерів з метою подальшого матеріального втілення деталей на 3D-принтері.

4.3 Обґрунтування застосування адитивних технологій (3D-друку) для виготовлення кастомних елементів

Логічним продовженням етапу комп'ютерного тривимірного моделювання є вибір оптимального технологічного методу для фізичного виготовлення спроектованих деталей. Створення діючого прототипу системи автоматизованого сортування вимагає наявності унікальних кастомних елементів зі складною просторовою геометрією, таких як оптимізований привідний вал, опорний модуль

підтримки стрічки та інтегрована панель контролю. Застосування традиційних методів механічної обробки (фрезерування, токарні роботи) або лиття під тиском для виготовлення одиничних екземплярів таких деталей є економічно недоцільним через високу вартість підготовчих робіт, необхідність створення спеціального оснащення та значні часові витрати. Тому для практичної реалізації розроблених CAD-моделей було обрано метод адитивного виробництва, зокрема технологію екструзії матеріалу (FDM/FFF – Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication), що відповідає міжнародним стандартам класифікації адитивних процесів [3].

Головною перевагою застосування технології 3D-друку є максимальна гнучкість виробничого циклу та безпосередній перехід від цифрової моделі до готового фізичного об'єкта. Адитивне формування деталей шляхом пошарового наплавлення полімерного матеріалу знімає більшість технологічних обмежень, притаманних субтрактивним методам обробки. Це дозволило без ускладнень реалізувати внутрішні порожнини, нестандартні радіуси кривини ведучого вала та точну конфігурацію посадкових місць панелі контролю. Крім того, технологія забезпечує можливість швидкого прототипування: у разі виявлення кінематичних неточностей або необхідності доопрацювання конструкції під час початкового збирання, геометрія деталі може бути оперативно скоригована в CAD-системі та повторно надрукована протягом кількох годин [4].

4.4 Порівняльний аналіз та вибір конструкційного пластику для друкування деталей

Для успішної реалізації спроектованих механічних вузлів конвеєрної лінії за допомогою технології FDM/FFF (пошарового наплавлення) критично важливим є правильний підбір полімерного витратного матеріалу (філаменту). Деталі системи автоматизованого сортування, зокрема привідні вали та опорна панель контролю, піддаються постійним статичним і динамічним навантаженням, а також температурним впливам від працюючих крокових двигунів. Для визначення найбільш оптимального матеріалу було проведено порівняльний аналіз трьох найпопулярніших інженерних пластиків: PLA, ABS та PETG [13, 20].

4.4.1 Полілактид (PLA)

PLA (полімолочна кислота) є одним із найпопулярніших матеріалів завдяки простоті друку та мінімальній температурній усадці, що дозволяє створювати деталі з високою геометричною точністю [20]. Вироби з нього мають високу твердість і жорсткість [19]. Проте PLA має суттєві недоліки для промислових та інженерних застосувань: його температура склування (початок розм'якшення) становить лише близько 60 °C [13]. Це може призвести до деформації деталей, які контактують із нагрітими кроковими двигунами. Крім того, матеріал є досить крихким і погано переносить ударні навантаження або постійні вигини. [19, 20].

Висновок: PLA не підходить для привідних валів та навантажених механічних елементів конвеєра через низьку термостійкість та високу крихкість.

4.4.2 Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS)

ABS — це традиційний інженерний пластик, що відзначається високою механічною міцністю, стійкістю до ударів та відмінною термостійкістю (зберігає фізичні властивості при температурах до 95–100 °C) [19]. Незважаючи на ці переваги, процес 3D-друку пластиком ABS є технологічно складним через високий коефіцієнт температурної усадки [20]. При охолодженні масивні деталі часто деформуються, вигинаються (warping) та розшаровуються, що вимагає обов'язкового використання 3D-принтерів із закритою термокамерою. Також під час плавлення ABS виділяє шкідливі випари та має різкий неприємний запах [13].

Висновок: Хоча ABS має відмінні експлуатаційні характеристики, складнощі його друку в умовах прототипування роблять його застосування нераціональним для виготовлення великогабаритних деталей, таких як панель контролю.

