Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно–інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Розроблення демонстраційного стенду "Промисловий конвеєр"
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи _ АКТСІ-22-1
Станіслав СКРИННИК
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Скринник Станіслав Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"4" Липня 2026 р.  Станіслав СКРИННИК

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматизації, комп'ютерно−інтегрованих технологій та систем
Кафедра Комп'ютерно−інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАРБІ _____
(підпис)
« ___»_____2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Скриннику Станіславу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення демонстраційного стенду "Промисловий конвеєр"
Затверджена наказом по університету від 04.06 2026 р. №473 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 13.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Мікроконтролер Arduino nao;
3.2 Застосування сервоприводів для скидання об'єктів з конвеєрної стрічки;
3.3 Драйвер A4988 для керування кроковим двигуном;
3.4 Габаритні розміри стенду: 500x300x150 мм^3;
3.5 Напруга живлення 12 В.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз технічного завдання;
4.3 Розроблення архітектури та принципу роботи автоматизованої системи;
4.4 Розрахунок та вибір елементів конструкції демонстраційного стенду;
4.5 Моделювання демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Аналіз технічного завдання	05.06 – 10.06.26	виконано
2	Розроблення архітектури та принципу роботи автоматизованої системи	12.06 – 18.06.26	виконано
3	Розрахунок та вибір елементів конструкції демонстраційного стенду	20.06 – 22.06.26	виконано
4	Розробка програмного забезпечення та налаштування середовища виконання	23.06 – 24.06.26	виконано
5	Моделювання демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра	30.06 – 2.07.26	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Подання роботи на рецензію		
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 19.05.2026 р.

Здобувач _____ Станіслав СКРИННИК
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85 с., 5 табл., 41 рис., 2 додатки, 14 джерел.

КОНВЕЄР, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ СТЕНД, ARDUINO, СОРТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ, 3Д-МОДЕЛЮВАННЯ, ДРАЙВЕР, ПІД-РЕГУЛЯТОР.

Об’єкт розробки – процес автоматичного сортування та транспортування виробів на промислових конвеєрних лініях в системах гнучкого автоматизованого виробництва.

Предмет розробки – демонстраційний навчальний стенд промислового конвеєра з автоматичним сортуванням деталей між двома зонами накопичення.

Мета роботи – розроблення моделі демонстраційного навчального стенду промислового конвеєра з автоматичним сортуванням деталей для забезпечення наочної демонстрації принципів функціонування автоматизованих виробничих систем у навчальному процесі.

В роботі проведено аналіз аналогічних демонстраційних стендів та розроблено структурну схему автоматизованої системи керування промисловим конвеєром, побудовану за ієрархічним принципом. Спроектовано панель керування з елементами індикації та кнопками керування режимами роботи. Описано алгоритм автоматичного сортування деталей між двома лініями накопичення з почерговим розподілом потоку виробів та автоматичною зупинкою після досягнення заданого ліміту. Розроблено тривимірну модель конструкції стенду, а також виконано симуляцію електричної схеми, що дозволило підтвердити працездатність розробленої системи керування до виготовлення фізичного макета.

ABSTRACT

Explanatory note: 85 p., 5 tabl., 41 fig., 2 adj., 14 sources.

CONVEYOR, STEPPER MOTOR, DEMONSTRATION STAND, ARDUINO, PARTS SORTING, 3D MODELLING, DRIVER, PID CONTROLLER

The object of development is the process of automatic sorting and transportation of products on industrial conveyor lines in flexible automated manufacturing systems.

The subject of development is a demonstration educational stand of an industrial conveyor with automatic sorting of parts between two accumulation zones.

The purpose of the work is to develop a model of a demonstration educational stand of an industrial conveyor with automatic parts sorting to provide a visual demonstration of the operating principles of automated manufacturing systems in the educational process.

The work presents an analysis of similar demonstration stands and develops a structural diagram of an automated control system for an industrial conveyor, built on a hierarchical principle. A control panel with indication elements and mode control buttons has been designed. The algorithm for automatic sorting of parts between two accumulation lines with alternating distribution of the product flow and automatic shutdown upon reaching a preset limit has been described. A three-dimensional model of the stand structure has been developed, and a simulation of the electrical circuit has been carried out, which confirmed the operability of the developed control system prior to the fabrication of the physical prototype.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз технічного завдання 12
1.1 Аналіз аналогічних рішень 12
1.2 Аналіз конструктивних особливостей рухомих елементів конвеєреів ... 17
1.3 Висновки та постановка задачі 23
2 Розроблення архітектури та принципу роботи автоматизованої системи 25
2.1 Розроблення структурної схеми автоматизованої системи управління демонстраційним стендом промислового конвеєра 25
2.2 Розроблення модулю індикації та керування 29
2.3 Опис алгоритму роботи стенду в демонстраційному режимі 33
3 Розрахунок та вибір елементів конструкції демонстраційного стенду 39
3.1 Розрахунок механізму конвеєрної лінії 39
3.2 Розрахунок автоматизованої системи керування конвеєрною лінією 43
3.3 Вибір електронних компонентів демонстраційного стенду промислового конвеєру 51
4 Моделювання демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра 61
4.1 Моделювання елементів конструкції демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра 61
4.2 Моделювання роботи електричної частини демонстраційного стенду .. 69
4.3 Опис роботи програми керування демонстраційним стендом промислового конвеєра 72
4.4 Питання охорони праці при роботі з демонстраційним стендом промислового контролера 79
Висновки 82
Перелік джерел посилання 84

Додаток А Вихідний код програми 86
Додаток Б Демонстраційний матеріал 99

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДБН – Державні будівельні норми;

ДСанПіН – Державні санітарні правила і норми;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ПВХ – полівінілхлорид;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

ПЛК – програмований логічний контролер;

МО – модульний оптимум;

CAD – Computer-Aided Design (автоматизоване проєктування);

IGES – Initial Graphics Exchange Specification (специфікація обміну графічними даними);

IMS – Industrial Mechatronics System (промислова мехатронна система);

ISO – International Organization for Standardization (Міжнародна організація зі стандартизації);

HTD – High Torque Drive (високомоментний зубчастий ремінний привід);

PTC – Parametric Technology Corporation (корпорація Parametric Technology);

STL – Standard Tessellation Language (стандартний формат триангуляції поверхонь);

TTL – Transistor-Transistor Logic (транзисторно-транзисторна логіка);

USB – Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина).

ВСТУП

Сучасний розвиток промислового виробництва характеризується широким впровадженням автоматизованих конвеєрних систем з функціями автоматичного сортування, транспортування та обліку виробів. Підготовка кваліфікованих фахівців у галузі автоматизації, мехатроніки та промислової інженерії вимагає наявності відповідної навчально-лабораторної бази, що дозволяє наочно демонструвати принципи функціонування таких систем та формувати у студентів практичні навички проектування і налагодження автоматизованого обладнання. Демонстраційні навчальні стенди промислового конвеєра є ключовими засобами такої підготовки, оскільки відтворюють у зменшеному масштабі реальні виробничі процеси з усіма характерними для них задачами керування.

Мета роботи – розроблення моделі демонстраційного навчального стенду промислового конвеєра з автоматичним сортуванням деталей для забезпечення наочної демонстрації принципів функціонування автоматизованих виробничих систем у навчальному процесі.

Об’єкт розробки – процес автоматичного сортування та транспортування виробів на промислових конвеєрних лініях в системах гнучкого автоматизованого виробництва.

Предмет розробки – демонстраційний навчальний стенд промислового конвеєра з автоматичним сортуванням деталей між двома зонами накопичення.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

– аналіз існуючих аналогічних демонстраційних стендів та визначення вимог до розроблюваного пристрою;

– розроблення структурної схеми автоматизованої системи керування та алгоритму сортування деталей;

– синтез системи автоматичного керування швидкістю крокового двигуна з розрахунком ПІД-регулятора методом модульного оптимуму;

– проектування тривимірної моделі конструкції стенду в середовищі CAD-системи Creo Elements/Direct Modeling Express;

– розроблення програмного забезпечення модуля керування на базі мікроконтролера Arduino Nano та верифікація його працездатності шляхом симуляції в середовищі Wokwi;

− оформити кваліфікаційну роботу згідно з вимогами [1], ДСТУ 3008:2015 [2,3] та методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» [4].

Тема кваліфікаційної роботи відповідає Цілям сталого розвитку України, зокрема, Цілі 8. Гідна праця та економічне зростання. Рішення завдань кваліфікаційної роботи сприяє підвищенню ефективності виробництва на засадах сталого розвитку та розвитку високотехнологічних конкурентних виробництв, що забезпечує виконання п. 8.2.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз аналогічних рішень

Демонстраційні навчальні стенди промислового конвеєра є ключовими засобами підготовки фахівців у галузі автоматизації, мехатроніки та промислової інженерії. Аналіз існуючих аналогічних рішень дозволяє визначити загальні підходи до проєктування подібних пристроїв, їх функціональні можливості та методичну спрямованість.

Одним із найбільш відомих і широко використовуваних у світовій освітній практиці є навчальний комплекс MecLab компанії Festo Didactic (Німеччина) [5]. Комплекс MecLab складається з трьох станцій – магазину-накопичувача, конвеєра та маніпулятора – які є спрощеними моделями типових процесів будь-якого автоматизованого виробничого підприємства (рис. 1.1).

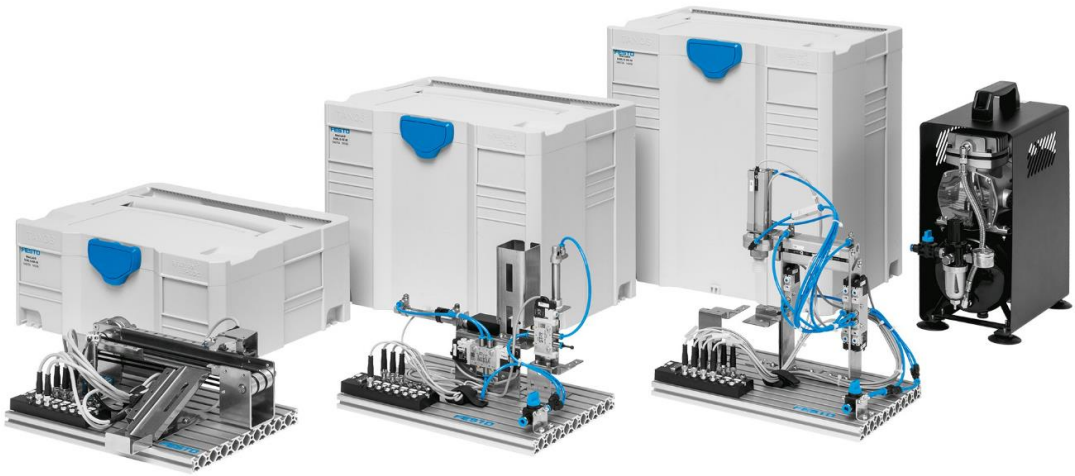


Рисунок 1.1 – Склад навчального комплексу MecLab компанії Festo Didactic

Метою MecLab є надання студентам можливості вивчати практичні та теоретичні аспекти технології автоматизації. Система складається з трьох окремих установок, які можна використовувати як у комплексі, так і

автономно. Станція конвеєра забезпечує транспортування та сортування виробів, а станція маніпулятора здійснює захоплення виробів і їх переміщення у визначені точки. На рисунку 1.2 показано зовнішній вигляд навчального конвеєра.

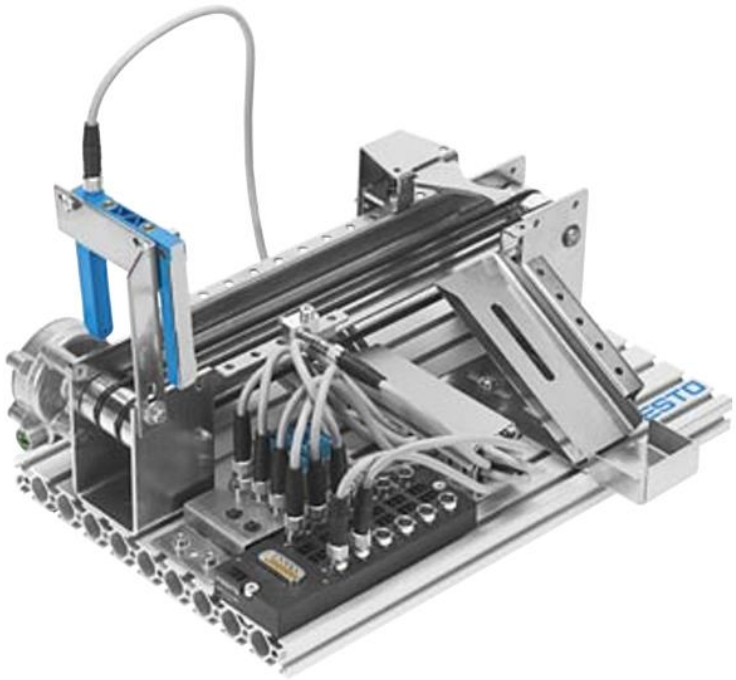


Рисунок 1.2 – зовнішній вигляд навчального конвеєра від фірми Festo Didactic

До технологій автоматизації, що є частиною системи MecLab, входять пневматика, програмно-логічне керування (ПЛК), сенсорні технології, релейне керування, основи електрики та керування двигунами постійного струму.

Основні елементи макету промислового конвеєру у вигляді ескізу показані на рисунку 1.3.

Станція конвеєра оснащена двигуном постійного струму, індуктивними датчиками, оптичними датчиками (фотоелементами) та електромагнітним стопором-відхилювачем, що дозволяє виявляти, класифікувати та сортувати вироби за кольором:

– оптичний сенсор (1) призначений для виявлення деталей на конвеєрі;

– двигун постійного струму з редуктором (2), що приводить в рух конвеєрну стрічку;

– реле (3) виконує команди від ПЛК;

– пневматичний розподільник (4);

– електромагніт із важелем (5) використовується для розподілення потоку деталей;

– індуктивний датчик (6) для визначення металевих деталей, що рухаються конвеєрною стрічкою;

– жолоб для скочування деталей (7) завдяки якому виконується функція розподілення потоку деталей;

– кабельний короб (8) для укладання інформаційних дротів.

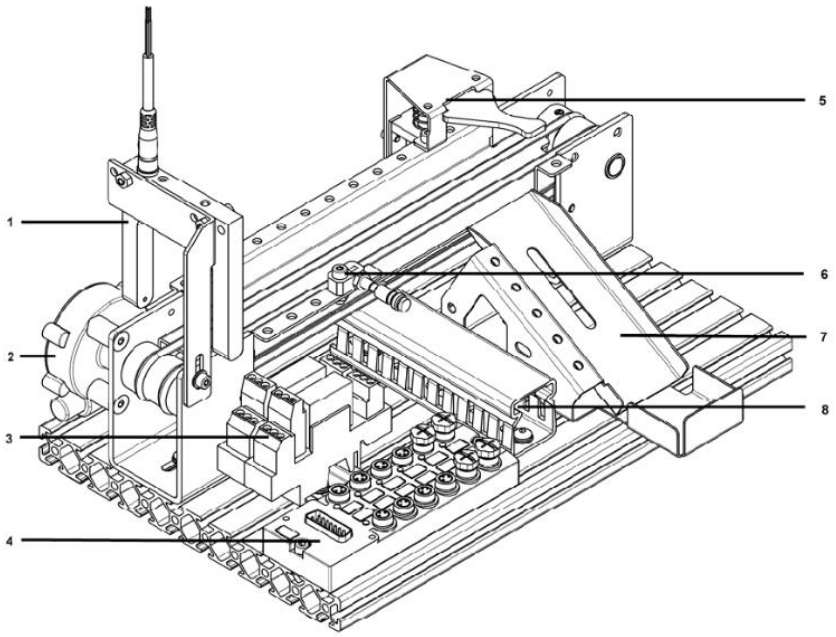


Рисунок 1.3 – Основні елементи макету промислового конвеєру

Завдяки відкритій архітектурі MecLab може поєднуватися з іншими технологіями, включаючи ПЛК, датчики та навіть коботи, а самі станції можуть з'єднуватися між собою для утворення складних виробничих ліній. Навчально-методичне забезпечення комплексу включає програмне

середовище FluidSIM, яке дозволяє проводити симуляцію схем безпосередньо перед їх фізичним тестуванням на стенді. Офіційний сайт виробника [6].