4.4.3 Поліетилентерефталатгліколь (PETG)

PETG являє собою модифікований сополієфір, який вдало поєднує в собі легкість друку PLA та високу механічну міцність ABS [13]. Цей матеріал відрізняється винятково високою міжшаровою адгезією, що робить надруковані деталі монолітними та стійкими до розривних навантажень [20]. Температурна стійкість PETG становить близько 80 °C, чого цілком достатньо для роботи в контакті з двигунами. Низький рівень усадки дозволяє друкувати точні габаритні деталі на

відкритих принтерах без ризику їх викривлення [13]. Додатковою перевагою є його низький коефіцієнт тертя та природна пружність, що ідеально підходить для вузлів підтримки конвеєрної стрічки [19].

На основі проведеного порівняльного аналізу термічних, механічних та технологічних властивостей, для виготовлення унікальних кастомних вузлів конвеєрної лінії (привідного вала, опорної платформи та панелі контролю) обрано пластик PETG. Цей матеріал гарантує високу кінематичну надійність прототипу та дозволяє легко відтворити деталі на будь-якому доступному FDM-принтері.

4.5 Кінцева 3D-модель та фізична збірка прототипу

Завершальним етапом механічного проєктування конвеєрної лінії стало створення повної віртуальної збірки пристрою в середовищі системи автоматизованого проєктування (САПР). Об'єднання всіх раніше розроблених індивідуальних деталей — елементів алюмінієвого профілю, опорних платформ, привідних валів, панелі контролю та крокового двигуна — у єдину тривимірну сцену дозволило провести фінальний просторовий аналіз конструкції. Віртуальна збірка забезпечила перевірку кінематичної сумісності вузлів, гарантувала відсутність колізій (перетинів) між рухомими та статичними елементами, а також дозволила оптимізувати розташування кріпильних отворів до початку етапу виготовлення. Візуалізація кінцевої цифрової 3D-моделі конвеєрної лінії наведена на рисунку 4.5.

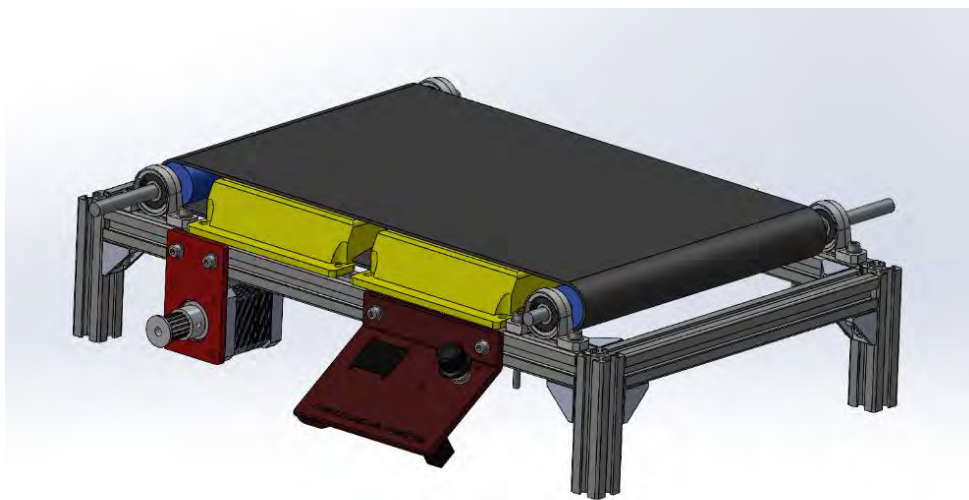


Рисунок 4.5 Кінцева комп'ютерна 3D-модель збірки конвеєрної лінії

Після успішної верифікації цифрової моделі та фізичного виготовлення кастомних деталей методом FDM-друку з обраного інженерного пластику PETG, було розпочато етап практичного конструювання прототипу. Основою пристрою стала просторова рама, зібрана з екструдованого алюмінієвого профілю 20x20 мм за допомогою стандартизованих кутових з'єднувачів та Т-подібних гайок, що забезпечило високу жорсткість та ідеальну геометрію напрямних.

На металеву несучу конструкцію було змонтовано надруковані полімерні вузли: дві половини модулів підтримки стрічки (слайдери), фланцеві підшипникові опори, кронштейн для крокового двигуна стандарту NEMA 17, а також фронтальну панель контролю. На даному етапі також виконано примірку приводного вала та зубчастої пасової передачі. Проміжний результат фізичної збірки механічної частини конвеєра, що демонструє інтеграцію друківаних компонентів із металевою рамою перед остаточним встановленням гнучкого транспортного полотна та монтажем електронної схеми, наведено на рисунку 4.6.

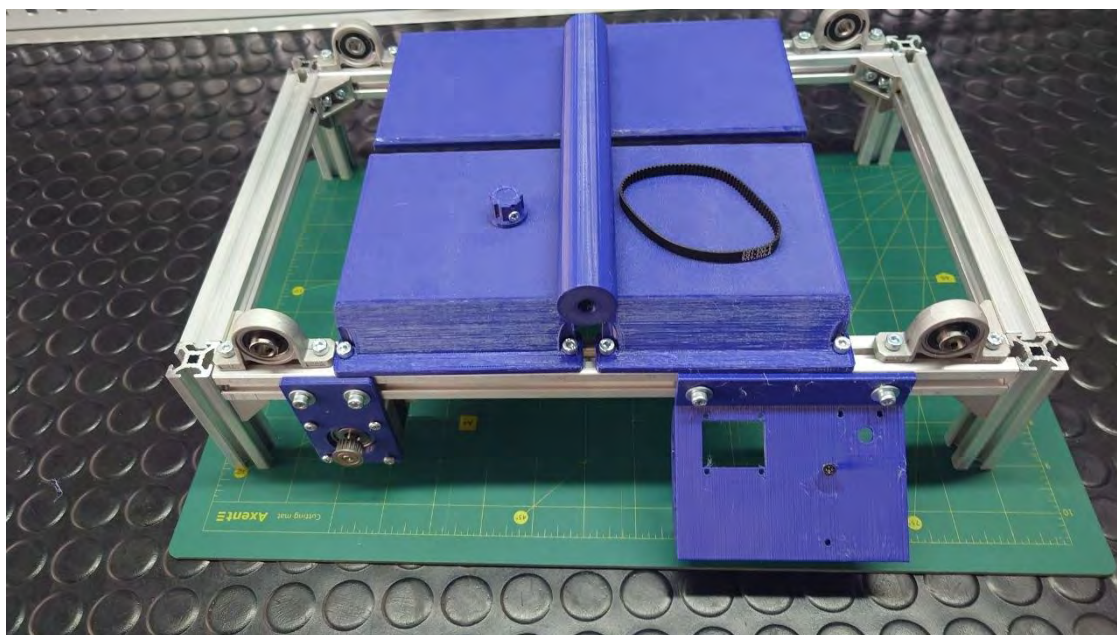


Рисунок 4.6 Частково зібраний фізичний прототип механічної частини конвеєрної лінії

Успішна фізична інтеграція кастомних надрукованих деталей із промисловим металевим профілем та стандартними електромеханічними комплектуючими повністю підтвердила правильність конструктивних рішень, закладених на етапі 3D-

модельовання. Зібрана механічна база забезпечує необхідну жорсткість конструкції, точність співвісності валів та плавність ходу, створюючи надійний апаратний фундамент для переходу до фінального етапу — розміщення електронних модулів керування, підключення підсистеми живлення та налагодження мікропроцесорного програмного забезпечення.

Висновки до розділу

У четвертому розділі було успішно виконано повний комплекс робіт із конструктивно-механічного проєктування, тривимірного комп'ютерного модельовання та фізичного збирання конструкції діючого прототипу конвеєрної лінії системи автоматизованого сортування. За результатами проведеної роботи було науково обґрунтовано вибір конструкційної основи рами на базі екструдованого алюмінієвого верстатного профілю стандарту 2020, що дозволило досягти високої просторової жорсткості, прецизійної точності геометрії та високої модульності всього каркаса на етапі прототипування. В середовищі сучасних CAD-систем здійснено тривимірне твердотільне модельовання унікальних кастомних вузлів та деталей конвеєра, серед яких спроектовано вали з внутрішнім діаметром 8 мм та розширеним зовнішнім робочим діаметром 25 мм для збільшення площі контакту й запобігання просковзуванню транспортного полотна, статичні опорні платформи підтримки стрічки для нівелювання її деформаційного провисання під навантаженням, а також фронтальну панель контролю з попередньо розрахованими монтажними отворами під елементи раніше розробленої електричної принципової схеми.