Іншим прикладом демонстраційних стендів є навчальна система Lucas-Nülle MEC 11 «Modular conveyor belt technology training system» [7].



Рисунок 1.4 – Навчальний стенд від компанії Lucas-Nülle

Компанія Lucas-Nülle пропонує модульну систему навчання технології конвеєрних стрічок MEC 11, яка є складовою ширшого напрямку навчального обладнання з автоматизації та промисловості 4.0.

Система побудована на принципі модульності, що дозволяє поступово нарощувати складність навчальних завдань відповідно до рівня підготовки студентів. Технічні знання та рішення з промислових застосувань інтегруються в модульні навчальні системи Lucas-Nülle, які включають апаратну частину та інтерактивні мультимедійні курси, забезпечуючи практичні знання через USB-інтерфейс для прямого керування апаратурою з мультимедійного курсу.

Іншим представником навчальних стендів промислової автоматизації є система IMS (Industrial Mechatronics System) (рис. 1.5).

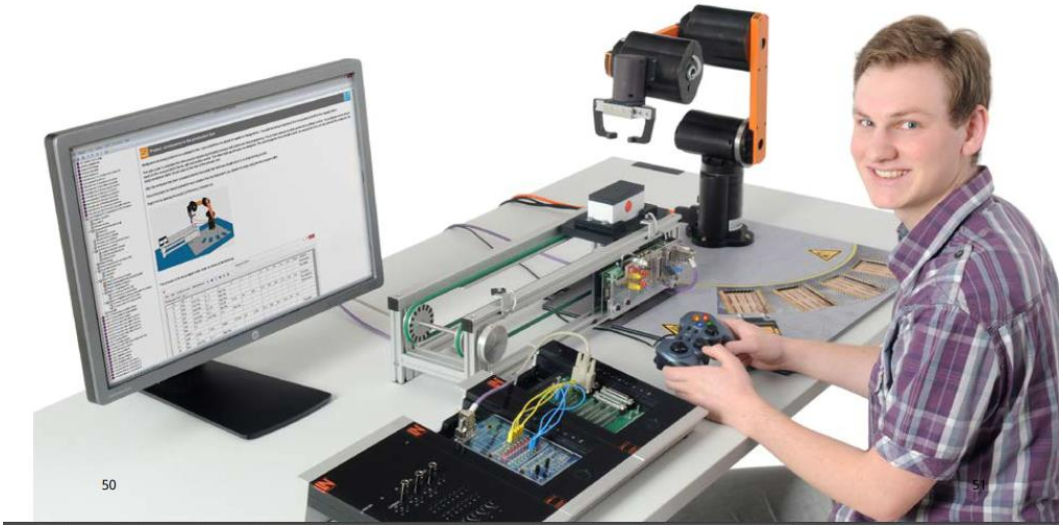


Рисунок 1.5 – Макет промислового конвеєра IMS

За допомогою системи IMS можна симулювати промислові автоматизовані виробничі лінії у всій їх різноманітній складності. Завдяки модульній конструкції система підходить для розширення і може адаптуватися до потреб студентів, розвиваючись відповідно до їхнього прогресу, а безпосереднє з'єднання між системою керування та конвеєрною стрічкою забезпечує швидке та зручне введення в експлуатацію [8].

До складу IMS входять підсистеми сортування (IMS 3), складання (IMS 4), обробки (IMS 5), контролю (IMS 6), маніпулювання (IMS 7) та зберігання (IMS 8), які можуть бути об'єднані у гнучкі виробничі лінії різної конфігурації.

Порівняльний аналіз розглянутих рішень свідчить про те, що сучасні демонстраційні навчальні стенди промислового конвеєра, як правило, поєднують у собі:

– механічну підсистему транспортування;

– підсистему датчиків (індуктивні, оптичні, кольорові датчики);

– підсистему виконавчих механізмів (електродвигун, пневматичні циліндри, сортувальні відхилювачі);

– підсистему програмного керування на базі ПЛК або мікроконтролера. Сучасний навчальний стенд є модульною системою, що дозволяє створювати

стенд під конкретні навчальні завдання, змінювати його структуру та розширювати функціонал. Принцип модульності є спільною рисою переважної більшості розглянутих рішень і визначає напрям проєктування розроблюваного демонстраційного стенду «Промисловий конвеєр».

1.2 Аналіз конструктивних особливостей рухомих елементів конвеєреів

Відповідно до конструктивних ознак та характеру взаємодії рухомих елементів з вантажем, промислові конвеєри поділяються на кілька основних груп. В основу класифікації покладено тип тягового та вантажонесучого органу, оскільки саме ці елементи визначають принцип роботи всієї системи. Згідно з ДСТУ та міжнародними стандартами ISO, конвеєри поділяють на: стрічкові, пластинчасті, роликові, скребкові, шнекові, ланцюгові, вібраційні та підвісні [9].

1.2.1 Стрічковий конвеєр

Конвеєрна стрічка є найпоширенішим тяговим і вантажонесучим органом у сучасній промисловості (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Стрічковий конвеєр

Стрічка являє собою нескінченний гнучкий носій, що рухається між ведучим і веденим барабанами по системі підтримувальних роликів. Стрічки виготовляються з гуми, ПВХ, поліуретану, металевих сіток або тканинних матеріалів залежно від умов застосування. Гумотканинні стрічки мають один або кілька прокладочних шарів із поліаміду чи поліефіру, що забезпечують необхідну міцність на розтяг. Основними перевагами стрічкового тягового органу є висока продуктивність (до 10 000 т/год для масових вантажів), плавність ходу, можливість транспортування вантажів на значні відстані (до кількох кілометрів), а також невисокий рівень шуму під час роботи.

1.2.2 Пластини та настили

Пластинчасті конвеєри [10] використовують як вантажонесучий орган жорсткі металеві або полімерні пластини (настил), закріплені на одному або двох паралельних тягових ланцюгах (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Приклад пластинчастого конвеєра

Ця конструкція дозволяє транспортувати важкі, гострокутні, гарячі або хімічно агресивні вантажі, які були б непридатні для стрічкових конвеєрів. Пластини можуть мати плоску, коритоподібну або ребристу форму, що

забезпечує надійне утримання вантажу на похилих ділянках. Пластинчасті конвеєри широко застосовуються в металургійній, гірничодобувній, ливарній та хімічній промисловості.

1.2.3 Ролики та роликові секції

Роликовий конвеєр (рольганг) є одним із найпростіших і найнадійніших видів транспортувального обладнання [11]. Рухомими елементами у ньому є ролики – циліндричні деталі, що обертаються навколо нерухомих осей і переміщують вантаж за рахунок сили тертя між поверхнею вантажу та роликами (рис. 1.8).

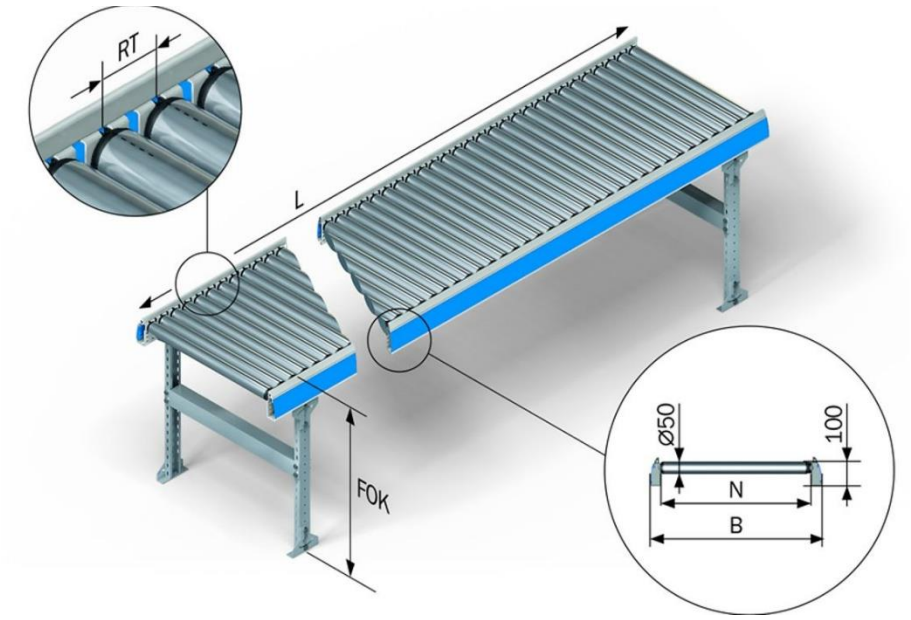


Рисунок 1.8 – Приклад конструкції роликового конвеєра

Ролики можуть бути гравітаційними (обертаються від ваги вантажу) або привідними (з'єднані з двигуном через ланцюгову, ремінну або зубчасту передачу). У сучасних логістичних та складських системах широко використовуються електромеханічні ролики з вбудованим мотор-редуктором, що дозволяє реалізувати зонне керування швидкістю і режимами транспортування. Діаметр роликів зазвичай становить від 30 до 220 мм залежно від маси і габаритів вантажу.

1.2.4 Скребки

Скребковий конвеєр транспортує вантаж за допомогою скребків – жорстких поперечних елементів (планок), закріплених на одному або двох нескінченних ланцюгах [12]. Скребки пересуваються по жолобу (риштаку) і проштовхують або тягнуть вантаж уздовж нього (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Конструкція скребкового конвеєра

Ця конструкція є особливо ефективною для транспортування дрібнозернистих, пилоподібних або пастоподібних матеріалів, зокрема вугілля, золи, цементу, кормів, тирси. Скребки виготовляються зі зносостійкої сталі або полімерних матеріалів, а їх форма і розміри підбираються відповідно до типу вантажу та геометрії жолоба. Скребкові конвеєри відрізняються компактністю, здатністю до транспортування в герметичному кожусі та можливістю роботи під великими кутами нахилу.

1.2.5 Шнек (гвинтовий елемент)

Шнековий (гвинтовий) конвеєр здійснює переміщення матеріалу за допомогою обертового гвинта (шнека), розміщеного всередині циліндричного або коритоподібного корпусу [13]. Шнек являє собою вал із навиненою на

нього спіральною лопаттю. Під час обертання шнека матеріал, що знаходиться між витками, переміщується в осьовому напрямку (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Конструкція шнекового конвеєра

Шнекові конвеєри широко застосовуються для транспортування порошкоподібних, зернистих і в'язких матеріалів: борошна, цементу, шламу, хімічних реагентів. До переваг шнекового транспортування належать герметичність процесу, компактність конструкції та можливість суміщення функцій транспортування і змішування. Кут нахилу шнекових конвеєрів може досягати 90°, що дозволяє реалізувати вертикальне підняття матеріалу.

1.2.6 Ланцюги та тягові ланцюгові системи

Тягові ланцюги є ключовими рухомими елементами у ланцюгових конвеєрах різних типів. Вони являють собою нескінченні ланцюгові контури, до яких прикріплені вантажонесучі органи (пластини, скребки, каретки, гаки) [14]. Ланцюги виготовляються зі сталі і мають різну конструкцію: пластинчасті, вільцеві, катково-втулкові, зубчасті. Катково-втулкові ланцюги найбільш поширені завдяки низькому коефіцієнту тертя при зачепленні зі зірочкою та тривалому ресурсу роботи (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Приклад конструкції ланцюгового конвеєра

Ланцюгові конвеєри забезпечують стабільний рух вантажів у важких умовах: при значних ударних навантаженнях, підвищеній температурі або агресивному середовищі.

1.2.7 Порівняльна характеристика рухомих елементів конвеєрів

З метою системного узагальнення наведеної інформації у таблиці 1.1 представлено порівняльну характеристику основних типів рухомих елементів промислових конвеєрів за ключовими показниками.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика рухомих елементів конвеєрів

Тип конвеєра	Режим руху	Продуктивність	Типові вантажі
Стрічковий	Безперервний	Висока; до 10 000 т/год	Сипкі матеріали, штучні вироби
Пластинчастий	Безперервний	Середня; до 2 000 т/год	Важкі, гарячі, абразивні вироби

Продовження таблиці 1.1

Тип конвеєра	Режим руху	Продуктивність	Типові вантажі
Роликовий	Безперервний / імпульсний	Середня; до 500 т/год	Штучні вироби, ящики, піддони
Скребковий	Безперервний	Середня; до 800 т/год	Дрібні сипкі та пастоподібні матеріали
Шнековий	Безперервний	Низька; до 100 т/год	Порошкоподібні та в'язкі матеріали
Ланцюговий	Безперервний / пульсуючий	Середня; до 1 000 т/год	Великогабаритні та важкі вироби

1.3 Висновки та постановка задачі

Проведений аналіз аналогічних рішень та видів рухомих елементів промислових конвеєрів дозволяє зробити такі висновки.

По-перше, різноманітність конструктивних рішень рухомих елементів відображає широкий спектр технологічних завдань транспортування вантажів у сучасному виробництві. Кожен тип рухомого елемента – стрічка, ролик, пластина, скребок, шнек, ланцюг, вібруючий лоток або підвісна каретка – має чітко визначену галузь застосування, зумовлену фізичними властивостями вантажу, необхідною продуктивністю та умовами виробничого середовища.

По-друге, розроблення демонстраційних навчальних стендів промислового конвеєра потребує врахування принципів роботи основних типів рухомих елементів, що дозволить студентам отримати комплексне уявлення про функціонування реальних автоматизованих систем транспортування.

Таким чином, в подальшій роботі потрібно:

– розробити структуру демонстраційного стенду;

– описати алгоритм роботи демонстраційного стенду;

– обрати компоненти для реалізації демонстраційного стенду;

– розробити програму, що реалізує функції управління демонстраційним стендом.

2 РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розроблення структурної схеми автоматизованої системи управління демонстраційним стендом промислового конвеєра

Структурна схема автоматизованої системи управління демонстраційним стендом промислового конвеєра показана на рисунку 2.1 і відображає основні функціональні блоки системи та їх взаємозв'язки.

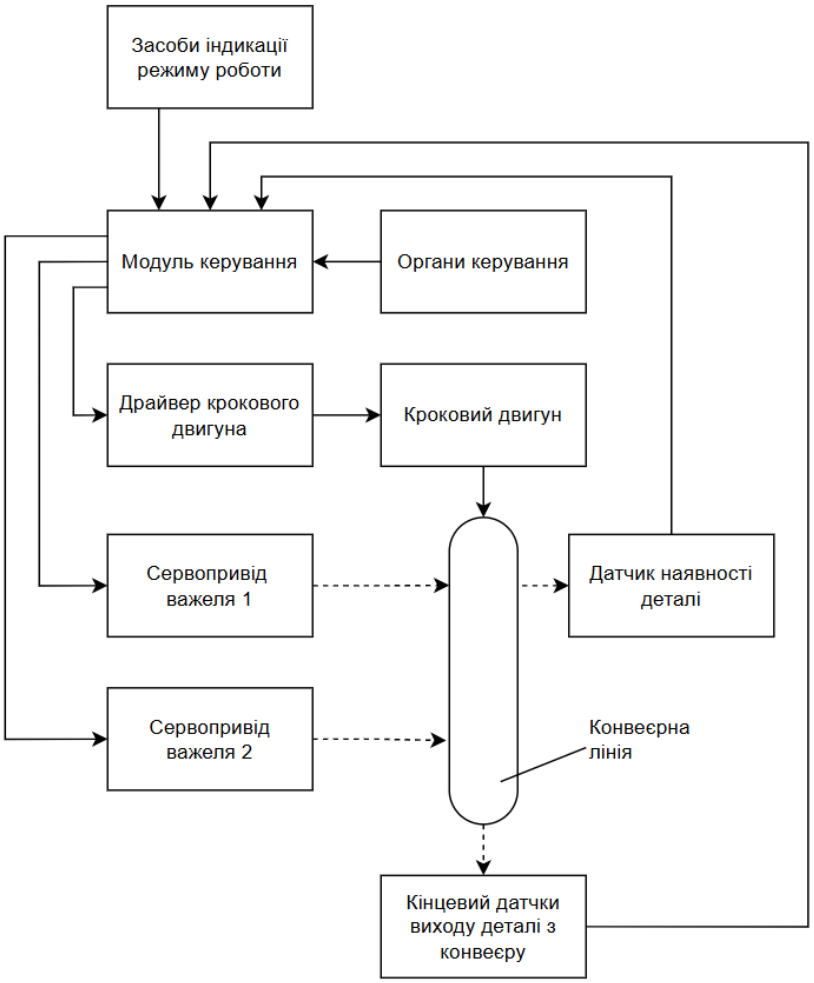


Схема побудована за ієрархічним принципом, де центральним елементом виступає модуль керування, який координує роботу всіх підсистем стенду.