На основі детального порівняльного аналізу фізико-механічних, термічних властивостей полімерів обґрунтовано доцільність застосування адитивних технологій та обрано інженерний пластик PETG для виготовлення змодельованих спроектованих деталей методом FDM-друку. Це рішення забезпечило високу міжшарову міцність, зносостійкість та геометричну точність одержаних компонентів при мінімальних часових і фінансових витратах. Об'єднання всіх розроблених елементів у єдину цифрову тривимірну збірку дозволило успішно підтвердити сумісність вузлів, зменшити просторові колізії та перейти до практичного етапу конструювання

пристрою. Практична фізична інтеграція надрукованих деталей із промисловим металевим профілем повністю підтвердила точність конструктивних рішень, забезпечивши належну співвісність валів та плавність ходу механіки. Отримані результати сформували надійний і закінчений апаратний базис прототипу, що дозволяє повноцінно перейти до фінальних етапів роботи — остаточного монтажу електронних модулів, підключення підсистеми живлення та розробки алгоритмічного й програмного забезпечення мікроконтролера.

5 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА

Ефективність та надійність функціонування системи безпосередньо залежить від якості розробленого програмного забезпечення (ПЗ). Головним завданням цього етапу є створення логічної структури коду для мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini, яка забезпечить узгоджену взаємодію всіх апаратних модулів: зчитування даних з енкодера, виведення інформації на OLED-дисплей та прецизійну генерацію керуючих імпульсів для драйвера крокового двигуна. Програмне забезпечення базується на циклічній архітектурі з використанням апаратних переривань для обробки сигналів користувацького інтерфейсу без затримок у головному циклі.

5.1 Узагальнений алгоритм роботи системи

Узагальнений алгоритм описує базову логіку поведінки мікроконтролера від моменту подачі живлення до виконання робочих циклів конвеєра. Програма працює за принципом безперервного циклу (скінченного автомата), перемикаючись між режимом очікування (налаштування) та активним режимом роботи (транспортуванням).

На початку роботи виконується блок попереднього налагодження системи. Після цього програма переходить у головний цикл, де відбувається постійне опитування стану енкодера та його вбудованої кнопки. На основі отриманих даних мікроконтролер оновлює параметри в меню. Далі система перевіряє умову: чи була натиснута кнопка підтвердження. Якщо команда не надходила, система повертається до опитування інтерфейсу. Якщо команду отримано, конвеєр переходить в активний стан: починається безперервна генерація імпульсів для драйвера двигуна з паралельним оновленням динамічної інформації на дисплеї. Цей робочий стан триває доти, доки не буде зафіксовано повторне натискання кнопки, після чого відбувається зупинка двигуна і повернення до режиму налаштувань.

Блок-схема узагальненого алгоритму роботи системи наведена на рисунку 5.1.



Рисунок 5.1 Узагальнений алгоритм роботи системи

5.2 Алгоритм попереднього налагодження системи

Алгоритм попереднього налагодження виконується лише один раз під час запуску або апаратного скидання мікроконтролера. Його метою є правильна конфігурація всіх периферійних модулів та встановлення початкових значень змінних перед входом у головний робочий цикл.

Робота алгоритму починається з конфігурації цифрових портів введення-виведення (GPIO). Піни, що підключені до драйвера (STEP, DIR, EN), налаштовуються як виходи (Output), а піни енкодера (CLK, DT, SW) — як входи з підтяжкою (Input Pull-up). Наступним кроком ініціалізується апаратна шина I2C, необхідна для зв'язку з екраном. Після успішного підключення відбувається ініціалізація OLED-дисплея та виведення на нього стартового екрану системи сортування, що сигналізує про успішний запуск. Далі програмно встановлюється початкове значення швидкості руху конвеєра. Завершується алгоритм увімкненням глобальних переривань для пінів енкодера, що дозволить системі миттєво реагувати на дії оператора. Блок-схема алгоритму ініціалізації наведена на рисунку 5.2.