Засоби індикації режиму роботи розташовані на верхньому рівні структурної схеми і призначені для візуалізації поточного стану системи. Цей блок забезпечує оператора інформацією про активний режим роботи конвеєра (автоматичний, ручний, налагоджувальний), стан окремих вузлів та наявність аварійних ситуацій. Індикація може бути реалізована за допомогою світлодіодів різного кольору або цифрового дисплея, що дозволяє оперативно контролювати процес сортування без підключення до комп'ютера. Опис блоку індикації та вибір компонентів буде виконано в наступному розділі.

Модуль керування є центральним елементом системи, який виконує функції обробки сигналів від датчиків, прийняття рішень щодо траєкторії руху деталей та формування керуючих команд для виконавчих механізмів. У даному проєкті використовується мікроконтролерна платформа Arduino, яка забезпечує достатню обчислювальну потужність для реалізації алгоритмів керування в реальному часі. Модуль керування постійно опитує стан датчиків, аналізує положення деталей на конвеєрі та синхронізує роботу приводу конвеєра із серводвигунами важелів.

Органи керування представляють собою інтерфейс взаємодії оператора з системою. Через цей блок здійснюється запуск і зупинка конвеєра, вибір режиму роботи, налаштування параметрів сортування та аварійне вимикання у випадку небезпечних ситуацій. Органи керування формують команди, які надходять до модуля керування для подальшої обробки та виконання.

Драйвер крокового двигуна забезпечує перетворення керуючих сигналів від модуля керування у послідовність імпульсів, необхідних для обертання крокового двигуна. Драйвер виконує функції підсилення сигналів, розподілу струму по обмотках двигуна та реалізації мікрокрокового режиму для забезпечення плавності руху конвеєрної стрічки. Це дозволяє точно контролювати швидкість переміщення деталей та забезпечувати їх стабільне позиціонування перед сортувальними важелями.

Кроковий двигун є виконавчим механізмом приводу конвеєрної стрічки. Використання крокового двигуна обумовлено необхідністю точного контролю

швидкості та позиції деталей на конвеєрі. В даному проєкті застосовується двигун типорозміру NEMA 17, який забезпечує достатній крутний момент для переміщення деталей (пластикових шайб діаметром 40 мм та висотою 20 мм). Крековий двигун обертає ведучий барабан конвеєра, приводячи в рух стрічку з постійною заданою швидкістю.

Серводвигуни важелів 1 та 2 виконують функції виконавчих механізмів сортувальної системи. Кожен серводвигун керує положенням відповідного важеля, який може перекривати або відкривати траєкторію руху деталі. При отриманні команди від модуля керування серводвигун повертає важіль на заданий кут (45 градусів), створюючи перешкоду на шляху деталі. Використання серводвигунів забезпечує високу швидкість спрацювання та точність позиціонування важелів, що критично важливо для коректного розподілу деталей між різними лініями накопичення.

Датчик наявності деталі є ключовим елементом системи автоматичного керування, який забезпечує виявлення пластикових шайб на конвеєрній стрічці. Датчик працює на інфрачервоному принципі з діапазоном виявлення перешкод від 2 до 30 см, що дозволяє надійно фіксувати момент підходу деталі до зони сортування. Сигнал від датчика надходить до модуля керування, який на основі попередньо заданого алгоритму приймає рішення про напрямок відправлення деталі.

Конвеєрна лінія представляє собою механічну частину транспортної системи, яка забезпечує переміщення деталей від зони завантаження до сортувальних важелів. Конвеєрна стрічка приводиться в рух крековим двигуном через систему передачі, що забезпечує рівномірне і стабільне переміщення шайб. Ширина та довжина конвеєрної лінії підібрані таким чином, щоб забезпечити достатній час для спрацювання датчика та позиціонування важелів перед проходженням деталі.

Кінцевий датчик виходу деталі з конвеєру встановлюється після зони сортування і виконує функцію контролю проходження деталей через всю довжину демонстраційного стенду. Цей датчик фіксує факт успішного виходу

шайби з конвеєрної стрічки та її направлення в один із желобів накопичення. Інформація від кінцевого датчика використовується для підрахунку кількості оброблених деталей, виявлення можливих збоїв у роботі системи та формування зворотного зв'язку для коригування алгоритмів сортування.

Робочий цикл системи розпочинається з ініціалізації всіх компонентів при подачі живлення. Модуль керування встановлює серводвигуни важелів у початкове положення (важелі піднято, траєкторія вільна) та переводить кроковий двигун у режим очікування. Після завантаження деталей на конвеєрну стрічку оператор подає команду запуску через органи керування.

Кроковий двигун починає обертання, приводячи в рух конвеєрну стрічку з постійною швидкістю. Пластикові шайби рухаються по стрічці у напрямку зони сортування. Коли перша деталь досягає зони виявлення, датчик наявності деталі реєструє її присутність і передає сигнал до модуля керування.

На основі попередньо запрограмованого алгоритму сортування (який може базуватися на черговості, випадковому розподілі або зовнішніх командах) модуль керування приймає рішення про напрямок руху деталі. Якщо деталь повинна бути направлена в зону накопичення важеля 1, модуль керування подає команду на відповідний серводвигун, який повертає важіль на 45 градусів, створюючи перешкоду на шляху деталі. Під дією руху конвеєрної стрічки шайба натикається на важіль, змінює траєкторію руху, переміщується в желоб та скочується по ньому в зону накопичення.

Якщо деталь призначена для другого напрямку, важіль 1 залишається у піднятому положенні, дозволяючи шайбі пройти далі. При досягненні позиції важеля 2 спрацьовує аналогічний механізм сортування. У випадку, коли обидва важелі знаходяться у піднятому положенні, деталь проходить повз обидві зони сортування та потрапляє на основну конвеєрну лінію, рухаючись до кінця стрічки.

Після відхилення деталі серводвигун повертає важіль у початкове положення, звільняючи траєкторію для наступних шайб. Кінцевий датчик виходу деталі з конвеєру фіксує момент успішного проходження деталі через

систему та передає інформацію до модуля керування для оновлення лічильників та статистики роботи.

Засоби індикації режиму роботи постійно відображають поточний стан системи: активність конвеєра, спрацювання датчиків, положення важелів та кількість оброблених деталей. Це дозволяє оператору контролювати процес сортування та оперативно реагувати на можливі збої або нестандартні ситуації.

Система передбачає декілька режимів роботи: автоматичний (безперервне сортування за заданим алгоритмом), покроковий (обробка деталей по одній для налагодження) та ручний (пряме керування важелями через органи керування). Перемикання між режимами здійснюється через органи керування з відповідною індикацією активного режиму.

Така структура системи забезпечує модульність конструкції, що дозволяє легко масштабувати кількість сортувальних напрямків шляхом додавання додаткових пар "серводвигун-важіль-датчик", а також змінювати алгоритми сортування без модифікації апаратної частини стенду.

2.2 Розроблення модулю індикації та керування

Панель керування демонстраційним стендом (рис. 2) є основним інтерфейсом взаємодії оператора з автоматизованою системою управління конвеєром. Панель виконана у вигляді горизонтально орієнтованого модуля, на якому розміщені елементи індикації, кнопки керування та перемикачі режимів роботи.

У верхній частині панелі розміщено три світлодіодні індикатори круглої форми малого діаметру, які відображають поточний стан ключових компонентів системи. Ці індикатори забезпечують оперативне інформування оператора про активність окремих вузлів стенду без необхідності звертання до цифрових дисплеїв чи комп'ютера.

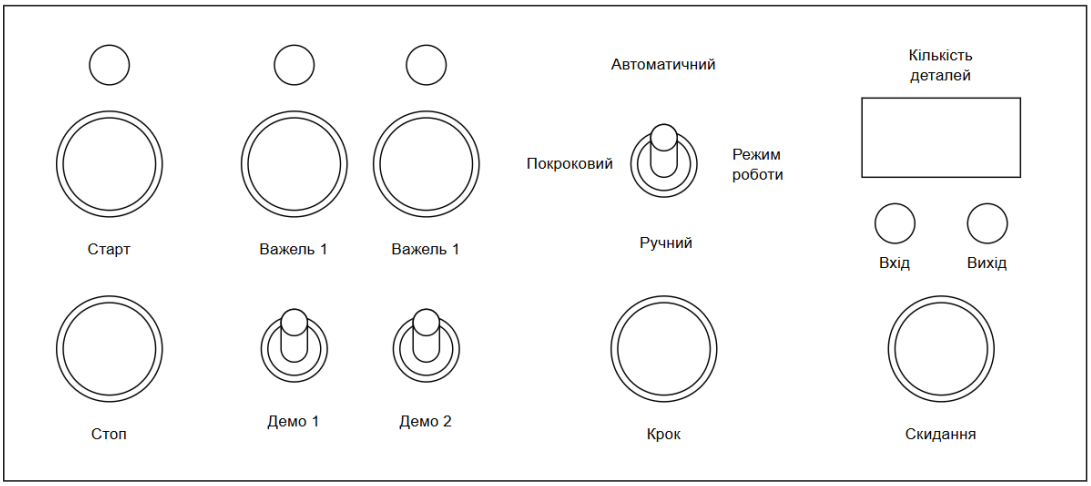


Рисунок 2.2 – Панель керування демонстраційним стендом

Перший індикатор сигналізує про стан роботи конвеєрної стріки. Другий індикатор відображає стан роботи важеля 1, сигналізуючи увімкнений стан, коли важіль перекриває потік деталей. Третій індикатор призначений для сигналізації про стан роботи важеля 2, він показує стан, коли важіль 2 перекриває потік деталей.

Праворуч від органів керування розміщено прямокутний цифровий дисплей "Кількість деталей". Цей елемент індикації виконує функцію лічильника оброблених виробів, відображаючи загальну кількість шайб, які пройшли через систему сортування від моменту запуску або скидання лічильника. Дисплей дозволяє контролювати продуктивність стенду та використовувати його для демонстрації статистичних можливостей автоматизованої системи.

Центральний ряд панелі містить п'ять кнопок круглої форми, які забезпечують основні функції керування стендом.

Кнопка "Старт" призначена для запуску роботи конвеєра. При натисканні цієї кнопки модуль керування ініціює обертання крокового двигуна, переводячи конвеєрну стрічку в режим безперервного руху. Система переходить у активний стан, датчики починають моніторинг наявності деталей, а серводвигуни важелів готові до виконання команд сортування.

Кнопка "Важель 1" забезпечує ручне керування першим сортувальним важелем. У режимі ручного керування натискання цієї кнопки спричиняє поворот важеля на 45 градусів, перекриваючи траєкторію руху деталей у напрямку першого желоба накопичення. Повторне натискання повертає важіль у початкове положення. Ця функція необхідна для налагодження системи, перевірки коректності спрацювання серводвигуна та демонстрації принципу сортування без запуску повного автоматичного циклу.

Кнопка "Важель 2" виконує аналогічну функцію для другого сортувального важеля. Незалежне керування важелями дозволяє оператору тестувати кожен напрямок сортування окремо, перевіряти синхронізацію роботи серводвигунів з рухом конвеєрної стрічки та налаштовувати кути повороту важелів для оптимального відхилення деталей.

Кнопка "Стоп" призначена для планового зупинення роботи конвеєра. При натисканні цієї кнопки модуль керування завершує поточний цикл обробки деталей, що знаходяться на стрічці, після чого зупиняє кроковий двигун. Серводвигуни важелів повертаються у початкове положення, система переходить у режим очікування з збереженням показників лічильника деталей. Кнопка "Стоп" забезпечує контрольоване завершення роботи без аварійного переривання процесу, що важливо для запобігання механічним пошкодженням деталей або вузлів стенду.

У центрі панелі розміщено трипозиційний перемикач "Режим роботи" тумблерного типу з позначками: «Ручний», «Покроковий» та «Автоматичний». Цей перемикач визначає основний режим функціонування системи керування:

Автоматичний режим (верхнє положення перемикача) активує повністю автономний цикл сортування деталей. У цьому режимі модуль керування самостійно опитує датчики наявності, приймає рішення про напрямок відправлення кожної шайби відповідно до запрограмованого алгоритму та керує серводвигунами важелів без втручання оператора. Кроковий двигун підтримує постійну швидкість обертання конвеєрної стрічки, забезпечуючи безперервний потік деталей через систему. Автоматичний режим призначений

для демонстрації повноцінної роботи стенду та проведення тестових циклів сортування.

Ручний режим (нижнє положення перемикача) передає керування важелями безпосередньо оператору через відповідні кнопки на панелі. У цьому режимі датчики наявності деталей продовжують працювати та відображати інформацію через індикатори, але не впливають на автоматичне спрацювання важелів. Оператор може запустити конвеєр кнопкою "Старт" та вручну керувати положенням кожного важеля, спостерігаючи за траєкторією руху деталей. Ручний режим використовується для налагодження системи, навчальних демонстрацій покрокової роботи та діагностики несправностей.

Покроковий режим (центральне положення перемикача) є проміжним варіантом, у якому конвеєр рухається дискретними кроками при кожному натисканні спеціальної кнопки "Крок". Це дозволяє детально спостерігати за процесом проходження кожної деталі через зони сортування, перевіряти точність спрацювання датчиків та синхронізацію роботи всіх компонентів системи. Покроковий режим особливо корисний при налагодженні алгоритмів керування та усуненні помилок у програмному забезпеченні модуля керування.

Індикатор "Вхід" використовується для демонстрації роботи датчика наявності деталі на вході на конвеєрну стрічку. Індикатор "Вихід" показує стан роботи датчика, що розташовано на виході конвеєрної стрічки.

Кнопка "Крок" активна лише в покроковому режимі роботи. Кожне натискання цієї кнопки спричиняє виконання одного кроку роботи конвеєра: крановий двигун повертається на фіксований кут, переміщуючи стрічку на задану відстань (наприклад, на довжину однієї деталі). Це дозволяє оператору контролювати швидкість процесу та детально аналізувати роботу кожного етапу сортування.

Кнопка "Скидання" призначена для переведення системи до початкового стану. При натисканні цієї кнопки очищується лічильник деталей, серводвигуни повертаються у початкові позиції, очищується буфер помилок та

історія роботи. Функція скидання використовується перед початком нової демонстрації або після усунення збоїв у роботі системи.

У центральному рядку між кнопками керування важелями розміщено два тумблерних перемикачі з позначками "Демо 1" та "Демо 2". Ці перемикачі призначені для швидкого вибору попередньо запрограмованих демонстраційних сценаріїв роботи стенду:

Режим "Демо 1" реалізує алгоритм почергового розподілу деталей між двома лініями накопичення (одна шайба в перший желоб, наступна у другий, і так далі). Це демонструє можливості рівномірного розподілу потоку виробів між паралельними технологічними лініями.

Режим "Демо 2" реалізує більш складний алгоритм, наприклад, розподіл деталей у співвідношенні 2:1. Це ілюструє гнучкість системи керування та можливість реалізації різних логік сортування без зміни апаратної частини.

Всі органи керування та індикації підключені до модуля керування через стандартні цифрові та аналогові входи-виходи, що забезпечує простоту монтажу та обслуговування системи. Панель керування забезпечує контроль над усіма функціями демонстраційного стенду, дозволяючи включати як повністю автоматизовану роботу для демонстрації можливостей системи, так і детальне ручне керування для навчальних цілей та налагодження обладнання.

2.3 Опис алгоритму роботи стенду в демонстраційному режимі

Алгоритм роботи стенду в демонстраційному режимі показано на рисунку 2.3.

Алгоритм роботи демонстраційного стенду промислового конвеєра (рис. 2.3) реалізує логіку автоматичного сортування деталей між двома лініями накопичення з почерговим розподілом потоку виробів. Алгоритм побудований за принципом циклічної обробки деталей з контролем їх кількості та автоматичною зупинкою після досягнення заданого ліміту.

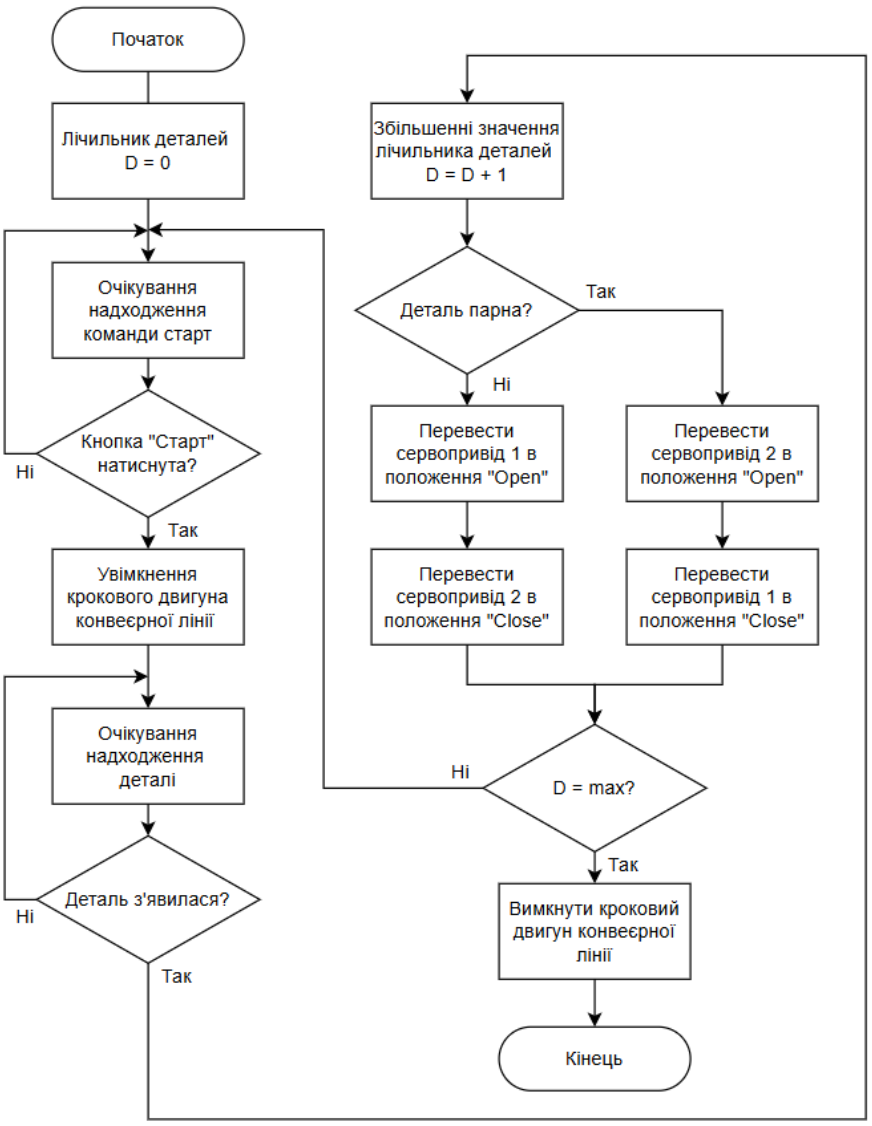


Рисунок 2.3 – Алгоритм роботи стенду в демонстраційному режимі

Робота алгоритму розпочинається з блоку початкової ініціалізації, який активується при подачі живлення на систему або при виборі демонстраційного режиму через панель керування. На етапі ініціалізації виконується обнулення внутрішньої змінної лічильника оброблених виробів D=0, яка є ключовим параметром для відстеження кількості деталей, що пройшли через систему сортування, та для визначення моменту завершення демонстраційного циклу. Обнулення лічильника забезпечує коректний старт роботи незалежно від попередніх сеансів експлуатації стенду, при цьому значення лічильника

зберігається в оперативній пам'яті модуля керування та оновлюється після кожної успішно обробленої деталі.

Після ініціалізації лічильника система переходить у режим очікування запуску, в якому модуль керування постійно опитує стан кнопки "Старт" на панелі керування, перебуваючи в циклі очікування активації оператором. Алгоритм виконує перевірку стану відповідного входу модуля керування, і якщо кнопка не натиснута, система повертається до блоку очікування команди, формуючи замкнений цикл очікування. Це забезпечує можливість підготовки стенду до роботи, зокрема завантаження деталей на конвеєрну стрічку, перевірки готовності всіх компонентів та вибору необхідних параметрів через панель керування. Коли оператор натискає кнопку "Старт", система виходить з циклу очікування та переходить до активної фази роботи.

При отриманні команди старту модуль керування формує послідовність керуючих імпульсів, які через драйвер крокового двигуна подаються на обмотки двигуна NEMA17, внаслідок чого кроковий двигун починає обертання з попередньо налаштованою швидкістю, приводячи в рух конвеєрну стрічку. Швидкість обертання стрічки підбирається таким чином, щоб забезпечити достатній час для спрацювання датчика наявності деталі, обробки сигналу модулем керування, прийняття рішення про напрямок сортування та позиціонування відповідного важеля до моменту підходу деталі до зони відхилення. Типова швидкість становить 5-10 см/с, що забезпечує баланс між продуктивністю демонстрації та надійністю сортування. Після запуску конвеєра індикатор роботи на панелі керування активується, сигналізуючи про перехід системи в активний режим, при цьому конвеєрна стрічка продовжує рух до моменту отримання команди зупинки або завершення циклу обробки всіх деталей.

Система переходить до стадії виявлення деталі на конвеєрі, під час якої модуль керування постійно опитує стан датчика наявності деталі YL-63, розміщеного на відстані перед першим сортувальним важелем, достатній для своєчасного спрацювання серводвигуна. Коли пластикова шайба потрапляє в

зону виявлення датчика, інфрачервоний промінь відбивається від поверхні деталі, датчик формує логічний сигнал, який передається на цифровий вхід модуля керування. Якщо деталь не виявлена, система продовжує очікування в циклічному режимі, підтримуючи обертання конвеєрної стрічки, що дозволяє обробляти деталі, які знаходяться на різній відстані одна від одної, без необхідності їх рівномірного розташування. Коли датчик фіксує присутність деталі, індикатор виявлення деталі на панелі керування спалахує, а алгоритм переходить до наступного етапу обробки з одночасним збільшенням поточного значення лічильника на одиницю за формулою D=D+1.

Після збільшення значення лічильника система переходить до етапу визначення напрямку сортування, який базується на аналізі значення лічильника та перевірці парності поточної деталі. Перевірка парності здійснюється шляхом обчислення залишку від ділення значення D на 2, при цьому якщо D mod 2 дорівнює нулю, деталь вважається парною, а якщо D mod 2 дорівнює одиниці, деталь вважається непарною. Такий підхід забезпечує почергове розподілення деталей між двома лініями накопичення, коли перша деталь з лічильником D=1 (непарна) направляється в один желоб, друга деталь з лічильником D=2 (парна) направляється в інший желоб, третя деталь з лічильником D=3 (непарна) знову направляється в перший желоб, і так далі.

Якщо деталь визначена як парна, система виконує послідовність операцій для направлення шайби в другу лінію накопичення, а саме модуль керування подає команду на перший серводвигун MG90S, який залишає важіль у початковому положенні, що забезпечує вільний прохід деталі повз першу зону сортування без відхилення траєкторії, після чого одночасно модуль керування подає команду на другий серводвигун, який повертає відповідний важіль на кут 45 градусів, створюючи перешкоду на шляху деталі. Пластикова шайба, продовжуючи рух під дією конвеєрної стрічки, натикається на опущений важіль, змінює траєкторію руху, переміщується в другий желоб та скочується по ньому в зону накопичення.

У випадку коли деталь визначена як непарна, система виконує дзеркальну послідовність операцій для направлення шайби в першу лінію накопичення, при цьому другий серводвигун переводить важіль у початкове положення, забезпечуючи вільний прохід деталі у випадку якщо вона досягне цієї зони, тоді як перший серводвигун повертає важіль на 45 градусів, перекриваючи траєкторію, внаслідок чого деталь відхиляється на ранньому етапі руху, потрапляє в перший желоб та скочується в першу зону накопичення.

Після виконання операцій сортування та повернення важелів у відповідні позиції система переходить до етапу контролю завершення циклу, на якому перевіряється чи досягнуто максимальної кількості деталей для обробки в поточному демонстраційному циклі шляхом порівняння поточного значення лічильника D з попередньо визначеним параметром max. Значення максимальної кількості деталей зберігається в пам'яті модуля керування або встановлюється оператором через панель керування перед запуском, при цьому типові значення для демонстраційних сеансів становлять 10, 20 або 50 деталей залежно від тривалості демонстрації та кількості наявних пластикових шайб.

Якщо поточне значення лічильника D не досягло максимального значення, система повертається до блоку очікування надходження деталі, формуючи основний робочий цикл алгоритму, при цьому конвеєрна стрічка продовжує рух, датчик продовжує моніторинг появи наступних деталей, а серводвигуни готові до обробки чергової шайби. Цей циклічний процес повторюється для кожної деталі що надходить на конвеєр, забезпечуючи безперервну роботу системи сортування до досягнення заданого ліміту.

Коли значення лічильника D досягає максимального значення, система виходить з основного робочого циклу та переходить до завершальної фази роботи, під час якої модуль керування припиняє генерацію керуючих імпульсів для драйвера крокового двигуна, що призводить до зупинки обертання валу та відповідно зупинки конвеєрної стрічки. Зупинка відбувається плавно без різкого гальмування, що запобігає можливому зміщенню деталей які ще

можуть знаходитися на стрічці, при цьому серводвигуни важелів повертаються у початкові позиції з обома важелями піднесеними вгору, індикатор роботи конвеєра на панелі керування згасає, а індикатор завершення циклу може активуватися сигналізуючи оператору про успішне виконання демонстраційного сеансу. Алгоритм досягає завершального стану, що означає повне завершення поточного циклу роботи, при цьому значення лічильника деталей D зберігається на цифровому дисплеї панелі керування, дозволяючи оператору зафіксувати кількість оброблених виробів.

3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО СТЕНДУ

3.1 Розрахунок механізму конвеєрної лінії

Під час проєктування конвеєрної лінії одним із етапів є визначення міжосьової відстані між ведучим і веденим зубчастими шківами. Правильний вибір цієї величини забезпечує необхідний натяг ременя, стабільність передавання крутного моменту, відсутність прослизання та довговічність елементів приводу. Розрахунок виконується відповідно до геометричних параметрів зубчастого ременя та шківів.

У конструкції застосовується замкнений зубчастий ремінь типу HTD 900-3M довжиною по ділильній лінії 900 мм та шириною 15 мм (рис. 3.1).

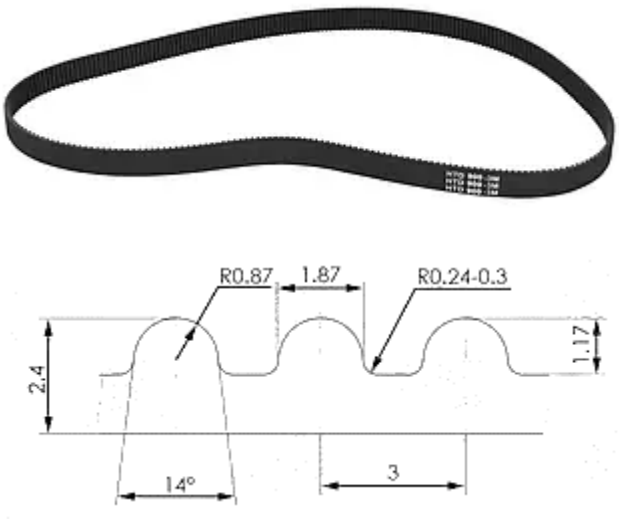


Рисунок 3.1 – Замкнений зубчастий ремінь типу HTD 900-3M

Передача складається з двох однакових зубчастих шківів типу HTD3M-BF-W16-Z30-D6, кожен з яких має 30 зубців (рис. 3.2).

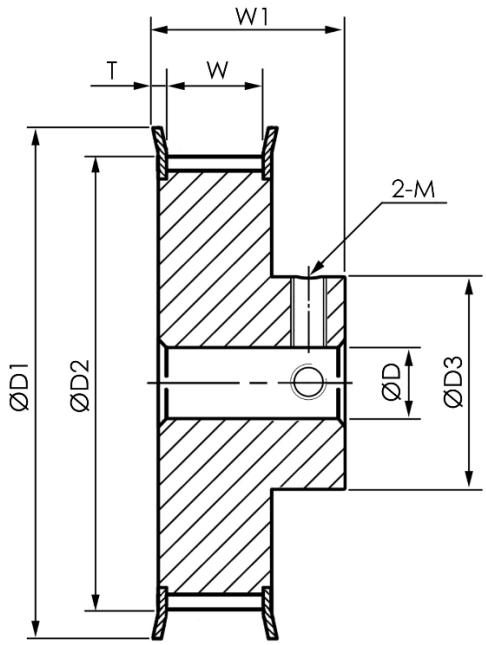


Рисунок 3.2 – Основні розміри зубчастого шківу

Числові параметри шківу обираються із довідникової таблиці, що наведена на рисунку 3.3.

Модель	Кількість зубів	Основні розміри (мм)							Різьба	Вага (г)
		D	D1	D2	D3	W	W1	T	M	
HTD3M-BF-W17-Z24-D6	24	6	26	22	15	17	29	1.6	M5x0.8	26.5
HTD3M-BF-W17-Z24-D6.35	24	6.35	26	22	15	17	29	1.6	M5x0.8	26.2
HTD3M-BF-W16-Z24-D7	24	7	26	22	15	16	28	1.6	M5x0.8	24.5
HTD3M-BF-W16-Z24-D8	24	8	26	22	15	16	28	1.6	M4x0.7	23.6
HTD3M-BF-W17-Z30-D6	30	6	32	27.8	20	17	29	1.6	M5x0.8	41.7
HTD3M-BF-W17-Z30-D8	30	8	32	27.8	20	17	29	1.6	M5x0.8	40
HTD3M-BF-W17-Z30-D12	30	12	32	27.8	22	17	29	1.6	M5x0.8	36.6
HTD3M-BF-W17-Z36-D8	36	8	38	33.5	26	17	29	1.6	M5x0.8	62.5
HTD3M-BF-W17-Z36-D14	36	14	38	33.5	26	17	29	1.6	M5x0.8	54.5
HTD3M-BF-W16-Z48-D8	48	8	50	45	35	16	29	1.6	M5x0.8	114.3
HTD3M-BF-W17-Z48-D10	48	10	50	45	34	17	29	1.6	M5x0.8	115
HTD3M-BF-W17-Z48-D12	48	12	51	45	34	17	29	1.6	M5x0.8	108.6
HTD3M-BF-W29-Z36-D6	36	6	38	33.5	26	16	29	1.6	M5x0.8	65

Рисунок 3.3 – Числові параметри різних типів зубчастих шківів

Виходячи з даної таблиці, номінальний зовнішній діаметр шківа становить з 30 зубами становить 27,8 мм.

При виконанні геометричних розрахунків використовується не зовнішній діаметр шківа, а його ділильний діаметр, який визначається за кількістю зубців та кроком зубчастого ременя. Для ременів профілю HTD 3M крок зубців становить

$$p = 3 \text{ мм}. \tag{3.1}$$

Ділильний діаметр шківа визначається за формулою

$$D = \frac{z \cdot p}{\pi}, \tag{3.2}$$

де: D – ділильний діаметр шківа, мм;

Z – кількість зубців шківа;

p – крок ременя, мм.

Підставляючи вихідні дані,

$$D = \frac{30 \cdot 3}{3{,}1416} = 26{,}65 \text{ мм}.$$

Отримане значення використовується при подальшому визначенні міжосьової відстані.

Оскільки в передачі застосовуються два однакових шківи, довжина ременя визначається сумою двох прямолінійних ділянок ременя та довжини двох півкіл, що утворюють повне коло навколо шківів. У цьому випадку геометрична залежність має вигляд

$$L = 2C + \pi D, \tag{3.3}$$

де: L – довжина ременя по ділильній лінії, мм;

C – міжосьова відстань між шківами, мм;

D – ділильний діаметр шківа, мм.