Рисунок 5.2 Алгоритм попереднього налагодження системи

5.3 Алгоритм обробки користувацького інтерфейсу (меню)

Оскільки керування системою здійснюється за допомогою інкрементального енкодера, класичне програмне опитування контактів може призвести до пропуску кроків при швидкому обертанні ручки. Тому алгоритм обробки інтерфейсу реалізовано через підпрограму обробки переривань, яка викликається апаратно при зміні логічного рівня на лінії CLK енкодера.

При вході в переривання мікроконтролер зчитує стан лінії DT для визначення напрямку обертання. Якщо зафіксовано обертання за годинниковою стрілкою (праворуч), значення цільової швидкості інкрементується. Відразу після цього спрацьовує програмний запобіжник, який перевіряє, чи не перевищила швидкість максимально допустиме значення. Якщо ж обертання відбулося проти годинникової стрілки (ліворуч), значення швидкості декрементується з аналогічною перевіркою на досягнення мінімальної межі. Після зміни параметра встановлюється логічний прапорець необхідності оновлення екрану, і мікроконтролер виходить із переривання. Такий підхід гарантує миттєву реакцію інтерфейсу та мінімальне завантаження процесорного часу.

Блок-схема алгоритму обробки користувацького інтерфейсу наведена на рисунку 5.3.