З рівняння (3.3) визначимо міжосьову відстань

$$C = \frac{L - \pi D}{2}. \tag{3.4}$$

Підставляючи відомі значення,

$$C = \frac{900 - 3{,}1416 \cdot 28{,}65}{2},$$

$$C = \frac{900 - 90}{2},$$

$$C = \frac{810}{2} = 405 \text{ мм}.$$

Для перевірки правильності отриманого результату визначимо сумарну довжину ременя. Довжина двох прямолінійних ділянок становить

$$2C = 2 \cdot 405 = 810 \text{ мм},$$

а довжина ділянки, що охоплює обидва шківи,

$$\pi D = 3{,}1416 \cdot 28{,}65 \approx 90 \text{ мм}.$$

Загальна довжина ременя дорівнює

$$L = 810 + 90 = 900 \text{ мм},$$

що повністю відповідає паспортній довжині застосованого зубчастого ременя. Отже, виконаний розрахунок є коректним.

В конструкції приводу необхідно передбачити можливість регулювання положення одного зі шківів у межах ±5…10 мм за рахунок виконання подовжених монтажних пазів. Таке конструктивне рішення забезпечує зручність встановлення зубчастого ременя, компенсацію виробничих допусків деталей та можливість регулювання його натягу в процесі складання й експлуатації механізму.

3.2 Розрахунок автоматизованої системи керування конвеєрною лінією

3.2.1 Математична модель об'єкта керування

Об'єктом керування є кроковий двигун NEMA 17 у зв'язці з конвеєрною стрічкою. З точки зору теорії автоматичного керування, систему «двигун — навантаження» розглядають як об'єкт з передавальною функцією, що поєднує електромеханічні та механічні постійні часу.

Рівняння руху ротора крокового двигуна в загальному вигляді:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c - B \cdot \omega, \tag{3.5}$$

де J – момент інерції ротора з навантаженням, кг·м²;

ω – кутова швидкість, рад/с;

M_e – електромагнітний момент двигуна, Н·м;

M_c – момент статичного навантаження з боку конвеєра, Н·м;

B – коефіцієнт в'язкого тертя, Н·м·с.

Для двигуна NEMA 17 (типова модель 17HS4401) основні параметри наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики крокового двигуна NEMA 17

Параметр	Значення
Крок двигуна	1,8°/крок (200 кроків/оберт)
Номінальний струм фази	1,7 А
Опір фази R	1,5 Ом
Індуктивність фази L	2,8 мГн
Утримуючий момент	0,44 Н·м
Момент інерції ротора Jr	54 г·см² = 5,4·10⁻⁶ кг·м²
Маса ротора	280 г

Момент інерції конвеєрної стрічки та приводного ролика, приведений до валу двигуна:

$$J_{conv} = m_r \cdot r^2 + \frac{m_{str} \cdot r^2}{2}, \tag{3.6}$$

де m_r – маса приводного ролика;

r – радіус ролика (приймаємо r = 20 мм);

m_{str} – маса стрічки.

Для макету конвеєра 400×40 мм з масою стрічки m_{str}≈0,05 кг і роликом m_r≈0,03 кг:

$$J_{conv} = 0{,}03 \cdot 0{,}02^2 + \frac{0{,}05 \cdot 0{,}02^2}{2} = 1{,}2 \cdot 10^{-5} + 1{,}0 \cdot 10^{-5} = 2{,}2 \cdot 10^{-5} \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

3.2.2 Передавальна функція об'єкта керування

Електрична постійна часу фазної обмотки двигуна:

$$T_e = \frac{L}{R} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-3}}{1{,}5} = 1{,}87 \cdot 10^{-3} \approx 1{,}87 \text{ мс.} \qquad (3.7)$$

Механічна постійна часу:

$$T_m = \frac{J \cdot R}{K_e \cdot K_m}, \qquad (3.8)$$

де K_e – стала ЕРС.

K_m – конструктивна стала моменту двигуна.

Для NEMA 17 приймаємо $K_m = K_e \approx 0{,}22$ В·с/рад:

$$T_m = \frac{2{,}74 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}5}{0{,}22 \cdot 0{,}22} = \frac{4{,}11 \cdot 10^{-5}}{0{,}0484} \approx 8{,}5 \cdot 10^{-5}\text{с.}$$

Оскільки $T_e \gg T_m$ є неправильним, а для крокового двигуна в режимі мікрокроку визначальним є механічна динаміка, передавальна функція об'єкта керування (від частоти керуючих імпульсів U(s) до кутової швидкості ω(s)) апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{K_{\text{об}}}{T_m \cdot s + 1}, \qquad (3.9)$$

де $K_{\text{об}}$ – статичний коефіцієнт передачі об'єкта.

З урахуванням перетворення кроки за секунду в радіани за секунду для 200 кроків/оберт:

$$K_{об} = \frac{2\pi}{200} = 0{,}0314 \frac{\text{рад}}{\text{крок}}. \quad (3.10)$$

Таким чином, передавальна функція об'єкта:

$$W_{об}(s) = \frac{0{,}0314}{8{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot s + 1}. \quad (3.11)$$

3.2.3 Синтез ПІД-регулятора методом модульного оптимуму

Для систем з аперіодичним об'єктом першого порядку доцільно застосовувати метод модульного оптимуму, який забезпечує мінімальний час регулювання при перерегулюванні не більше 4,3%.

Структура ПІД-регулятора описується передавальною функцією:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right), \quad (3.12)$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт;

T_i – час інтегрування;

T_d – час диференціювання.

Умова модульного оптимуму для розімкненої системи:

$$W_{roz}(j\omega) = \frac{1}{j\omega \cdot 2T_\mu} \cdot e^{j\varphi} = \frac{1}{2T_\mu \omega}, \quad (3.13)$$

де T_μ – мала некомпенсована стала часу системи.

В даному випадку $T_\mu = T_e = 1{,}87 \cdot 10^{-3}$ с.

За критерієм модульного оптимуму визначаємо параметри регулятора. Час інтегрування дорівнює компенсованій великій сталій часу об'єкта:

$$T_i = T_m = 8{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ с.} \quad (3.14)$$

Пропорційний коефіцієнт:

$$K_p = \frac{T_m}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{\text{об}}} = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1{,}87 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0134} = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-4}}{1{,}175 \cdot 10^{-4}} \approx 7{,}23. \quad (3.15)$$

Час диференціювання для ПІД-регулятора при МО:

$$T_d = T_\mu = 1{,}87 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (3.16)$$

Передавальна функція синтезованого ПІД-регулятора:

$$W_{PID}(s) = 7{,}23\left(1 + \frac{1}{8{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot s} + 1{,}175 \cdot 10^{-4} \cdot s\right). \quad (3.17)$$

3.2.4 Показники якості замкненої системи

Передавальна функція замкненої системи за методом МО набуває вигляду:

$$\Phi(s) = \frac{W_{PID}(s) \cdot W_{\text{об}}(s)}{1 + W_{PID}(s) \cdot W_{\text{об}}(s)} = \frac{1}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}. \quad (3.18)$$

$$\Phi(s) = \frac{1}{7{,}01 \cdot 10^{-6} s^2 + 3{,}74 \cdot 10^{-3} s + 1}. \quad (3.20)$$

Час регулювання (критерій 5%):

$$t_p \approx 4{,}7 \cdot T_\mu = 4{,}7 \cdot 1{,}87 \cdot 10^{-3} \approx 8{,}8 \text{ мс.}$$

Перерегулювання:

$$\sigma = e^{-\pi/\sqrt{2}} \cdot 100\% \approx 4{,}3\%.$$

Статична похибка нульова при ступінчастому задавальному впливі завдяки наявності інтегральної складової:

$$e_{st} = 0.$$

3.2.5 Дискретна реалізація ПІД-регулятора

Оскільки система реалізована на мікроконтролері Arduino, безперервний ПІД-регулятор необхідно перевести в дискретну форму. При використанні методу прямокутного наближення (метод Ейлера вперед) з кроком дискретизації T_s:

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot \sum_{n=0}^{k} e[n] \cdot T_s + K_d \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}, \quad (3.21)$$

де $K_i = K_p / T_i$;

$K_d = K_p \cdot T_d$.

Обчислені дискретні коефіцієнти при $T_s = 1$ мс (частота виконання задачі Arduino):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{7{,}23}{8{,}5 \cdot 10^{-4}} = 8506 \text{ с}^{-1}; \quad (3.22)$$

$$K_d = K_p \cdot T_d = 7{,}23 \cdot 1{,}87 \cdot 10^{-3} = 0{,}01352 \text{ с}.$$

Для запобігання інтегральному насиченню при насиченні виходу застосовується обмеження інтегральної суми в межах допустимого діапазону керуючого сигналу $[u_{min}, u_{max}]$.

3.2.6 Розрахунок швидкісних параметрів конвеєра

Лінійна швидкість конвеєрної стрічки пов'язана з кутовою швидкістю приводного ролика:

$$\upsilon = \omega \cdot r = \omega \cdot 0{,}02 \text{ м}.$$

Задана робоча швидкість стрічки для надійного сортування $\upsilon^* = 0{,}07$ м/с. Відповідна кутова швидкість:

$$\omega^* = \frac{\upsilon^*}{r} = \frac{0{,}07}{0{,}02} = 3{,}5 \text{ рад/с}. \quad (3.23)$$

Необхідна частота керуючих імпульсів для драйвера A4988 (мікрокрок 1/16):

$$f_{step} = \frac{\omega^* \cdot N_{steps} \cdot M_{micro}}{2\pi} = \frac{3{,}5 \cdot 200 \cdot 16}{2\pi} \approx 1781 \text{ Гц}, \quad (3.24)$$

де $N_{steps} = 200$ – кількість кроків на оберт;

$M_{micro} = 16$ – коефіцієнт мікрокроку.

Час проходження деталі від давача до першого сортувального важеля при $\upsilon = 70$ мм/с і відстані d = 50 мм:

$$t_{delay} = \frac{d}{v} = \frac{0{,}05}{0{,}07} \approx 0{,}71\ c. \qquad (3.25)$$

Цей параметр визначає час упередження для своєчасного спрацювання серводвигуна сортувального важеля.

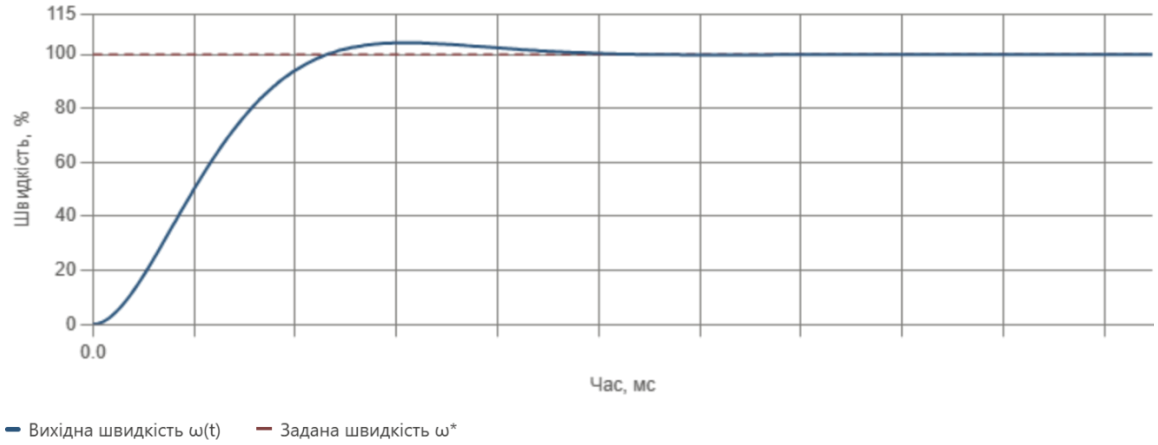


Рисунок 3.4 – Перехідний процес замкненої системи керування швидкістю

В таблиці 3.2 наведені розраховані параметри ПІД-регулятора та показники якості.

Таблиця 3.2 – Розраховані параметри ПІД-регулятора та показники якості

Параметр	Позначення	Значення
Пропорційний коефіцієнт	K_p	7,23
Час інтегрування	T_i	0,85 мс
Час диференціювання	T_d	1,87 мс
Інтегральний коефіцієнт (дискр.)	K_i	8506 $с^{-1}$
Диференціальний коефіцієнт (дискр.)	K_d	0,01352 с
Крок дискретизації	T_s	1 мс
Час регулювання (5%)	t_p	≈ 8,8 мс
Перерегулювання	σ	≈ 4,3%
Статична похибка	e_{st}	0

Параметр	Позначення	Значення
Робоча швидкість стрічки	v^*	70 мм/с
Частота імпульсів (мікрокрок 1/16)	f_{step}	≈ 1781 Гц
Час упередження серво	t_{delay}	≈ 0,71 с

Розрахований ПІД-регулятор забезпечує необхідні показники якості перехідного процесу з нульовою статичною похибкою і часом регулювання менше 10 мс, що суттєво менше за динамічні процеси механічної частини конвеєра і виключає будь-який вплив перехідних режимів двигуна на точність сортування.

3.3 Вибір електронних компонентів демонстраційного стенду промислового конвеєру

3.3.1 Обґрунтування вибору контролера для системи керування навчальним демонстраційним стендом промислового конвеєра

Виконаємо вибір апаратної платформи системи керування. Обраний контролер повинен забезпечувати реалізацію алгоритмів автоматичного керування, взаємодію із виконавчими механізмами та датчиками, а також відповідати вимогам навчального процесу. На відміну від промислових виробничих систем, для навчального стенду першочергового значення набувають простота програмування, доступність обладнання, можливість моделювання принципів роботи промислових систем автоматизації та мінімізація вартості.

Для проведення порівняльного аналізу було обрано чотири варіанти засобів керування: Arduino Nano, STM32F103C8T6, ESP32 та промисловий програмований логічний контролер Siemens LOGO!. Перші три платформи належать до універсальних мікроконтролерів, тоді як Siemens LOGO! є

представником промислових програмованих логічних контролерів, що широко використовуються у системах автоматизації технологічних процесів.

Порівняльні характеристики контролерів наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Порівняльна характеристика контролерів

Параметр	Arduino Nano	STM32F103C8T6	ESP32	Siemens LOGO!
Тип пристрою	Мікроконтролер	Мікроконтролер	Мікроконтролер	Промисловий ПЛК

Продовження таблиці 3.3

Архітектура	AVR 8-bit	ARM Cortex-M3	Xtensa LX6	PLC
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	до 240 МГц	не нормується
Flash	32 КБ	64–128 КБ	4 МБ	внутрішня пам'ять ПЛК
Робоча напруга	5 В	3,3 В	3,3 В	12/24 В
Простота програмування	дуже висока	середня	середня	висока
Ladder Diagram	через LDmicro	відсутня	відсутня	штатно
Вартість	дуже низька	низька	середня	висока
Навчальна література	дуже багато	багато	багато	багато
Використання у промисловості	навчання, прототипи	вбудовані системи	IoT	промислова автоматизація

Arduino Nano побудований на базі мікроконтролера ATmega328P і є однією з найпоширеніших платформ для навчання програмуванню та створення вбудованих систем. Зовнішній вигляд контролеру показано на рисунку 3.5.

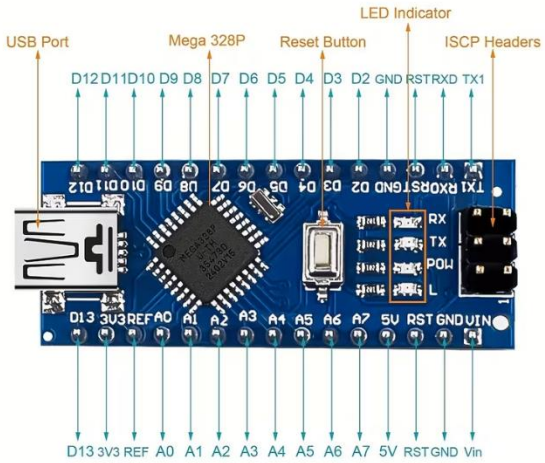


Рисунок 3.5 – Мікроконтролер ATmega328P

Незважаючи на порівняно невисоку продуктивність, його технічних характеристик цілком достатньо для реалізації алгоритмів керування демонстраційним конвеєром. Контролер забезпечує формування сигналів керування кроковим двигуном, сервоприводами, опитування датчиків та виконання логічних алгоритмів сортування виробів без перевантаження обчислювальних ресурсів.

STM32F103C8T6 належить до сучасних 32-бітних мікроконтролерів сімейства ARM Cortex-M3. Зовнішній вигляд контролеру показано на рисунку 3.6.

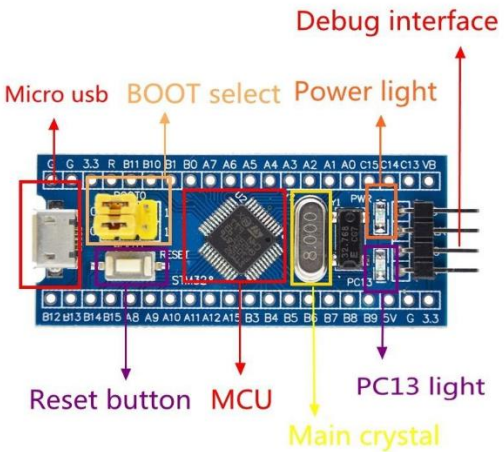


Рисунок 3.6 – Контролер STM32F103C8T6

Порівняно з Arduino Nano він має суттєво більшу продуктивність, розширений набір периферійних модулів, більший обсяг пам'яті та підтримує високошвидкісні інтерфейси обміну даними. Такі можливості роблять його ефективним рішенням для побудови складних систем керування реального часу. Разом із тим використання STM32 потребує більш глибоких знань архітектури мікроконтролерів, налаштування периферії та спеціалізованих середовищ розробки, що ускладнює його використання у навчальному процесі.

ESP-WROOM-32 є високопродуктивною мікроконтролерною платформою, яка, крім значної обчислювальної потужності, має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth. Зовнішній вигляд контролеру показано на рисунку 3.7.

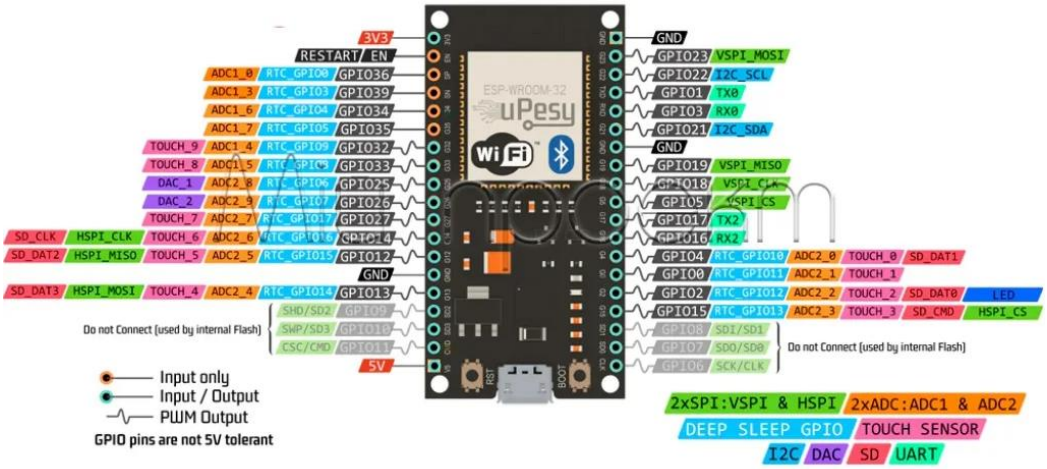


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд контролеру ESP-WROOM-32

Завдяки потужному обчислювальному ядру контролер широко застосовується у системах Інтернету речей, бездротового моніторингу та віддаленого керування. Однак для навчального демонстраційного стенду промислового конвеєра такі можливості не є визначальними, оскільки алгоритм роботи передбачає локальне керування виконавчими механізмами та датчиками без необхідності використання бездротових каналів зв'язку.

Промисловий програмований логічний контролер Siemens LOGO! спеціально розроблений для побудови систем автоматизації невеликої складності. Зовнішній вигляд контролеру показано на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд контролеру Siemens LOGO!

Його основною перевагою є підтримка стандартних мов програмування промислових ПЛК, насамперед мови релейної логіки (Ladder Diagram), висока надійність та можливість безпосереднього використання в промислових умовах. Разом із тим використання такого контролера суттєво збільшує вартість навчального стенду. Крім цього, програмне забезпечення та апаратне забезпечення Siemens LOGO! є спеціалізованими, що обмежує можливості студентів щодо вивчення архітектури самого контролера та принципів взаємодії його окремих апаратних модулів.

Проведений аналіз показав, що основною особливістю Arduino Nano є можливість програмування за допомогою програмного комплексу LDmicro, який забезпечує створення програм мовою релейної логіки (Ladder Diagram) з подальшою автоматичною генерацією коду для мікроконтролера ATmega328P. Використання LDmicro дозволяє реалізувати алгоритми керування у формі, аналогічній програмам промислових ПЛК, що істотно спрощує вивчення принципів промислової автоматизації. Таким чином, студент отримує можливість працювати із класичними релейними схемами, не використовуючи дорогі промислові контролери.

Приклад програми, розробленої за допомогою програмного засобу LDmicro показано на рисунку 3.9.

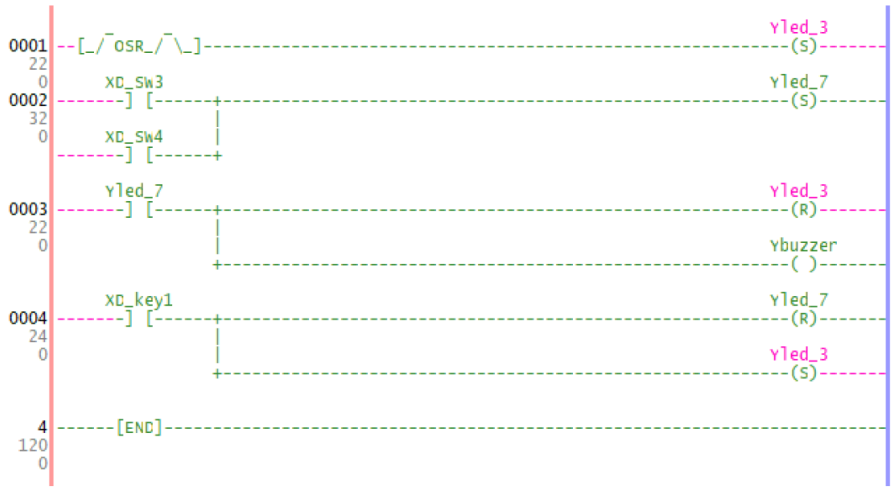


Рисунок 3.9 – Приклад програми, розробленої за допомогою програмного засобу LDmicro

З функціональної точки зору програмне забезпечення, створене в LDmicro, реалізує ті самі базові принципи, що використовуються в промислових ПЛК: циклічне виконання програми, логічну обробку дискретних сигналів, використання таймерів, лічильників, тригерів, внутрішніх змінних та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Це дозволяє максимально наблизити процес навчання до реальних умов експлуатації промислових систем автоматизації.

Хоча за технічними характеристиками Arduino Nano поступається STM32F103C8T6 та ESP32, для реалізації навчального стенду його обчислювальних ресурсів цілком достатньо. Система керування конвеєром виконує відносно нескладні операції: опитування датчиків, керування кроковим двигуном, сервоприводами, світловою індикацією та реалізацію алгоритму сортування виробів. Такі задачі не потребують значного обсягу оперативної пам'яті або високої швидкодії процесора.

Таким чином, контролер Arduino Nano забезпечує достатню продуктивність для реалізації всіх функцій навчального демонстраційного

стенду, характеризується низькою вартістю, простотою програмування та широкою доступністю. Додатковою перевагою є можливість використання програмного комплексу LDmicro, який дозволяє реалізувати алгоритми керування мовою релейної логіки та фактично перетворює Arduino Nano на навчальний аналог промислового програмованого логічного контролера. Це дає можливість сформувати у студентів практичні навички програмування систем автоматизації, максимально наближені до роботи з промисловими ПЛК, без використання дорогого промислового обладнання.

3.3.2 Вибір датчика присутності деталі

Для забезпечення надійного виявлення пластикових деталей на конвеєрній стрічці в умовах змінного зовнішнього освітлення було проведено порівняльний аналіз трьох типів датчиків присутності, що широко застосовуються в навчальних та промислових системах автоматизації:

– завадостійкого датчика на основі приймача TSOP38 з генератором на таймері NE555;

– модуля відбивного типу YL-63;

– модуля на основі оптопари TCRT5000.

Модуль YL-63 (рис. 3.10) та датчик TCRT5000 (рис. 3.11) реалізують принцип широкосмугового відбивного інфрачервоного виявлення. В даних пристроях випромінювач безперервно генерує ІЧ-потік, а приймач реєструє його відбиття від поверхні деталі.

Недоліком такого підходу є відсутність частотної селективності – приймач однаково реагує як на відбитий сигнал власного випромінювача, так і на фоновий ІЧ-потік сонячного випромінювання та люмінесцентних ламп. Внаслідок цього при роботі стенду в умовах природного або інтенсивного штучного освітлення спостерігається нестабільність порогу спрацювання, хибні виявлення або повна втрата чутливості, що робить зазначені датчики непридатними для застосування у відкритому навчальному середовищі без додаткового конструктивного екранування зони виявлення.



Рисунок 3.10 – Модуль YL-63

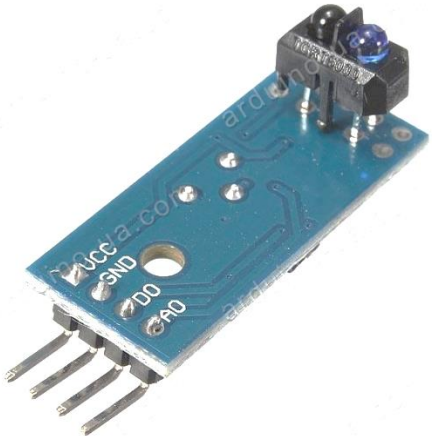


Рисунок 3.11 – Датчик TCRT5000

Обраний датчик на основі приймача TSOP38 та таймера NE555 (рис. 3.12) позбавлений зазначеного недоліку завдяки застосуванню принципу модульованого випромінювання.



Рисунок 3.12 – Датчик на основі приймача TSOP38 та таймера NE555

Генератор на мікросхемі NE555 формує прямокутні імпульси з несучою частотою 38 кГц, якими модулюється ІЧ-світлодіод випромінювача. Мікросхема TSOP38 є вузькосмуговим демодулятором, налаштованим виключно на частоту 38 кГц, і повністю пригнічує постійну та низькочастотну складову фонового ІЧ-випромінювання на апаратному рівні. При появі деталі в зоні виявлення відбитий модульований сигнал реєструється приймачем TSOP38, на виході якого формується низький логічний рівень TTL, що безпосередньо опитується цифровим входом мікроконтролера STM32F103C8T6 без додаткових схем узгодження рівнів.

Порівняльний аналіз розглянутих варіантів за ключовими характеристиками наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Порівняльний аналіз датчиків присутності деталі

Параметр	TSOP38 + NE555	YL-63	TCRT5000
Принцип виявлення	Модульоване ІЧ, демодуляція 38 кГц	Широкосмугове відбивне ІЧ	Широкосмугове відбивне ІЧ
Завадостійкість до фонового освітлення	Висока	Низька	Низька
Потреба в екрануванні	Відсутня	Необхідне	Необхідне
Стабільність при денному світлі	Висока	Нестабільна	Нестабільна
Дальність виявлення	5–30 см	2–30 см	1–8 мм
Вихідний сигнал	Цифровий TTL	Цифровий TTL + аналоговий	Цифровий TTL + аналоговий
Напруга живлення	3,3 / 5 В	3,3 / 5 В	3,3 / 5 В
Сумісність з STM32 (3,3 В)	Так	Так	Так

Параметр	TSOP38 + NE555	YL-63	TCRT5000
Складність налаштування	Середня	Низька	Низька

Додатковою перевагою обраного рішення є можливість регулювання частоти генератора NE555 в діапазоні, що перекриває смугу пропускання TSOP38, а також підстроювання робочої відстані шляхом зміни струму живлення ІЧ-світлодіода. Дальність виявлення 5–30 см є достатньою для надійної фіксації деталі на висоті конвеєрної стрічки з урахуванням конструктивного розміщення датчика на несучій стійці сортувального вузла.

Таким чином, датчик на основі TSOP38 та NE555 є оптимальним вибором для навчального стенду, що експлуатується в умовах неконтрольованого освітлення, забезпечуючи стабільну роботу системи сортування незалежно від зовнішніх світлових перешкод.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДА ПРОМИСЛОВОГО КОНВЕЄРА

4.1 Моделювання елементів конструкції демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра

На рисунку 4.1 показана 3Д модель розробленої конструкції демонстраційного стенду промислового конвеєра.

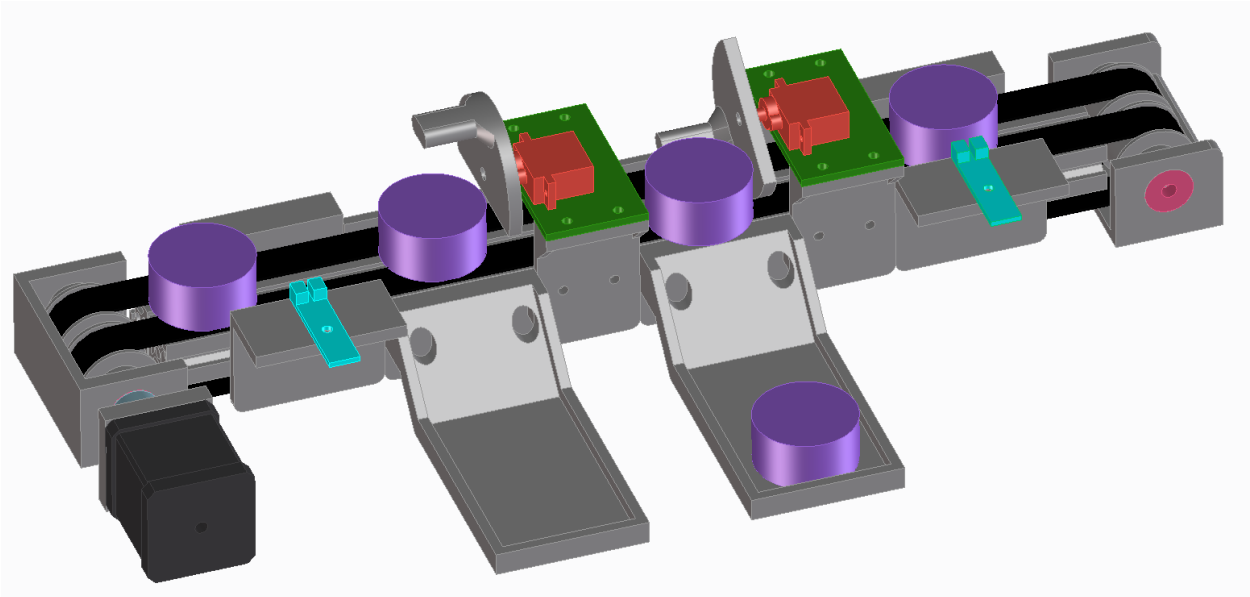


Рисунок 4.1 – 3Д модель розробленої конструкції демонстраційного стенду промислового конвеєра

Проєктування виконувалось в середовище Creo Elements/Direct Modeling Express. Обране серодивище – це безкоштовна CAD-система компанії PTC, що реалізує концепцію прямого моделювання на відміну від параметричного підходу, характерного для таких систем як SolidWorks або Creo Parametric.

Ключова особливість прямого моделювання полягає у відсутності дерева побудови та параметричних залежностей – геометрія редагується безпосередньо шляхом маніпуляції гранями, ребрами та тілами без необхідності переглядати історію побудови моделі. Це забезпечує високу

гнучкість при внесенні конструктивних змін на будь-якому етапі проектування, оскільки модифікація не потребує перебудови всього параметричного ланцюга.

Система підтримує імпорт геометрії у форматах STEP, IGES, STL та власних форматах PTC, що робить її придатною для роботи з моделями, створеними в інших CAD-середовищах. Функціональні можливості безкоштовної версії Express включають твердотільне та поверхневе моделювання, роботу зі збірками, а також генерацію технічних креслень, проте обмежені розміром збірки (до 60 деталей) та відсутністю розширених модулів аналізу.

Розроблена конструкція має чотири основні зони, як показано на рисунку 4.2.