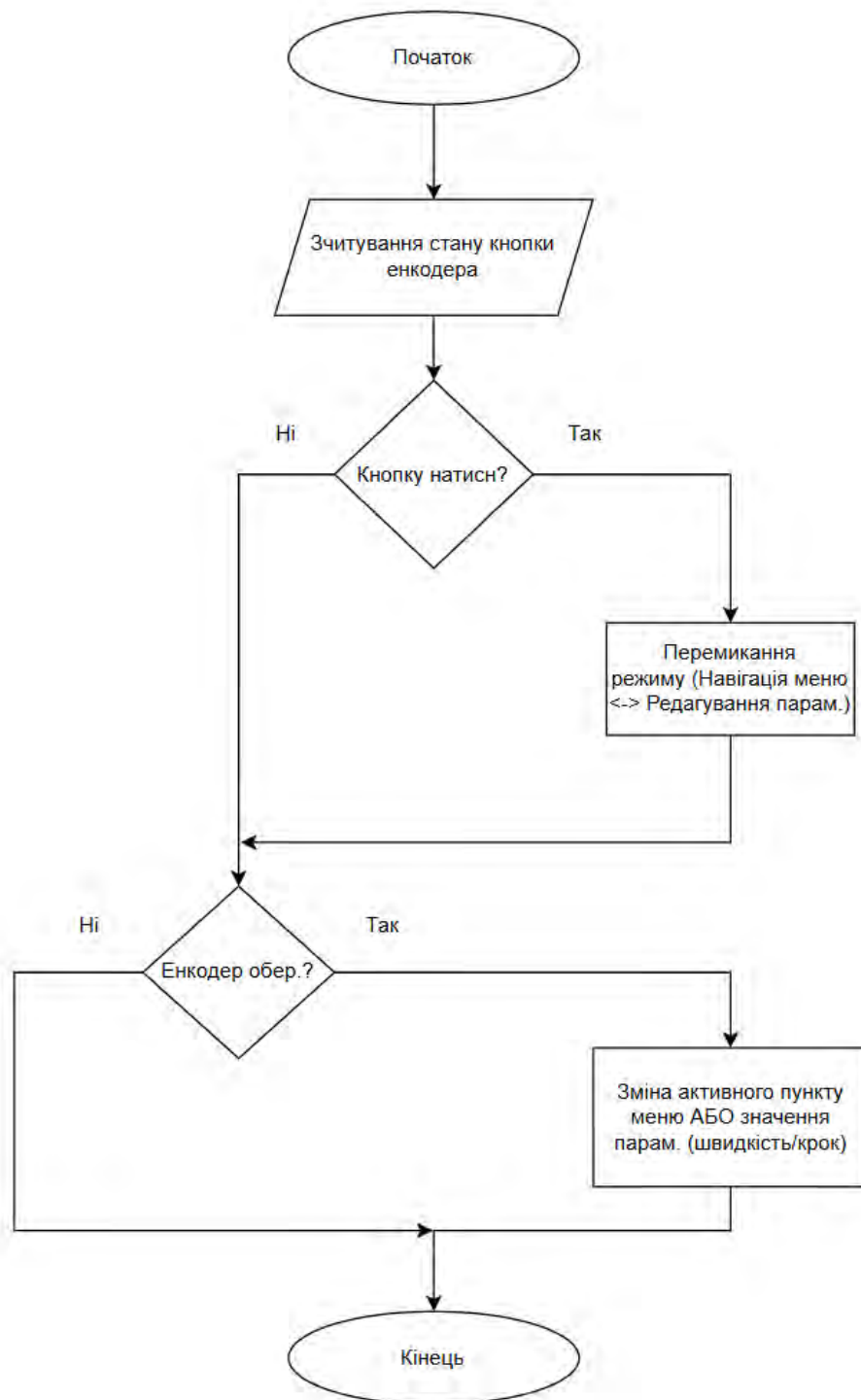


Рисунок 5.3 Алгоритм обробки користувацького інтерфейсу (меню)

5.4 Алгоритм генерації керуючих сигналів для двигуна

Цей алгоритм є критично важливим для забезпечення рівномірного та прецизійного руху транспортної стрічки. Він відповідає за формування часових інтервалів та логічних рівнів, що передаються на мікросхему драйвера A4988.

На початку циклу перевіряється глобальний стан системи. Якщо конвеєр програмно зупинений (стан неактивний), мікроконтролер подає високий логічний рівень на вивід EN драйвера, що знеструмлює обмотки двигуна та запобігає його нагріванню в режимі простою. Якщо система активна, на лінію EN подається низький рівень, що вмикає силові ключі драйвера. Далі встановлюється необхідний логічний рівень на лінії DIR для визначення напрямку руху полотна.

Сам процес виконання одного кроку ротора складається з чотирьох команд: подача високого рівня на вивід STEP; перша часова затримка; подача низького рівня на вивід STEP; друга часова затримка. Тривалість цих часових затримок є обернено пропорційною до заданої швидкості, яка була встановлена оператором через енкодер. Повторення цього алгоритму у швидкому циклі формує імпульсний сигнал, що приводить конвеєрну лінію у плавний рух. Блок-схема алгоритму генерації сигналів для двигуна наведена на рисунку 5.4.



Рисунок 5.4 Алгоритм генерації керуючих сигналів для двигуна

Висновки до розділу

У п'ятому розділі було здійснено повний комплекс робіт із розробки алгоритмічного та програмного забезпечення мікроконтролера ESP32-C3 Super Mini, призначеного для ефективного управління функціональними вузлами конвеєрної лінії сортувального комплексу. За результатами проведеного проєктування було синтезовано узагальнений алгоритм роботи системи, що реалізує логіку скінченного автомата та забезпечує стабільне переключення між режимами конфігурації

параметрів і безпосереднього транспортування об'єктів. Спроектовано логічну структуру підпрограми попереднього налагодження, яка гарантує коректну первинну конфігурацію портів введення-виведення загального призначення, ініціалізацію послідовної апаратної шини I2C та підготовку графічного OLED-дисплея до виведення службової інформації.

Для досягнення максимальної швидкості відгуку пристрою на дії оператора розроблено алгоритм обробки користувацького інтерфейсу меню на базі апаратних переривань від енкодера KY-040, що дозволило суттєво знизити обчислювальне навантаження на центральний процесор у головному циклі програми. Крім того, розроблено прецизійний алгоритм генерації керуючих сигналів для силового драйвера крокового двигуна A4988 за протоколом STEP/DIR, який забезпечує динамічне формування часових інтервалів затримок імпульсів залежно від заданої швидкості, що гарантує високу плавність ходу та точність позиціонування вантажів на транспортному полотні.

Синтезоване програмно-алгоритмічне забезпечення повністю задовольняє всі вимоги проєкту. Розроблені алгоритми утворюють цілісну та гнучку цифрову структуру керування, яка забезпечує безвідмовну координацію між обчислювальним ядром і виконавчим механізмом конвеєра, та є надійним логічним фундаментом для безпосереднього написання програмного коду й проведення фінального комплексного налагодження діючого прототипу лінії автоматизованого сортування.

На основі матеріалів даного розділу та синтезованих алгоритмічних рішень було безпосередньо розроблено фінальне програмне забезпечення, яке реалізує повноцінне керування апаратною частиною дипломного проєкту. Повний програмний код, що імплементує описану логіку роботи мікроконтролера та забезпечує виконання всіх заявлених функцій сортувального комплексу, наведено в додатку А.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було успішно та в повному обсязі вирішено важливе науково-практичне та інженерне завдання, що полягало в комплексному проєктуванні, аналітичному розрахунку, алгоритмізації та практичному виготовленні діючого апаратно-програмного прототипу конвеєрної лінії для сучасних систем автоматизованого сортування. Проведена робота охоплює повний цикл розробки від глибокого теоретичного вивчення існуючих технічних рішень до створення готового фізичного пристрою із власною мікропроцесорною системою управління. На основі всебічного критичного огляду науково-технічної літератури та джерел було сформувано та детально обґрунтовано концептуальний підхід до побудови сортувального комплексу, де як базову кінематичну архітектуру обрано стрічковий конвеєр. Це саме такий тип машин безперервного транспорту здатний забезпечити максимальну плавність ходу, високу швидкість переміщення та універсальність щодо геометричних параметрів об'єктів логістичного розподілу. Застосування тонких полімерних стрічок на основі полівінілхлориду або поліуретану дозволило закласти основу для створення високопродуктивної системи з мінімальними показниками зносу робочих поверхонь.

Практична реалізація розроблених конструктивних рішень відбувалася із залученням сучасних технологій комп'ютерного твердотілого моделювання та передових методів швидкого прототипування. Створення повної цифрової тривимірної збірки конвеєра в CAD-середовищі дозволило провести фінальний просторовий аналіз конструкції, оптимізувати взаємне розташування вузлів і повністю усунути просторові колізії або перетини рухомих та статичних елементів до початку виробничого етапу. Фізичну раму пристрою було побудовано на базі легкого екструдованого алюмінієвого верстатного профілю, що гарантувало високу просторову жорсткість, модульність та бездоганну геометричну точність каркаса. Для виготовлення унікальних кастомних елементів складної геометричної конфігурації, таких як привідний і ведений вали, опорні слайдерні платформи підтримки стрічки та фронтальна інтегрована панель контролю, було науково обґрунтовано та успішно

застосовано адитивні технології. Використання методу пошарового наплавлення матеріалу інженерним пластиком PETG забезпечило виняткову міжшарову адгезію, високу стійкість до ударних та вібраційних навантажень, хімічну інертність та достатню термостійкість вузлів, що контактують із нагрітими елементами приводу, суттєво знизивши фінансові та часові витрати на виробництво.

Завершальним логічним блоком програмно-алгоритмічного забезпечення став прецизійний алгоритм генерації імпульсів керування для силового драйвера A4988 за протоколом STEP/DIR. Цей алгоритм відповідає за динамічне та суворе формування часових інтервалів затримок логічних рівнів, що транслуються на обмотки крокового двигуна стандарту NEMA 17. Завдяки програмній оптимізації цих мікросекундних затримок було досягнуто виняткової плавності ходу, рівномірності руху транспортної стрічки та реалізовано можливість точного та гнучкого регулювання лінійної швидкості конвеєра безпосередньо оператором у реальному часі.