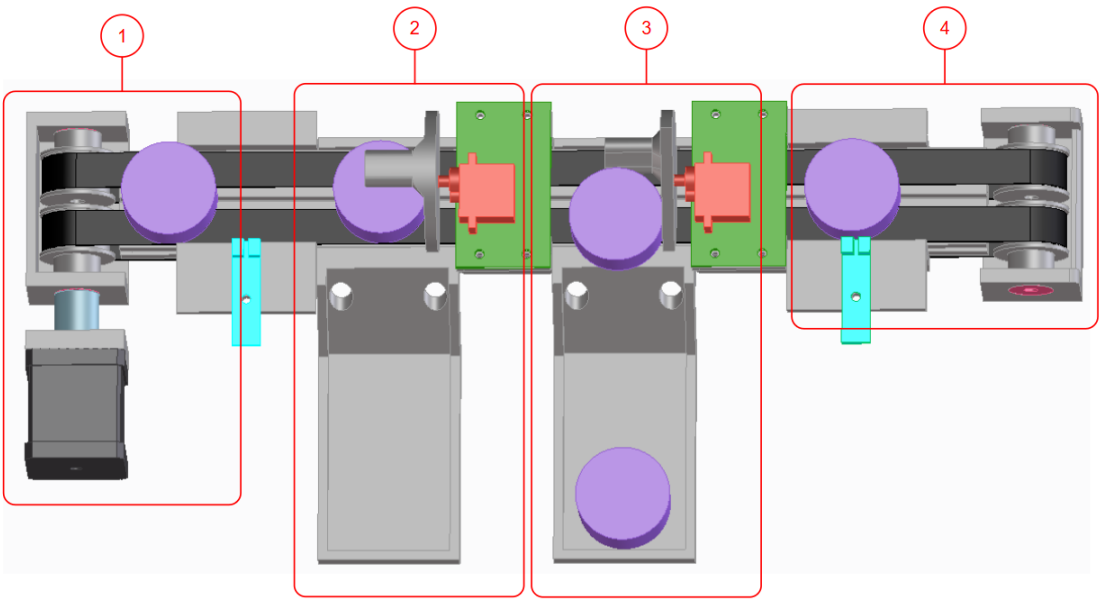


Рисунок 4.2 – Основні чотири зони демонстраційного стенду промислового конвеєру

Зона 1 являє собою привідний вузол конвеєра, що включає кроковий двигун NEMA 17, з'єднаний через муфту з приводним роликом. Двигун закріплений на торцевій пластині рами за допомогою стандартного фланцевого кріплення, а приводний ролик забезпечує натяг та рух конвеєрної стрічки. В

цій же зоні розміщено опорний ролик на підшипниковому вузлі з боковими фіксаторами для забезпечення стабільного положення стрічки по ширині.

Зона 2 є першим сортувальним вузлом, що складається з серводвигуна MG90S, змонтованого на вертикальній несучій стійці, та відхиляючого важеля. Стійка кріпиться до нижньої основи рами через отвори з можливістю регулювання поздовжнього положення вздовж конвеєра. Важіль серводвигуна у відхиленому положенні перекриває траєкторію руху деталі, спрямовуючи її в першу лінію накопичення.

Між зонами 1 та 2 встановлюється датчик визначення наявності деталі на конвеєрній стрічці. В якості датчика присутності деталі використовується завадостійкий датчик перешкод на основі інфрачервоного приймача TSOP38. Кріплення давача передбачає регулювання висоти для точного налаштування відстані до поверхні стрічки.

Зона 3 є другим сортувальним вузлом аналогічної конструкції, розташованим на відстані, достатній для незалежного спрацювання від першого вузла.

Зона 4 являє собою ведений кінець конвеєра з натяжним роликом, конструкція якого передбачає можливість поздовжнього переміщення для регулювання натягу стрічки. Підшипниковий вузол натяжного ролика виконаний у вигляді рухомого блока з фіксуючим гвинтом, що дозволяє компенсувати витягування стрічки в процесі експлуатації стенду.

В зоні 4 також розміщуються датчик наявності деталі для підрахунку об’єктів, що повністю пройшли конвеєрною стрічкою.

На рисунку 4.3 наведено тривимірну модель привідного вузла конвеєрної лінії.

На рисунку 4.3 позиціями позначено такі конструктивні елементи:

1 – кроковий двигун NEMA 17;

2 – з'єднувальна муфта;

3 – підшипниковий вузол;

4 – конвеєрна стрічка;

5 – несуча рама;

6 – приводний ролик;

7 – бокова напрямна рами;

8 – кронштейн кріплення датчика присутності деталі.

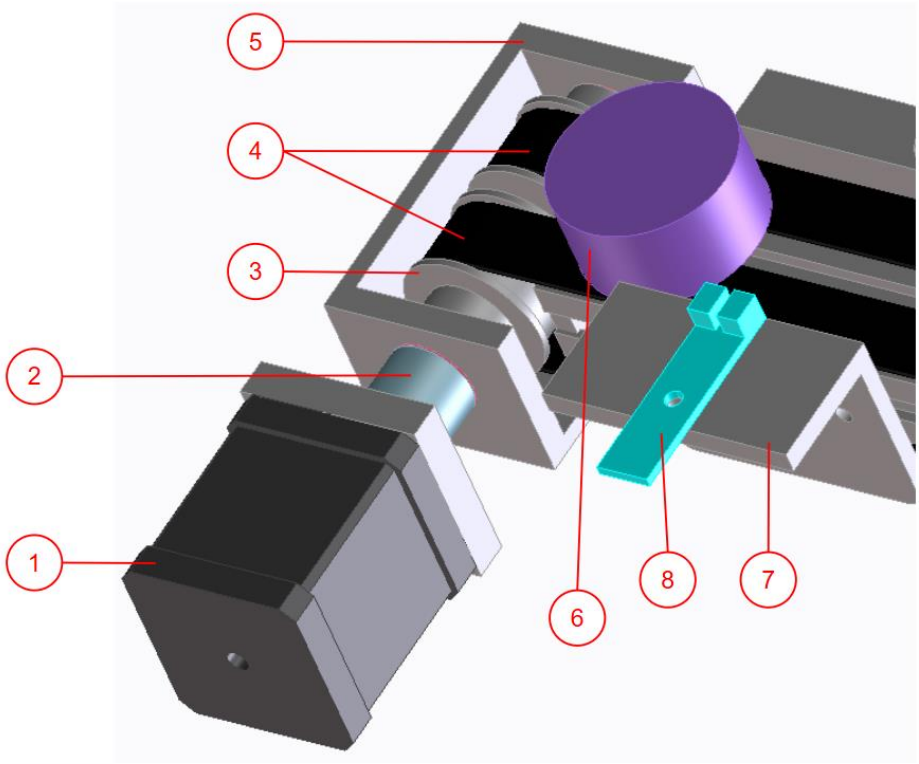


Рисунок 4.4 – Тривимірна модель привідного вузла конвеєрної лінії

Кроковий двигун (поз. 1) закріплюється на торцевій пластині несучої рами (поз. 5) через стандартний фланець і з'єднується з приводним роликом (поз. 6) за допомогою жорсткої циліндричної муфти (поз. 2), що забезпечує передачу крутного моменту без проміжних пасових або зубчастих передач. Приводний ролик встановлено в підшипниковому вузлі (поз. 3), змонтованому в поперечному пазу рами, що фіксує ролик у поздовжньому напрямку та сприймає радіальне навантаження від натягу стрічки.

Конвеєрна стрічка (поз. 4) охоплює приводний ролик по зовнішній поверхні і утримується від бокового зміщення внутрішніми напрямними рами (поз. 7). Кронштейн датчика (поз. 8) виконаний у вигляді Г-подібної пластини

з подовженим вертикальним пазом, що дозволяє регулювати висоту встановлення датчика відносно поверхні стрічки в діапазоні, необхідному для коректного налаштування робочої дистанції інфрачервоного приймача TSOP38.

Процес завантаження деталі ініціюється оператором шляхом розміщення пластикової шайби на робочій поверхні конвеєрної стрічки у зоні завантаження (зона 1). Після подачі команди «Старт» через панель керування модуль керування формує послідовність керуючих імпульсів, які через драйвер A4988 подаються на обмотки крокового двигуна NEMA 17 (поз. 1), внаслідок чого вал двигуна починає обертання з заданою кутовою швидкістю. Крутний момент передається через муфту (поз. 2) на приводний ролик (поз. 6), який приводить у рух конвеєрну стрічку (поз. 4), переміщуючи розміщену на ній деталь у напрямку зони сортування.

По мірі просування шайби вздовж стрічки вона входить у зону виявлення інфрачервоного датчика присутності, змонтованого на кронштейні (поз. 8). Модульований ІЧ-сигнал з частотою 38 кГц, що генерується випромінювачем датчика, відбивається від поверхні деталі та реєструється приймачем TSOP38, на виході якого формується низький логічний рівень.

Відповідний цифровий вхід мікроконтролера Arduino фіксує факт появи деталі, після чого лічильник оброблених виробів збільшується на одиницю та визначається напрямок подальшого сортування згідно з логікою алгоритму керування. Одночасно з цим модуль керування формує команду на відповідний серводвигун сортувального вузла з урахуванням часу випередження, розрахованого як відношення відстані між датчиком і важелем до лінійної швидкості стрічки, що забезпечує позиціонування важеля до моменту підходу деталі до зони відхилення.

На рисунку 4.5 показано вузол сортування.

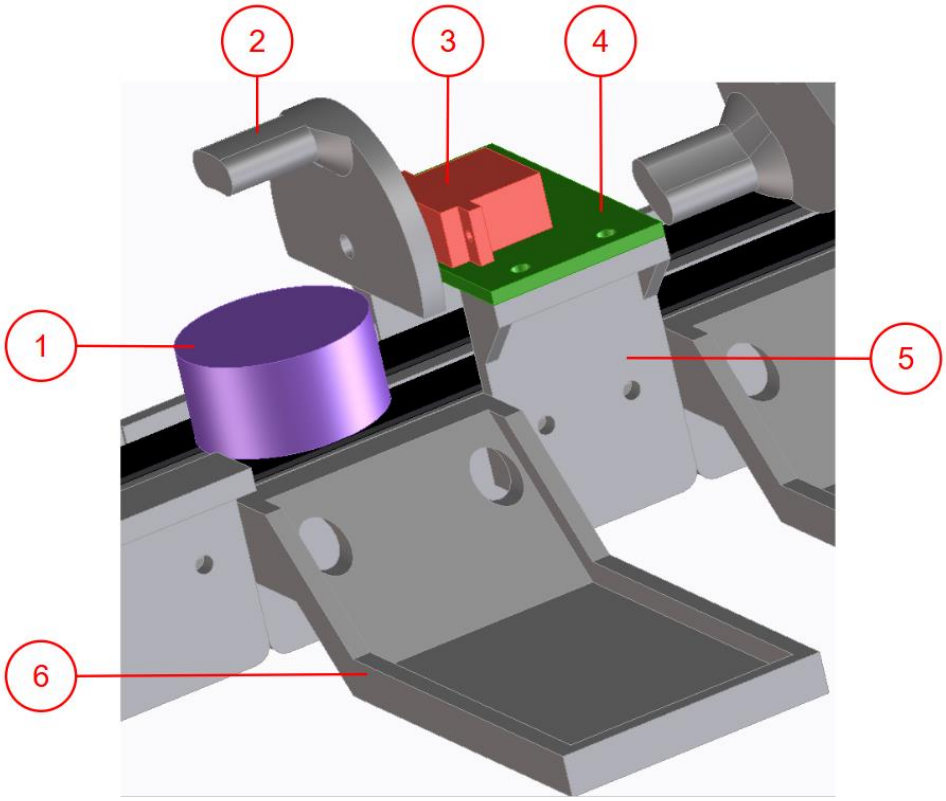


Рисунок 4.5 – Вузол сортування

На рисунку 4.5 позиціями позначено такі конструктивні елементи:

1 – пластикова шайба (деталь, що сортується);

2 – відхиляюча шторка з важелем;

3 – серводвигун MG90S;

4 – монтажна планка серводвигуна;

5 – несуча стійка вузла сортування;

6 – приймальний лоток.

Вузол сортування побудований на базі серводвигуна MG90S (поз. 3), закріпленого на монтажній планці (поз. 4), яка у свою чергу встановлена на несучій стійці (поз. 5), змонтованій перпендикулярно до поздовжньої осі конвеєрної рами. На вихідному валу серводвигуна закріплено відхиляючу шторку (поз. 2), що являє собою лопать із нижнім зрізом, висота якого підібрана таким чином, щоб у вихідному положенні між нижнім краєм шторки та поверхнею конвеєрної стрічки існував гарантований зазор, достатній для вільного проходження деталі (поз. 1) без контакту.

Функціонування вузла сортування відбувається у два послідовних етапи (рис. 4.6).

На першому етапі, після отримання від модуля керування команди на відхилення деталі, серводвигун повертає шторку на початковий кут, при якому нижній край лопаті опускається нижче верхньої площини деталі та перекриває її подальший рух вздовж стрічки, здійснюючи таким чином зупинку та фіксацію деталі перед зоною відхилення.

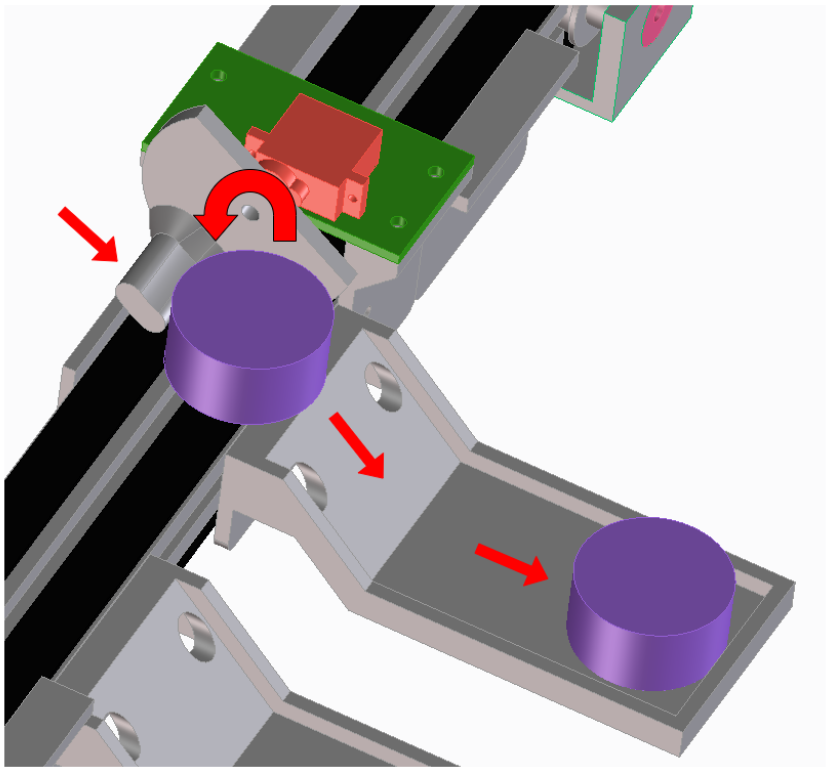


Рисунок 4.6 – Послідовність дій в процесі сортування деталей

На другому етапі серводвигун продовжує обертання до кінцевого кута 45°, при якому жорстко з'єднаний зі шторкою важіль входить у контакт з бічною поверхнею деталі та виштовхує її з конвеєрної стрічки у напрямку приймального лотка (поз. 6), по похилій поверхні якого деталь під дією власної ваги переміщується у відповідну зону накопичення. Після завершення операції

відхилення серводвигун повертається у вихідне положення очікування, відновлюючи вільний прохід для наступної деталі.

На рисунку 4.7 проілюстровано режим вільного пропускання деталей через перший вузол сортування у випадку, коли алгоритм керування визначає необхідність направлення виробу до другої зони накопичення.