Створений в результаті виконання дипломного проєкту діючий фізичний прототип конвеєрної лінії продемонстрував повну відповідність усім висунутим на початкових етапах інженерно-технічним, експлуатаційним та економічним вимогам. Комплексна інтеграція жорсткої металевої рами, міцних деталей адитивного виробництва, точної механіки та інтелектуального мікроконтролерного управління дозволила отримати монолітну, стабільну та енергоефективну систему. Розроблена апаратно-програмна платформа має високий рівень гнучкості та модернізаційного потенціалу, що робить її повністю готовою до подальшого промислового масштабування та безперешкодної інтеграції в складніші багаторівневі автоматизовані логістичні комплекси шляхом майбутнього впровадження систем комп'ютерного зору, лазерних сканерів розпізнавання штрих-кодів та виконавчих сортувальних шлюзів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] ДСТУ EN 755-2:2018 (EN 755-2:2016, IDT). Алюміній та алюмінієві сплави. Пресований пруток/стрижень, труба та профіль. Частина 2. Механічні властивості. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
- [2] ДСТУ EN 755-9:2018 (EN 755-9:2016, IDT). Алюміній та алюмінієві сплави. Пресований пруток/стрижень, труба та профіль. Частина 9. Профілі. Допуски на розміри та форму. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
- [3] ДСТУ EN ISO/ASTM 52900:2024 (EN ISO/ASTM 52900:2021, IDT; ISO/ASTM 52900:2021, IDT). Адитивне виробництво. Основні принципи. Термінологія. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
- [4] ДСТУ EN ISO/ASTM 52910:2020 (EN ISO/ASTM 52910:2019, IDT; ISO/ASTM 52910:2018, IDT). Адитивне виробництво. Проектування. Вимоги, настанови та рекомендації. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
- [5] Драйвер шагового двигателя A4988 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/dravver-shagovogo-dvigatelya-a4988>
- [6] Зеркалов Д. В. Підйомно-транспортні машини: довідник. – Київ : Основа, 2012. – 460 с.
- [7] Іванченко Ф. К. Підйомно-транспортні машини : підручник. – Київ : Вища школа, 1993. – 413 с.
- [8] 0.96" 7pin 128X64 OLED Display Module (White) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://littlebirdelectronics.com.au/products/0-96-7pin-128x64-oled-display-module-white>
- [9] 11mm Size Metal Shaft Encoder (EC11 Series) [Електронний ресурс] // Alps Alpine. – Режим доступу: <https://tech.alpsalpine.com/e/products/detail/EC11E15244G1>
- [10] 17PM-H005-P2VA Stepping Motor Datasheet [Електронний ресурс] // MinebeaMitsumi. – Режим доступу: <https://product.minebeamitsumi.com/en/product/category/rotary/steppingmotor/hybrid/parts/17PMK4218.pdf>
- [11] 17PM-H005-P2VA Stepping Motor Datasheet [Електронний ресурс] // RadioRadar. – Режим доступу: https://www.radioradar.net/datasheet_search/1/7/P/17PM-H005-P2VA_Minebea.pdf.html
- [12] A4988 Datasheet (DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection) [Електронний ресурс] // Allegro MicroSystems. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/455036/ALLEGRO/A4988.html>

- [13] All3DP. PLA vs ABS vs PETG: 3D Printer Materials Compared [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>
- [14] ESP32-C3 SuperMini Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dl.artronsshop.co.th/ESP32-C3%20SuperMini%20datasheet.pdf>
- [15] Fayed M. E., Skocir T. Mechanical Conveyors: Selection and Operation. – Technomic Publishing Company, 1997. – 518 p.
- [16] KY-04 Rotary Encoder Pinout, Features, Datasheet & Working [Електронний ресурс] // Components101. – Режим доступу: <https://components101.com/modules/KY-04-rotary-encoder-pinout-features-datasheet-working-application-alternative>
- [17] McGuire P. M. Conveyors: Application, Selection, and Integration. – CRC Press, 2009. – 232 p.
- [18] Pololu A4988 Stepper Motor Driver Carrier [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [19] Prusa Research. Material Guide (PLA, ABS, PETG) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://help.prusa3d.com/materials>
- [20] Simplify3D. Ultimate 3D Printing Materials Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>
- [20] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.
- [21] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [22] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [23] Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

[24] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

[25] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

[26] Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.

ДОДАТКИ

Надаються за зверненням до авторів