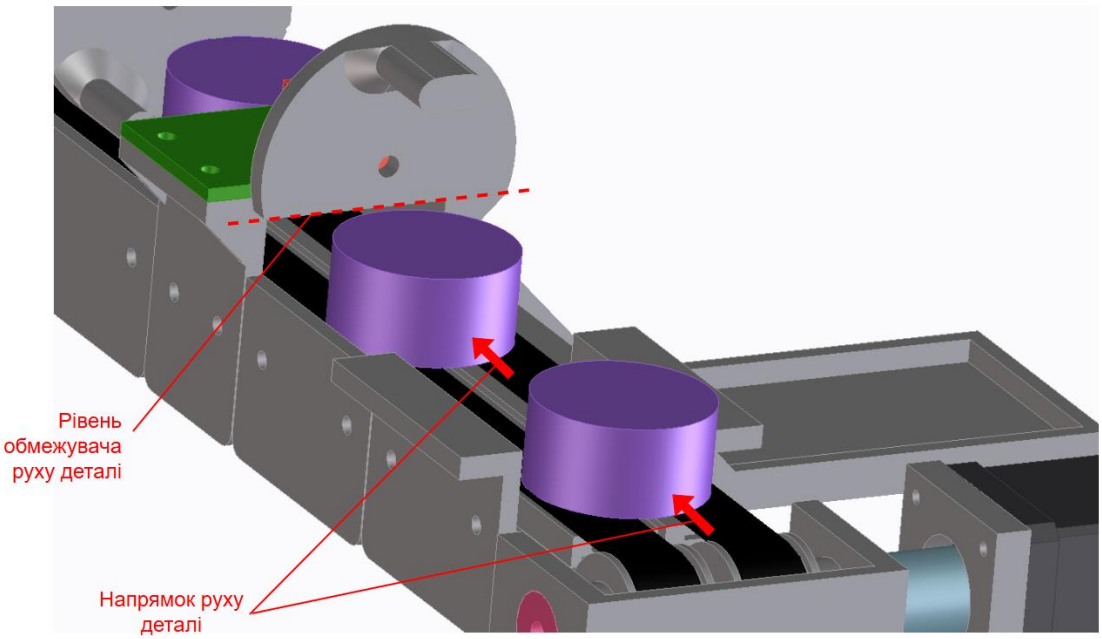


Рисунок 4.7 – Принцип реалізації вільного проходження деталі через вузол сортування

Як видно з рисунку, шторка серводвигуна першого вузла сортування перебуває у вихідному положенні очікування, при якому нижній зрізаний край лопаті розташований вище верхньої площини деталі на величину гарантованого зазору, позначеного червоною пунктирною лінією. Деталі, що переміщуються конвеєрною стрічкою у напрямку, вказаному червоними стрілками, вільно проходять під шторкою без будь-якого механічного контакту з нею, зберігаючи початковий напрямок руху вздовж поздовжньої осі конвеєра.

Такий конструктивний підхід, при якому зрізана нижня частина шторки забезпечує вільний прохід деталі у пасивному стані виконавчого механізму,

унеможливлює випадкове відхилення деталі при несправності серводвигуна або збої живлення, оскільки положення очікування є механічно безпечним за замовчуванням. Деталі, що пройшли перший вузол без відхилення, продовжують рух до другого вузла сортування, де відповідно до алгоритму почергового розподілу над ними виконується операція виштовхування у другу зону накопичення.

4.2 Моделювання роботи електричної частини демонстраційного стенду

Моделювання роботи електричної частини демонстраційного стенду виконано в онлайн середовище Wokwi, яке призначене для розробки, налагодження та тестування електронних схем на базі популярних мікроконтролерів. Використання цього середовища дозволило відтворити структуру електричних з'єднань між основними компонентами стенду, перевірити правильність їх взаємодії та протестувати алгоритми керування ще до виготовлення фізичного макета.

Wokwi – це сучасне веборієнтоване середовище моделювання електронних схем та вбудованих систем, яке дозволяє створювати, тестувати й налагоджувати проєкти без використання фізичного обладнання. Платформа підтримує моделювання мікроконтролерів Arduino, ESP32, Raspberry Pi Pico та інших популярних пристроїв, а також широкий набір електронних компонентів: світлодіодів, кнопок, дисплеїв, датчиків, сервоприводів, крокових двигунів, драйверів, інтерфейсів SPI, I²C, UART тощо.

Однією з переваг Wokwi є можливість одночасного моделювання апаратної та програмної частин проєкту. Користувач може створити електричну схему, написати програмний код, виконати його симуляцію та перевірити правильність роботи системи в режимі реального часу. Середовище підтримує інтеграцію з Visual Studio Code через розширення Wokwi, що спрощує розробку складних проєктів. Завдяки роботі безпосередньо у веббраузері платформа не потребує встановлення спеціального програмного

забезпечення та є доступною з будь-якого комп'ютера, підключеного до мережі Інтернет.

Розроблена схема поєднання обраних в попередніх розділах компонентів показана на рисунку 4.8.

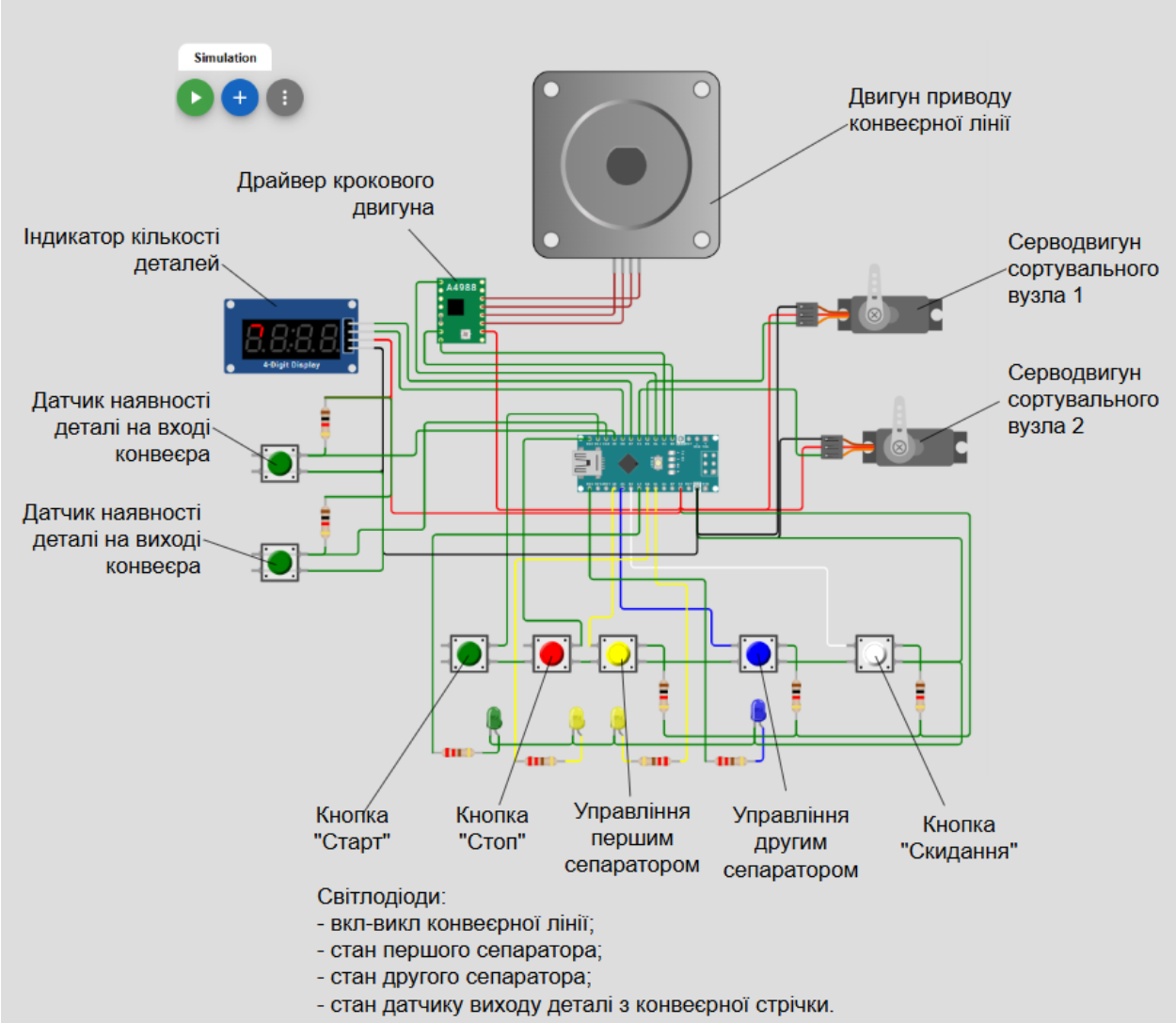


Рисунок 4.8 – Розроблена схема поєднання компонентів демонстраційного стенду

На рисунку 4.8 наведено схему електричних з'єднань демонстраційного стенду промислового конвеєра, реалізовану в середовищі симуляції Wokwi на базі мікроконтролера Arduino Nano.

Центральним елементом схеми є мікроконтролер Arduino Nano на базі ATmega328P, до якого підключено всі виконавчі механізми, сенсори та елементи індикації. Керування кроковим двигуном приводу конвеєрної лінії здійснюється через драйвер A4988, який отримує сигнали STEP та DIR з виходів D2 і D3 мікроконтролера відповідно, а сигнал дозволу роботи EN – з виходу D4. Живлення силової частини драйвера A4988 забезпечується окремо від логічної, що відповідає рекомендованій схемі підключення для захисту мікроконтролера від імпульсних перешкод силового кола.

Два серводвигуни сортувальних вузлів підключені до виходів D5 і D6 мікроконтролера, які генерують ШІМ-сигнал з частотою 50 Гц для керування кутовим положенням вихідного валу. Живлення серводвигунів здійснюється від шини 5 В зі спільною шиною GND.

Чотирирозрядний семисегментний індикатор TM1637 підключений до виходів D7 (CLK) та D8 (DIO) за двопровідним інтерфейсом і відображає поточне значення лічильника оброблених деталей у діапазоні 0000–9999.

Датчики наявності деталі на вході та виході конвеєра реалізовані у вигляді кнопок, що імітують спрацювання реальних інфрачервоних датчиків: при натисканні на відповідному вході D9 або D10 формується низький логічний рівень, що відповідає факту виявлення деталі. Входи сконфігуровані з підтягуючими резисторами (INPUT_PULLUP), тому в стані очікування на них присутній високий логічний рівень.

Панель керування включає п'ять кнопок з підтягуючими резисторами, підключених до входів D11, D12, A0, A1 та A2, що забезпечують відповідно запуск конвеєра, зупинку конвеєра, увімкнення/вимкнення першого сепаратора, увімкнення/вимкнення другого сепаратора та скидання показань лічильника.

Блок індикації стану системи складається з чотирьох світлодіодів, підключених через струмообмежуючі резистори номіналом 220 Ом до виходів A3, A4, A5 та D13, що відображають відповідно стан конвеєрної лінії (зелений), стан першого сепаратора (жовтий), стан другого сепаратора

(жовтий) та спрацювання датчика виходу деталі з конвеєрної стрічки (синій). Всі елементи схеми об'єднані спільною шиною GND, що забезпечує коректну роботу логічних рівнів між компонентами з різними джерелами живлення.

4.3 Опис роботи програми керування демонстраційним стендом промислового конвеєра

Програма керування демонстраційним стендом промислового конвеєра наведена в додатку А. Програма реалізована мовою C++ у середовищі Arduino IDE та побудована за модульним принципом з неблокуючою архітектурою головного циклу виконання. Відсутність блокуючих викликів delay() у критичних секціях коду забезпечує паралельну обробку подій від усіх периферійних пристроїв в межах єдиного потоку виконання, що є принциповою вимогою для систем реального часу на однопроцесорних мікроконтролерах.

До складу програми входять такі функціональні модулі:

– модуль ініціалізації;

– модуль обробки кнопок керування;

– модуль керування кроковим двигуном;

– модуль обробки датчиків присутності деталі;

– модуль планувальника подій сепараторів;

– модуль індикації.

Модуль ініціалізації виконується одноразово при подачі живлення або апаратному скиданні мікроконтролера. В межах функції setup() здійснюється конфігурація напрямку роботи всіх задіяних виводів, початкове позиціонування серводвигунів у положення вільного пропускання деталей, ініціалізація індикатора TM1637 з виведенням нульового значення лічильника, налаштування вбудованих підтягуючих резисторів для входів кнопок і датчиків, а також очищення черги відкладених подій сепараторів.

Приклад реалізації модуля ініціалізації показано на рисунку 4.9.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("=== Conveyor Demo Stand ==="));

  // Кроковий двигун
  pinMode(STEP_PIN,   OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN,    OUTPUT);
  pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);  // вимкнено при старті
  digitalWrite(DIR_PIN,    HIGH);

  // Серводвигуни
  servo1.attach(SERVO1_PIN);
  servo2.attach(SERVO2_PIN);
  servo1.write(SERVO_OPEN);
  servo2.write(SERVO_OPEN);

  // TM1637
  display.setBrightness(5);
  display.showNumberDec(0, true);

  // ІЧ-датчики
  pinMode(IR_INLET,  INPUT_PULLUP);
  pinMode(IR_OUTLET, INPUT_PULLUP);

  // Кнопки
  pinMode(BTN_START, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_STOP,  INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_SEP1,  INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_SEP2,  INPUT_PULLUP);
  pinMode(BTN_RESET, INPUT_PULLUP);

  // Світлодіоди
  pinMode(LED_CONVEYOR, OUTPUT);
  pinMode(LED_SEP1,     OUTPUT);
  pinMode(LED_SEP2,     OUTPUT);
  pinMode(LED_IR_INLET, OUTPUT);

  // Очистити чергу
  for (int i = 0; i < 4; i++) sepQueue[i].active = false;

  Serial.println(F("Ready. Press START."));
}
```

Рисунок 4.9 – Приклад реалізації модуля ініціалізації

Модуль обробки кнопок керування реалізований через функцію buttonPressed(), яка здійснює програмне усунення дребезгу контактів з витримкою 40 мс та формує одноразовий імпульс події виключно на спадному фронті сигналу. Модуль обслуговує п'ять кнопок: запуск конвеєра, зупинку конвеєра, перемикання стану першого та другого сепараторів, скидання лічильника деталей.

Приклад реалізації даного модуля показано на рисунку 4.10.

```
// Перевірка натискання кнопки (спадний фронт)
bool buttonPressed(Button &btn) {
  bool cur = digitalRead(btn.pin);
  if (cur != btn.lastState && millis() - btn.lastChange > DEBOUNCE_MS) {
    btn.lastChange = millis();
    btn.lastState  = cur;
    if (cur == LOW) return true;
  }
  return false;
}
```

Рисунок 4.10 – Приклад реалізації модуля обробки кнопок керування

На рисунку 4.11 показано приклад застосування розробленого програмного блоку опитування кнопок.

```
if (buttonPressed(btnStart) && !conveyorRunning) {
  startConveyor();
}

if (buttonPressed(btnStop) && conveyorRunning) {
  stopConveyor();
}

if (buttonPressed(btnSep1)) {
  sep1Enabled = !sep1Enabled;
  Serial.print(F("[SEP1] ")); Serial.println(sep1Enabled ? F("ON") : F("OFF"));
}

if (buttonPressed(btnSep2)) {
  sep2Enabled = !sep2Enabled;
  Serial.print(F("[SEP2] ")); Serial.println(sep2Enabled ? F("ON") : F("OFF"));
}

if (buttonPressed(btnReset)) {
  partCount = 0;
  updateDisplay();
  Serial.println(F("[COUNTER] Reset"));
}
```

Рисунок 4.11 – Приклад застосування розробленого програмного блоку опитування кнопок

Наведений фрагмент коду розміщений в тілі головного циклу loop() і виконується безперервно в кожній ітерації. Опитування всіх п'яти кнопок здійснюється послідовно через виклик функції buttonPressed(), яка повертає true лише один раз на кожне фізичне натискання – у момент виявлення спадного фронту сигналу після витримки антидребезгового фільтра 40 мс.

Перша умова перевіряє одночасне виконання двох критеріїв: факту натискання кнопки «Старт» (btnStart) та відсутності поточного руху конвеєра. Подвійна умова унеможливлює повторний виклик startConveyor() під час вже активного руху стрічки, що захищає від повторної ініціалізації драйвера A4988 у невизначеному стані.

Друга умова є дзеркальною: кнопка «Стоп» (btnStop) обробляється лише тоді, коли конвеєр дійсно працює, що виключає зайві виклики stopConveyor() у стані спокою.

Кнопки керування сепараторами (btnSep1, btnSep2) реалізують логіку перемикача-тумблера. Поточний стан після кожного перемикання виводиться в Serial Monitor через тернарний оператор – рядок "ON" або "OFF".

Кнопка скидання (btnReset) обнуляє змінну лічильника partCount та негайно оновлює показання індикатора TM1637 викликом updateDisplay(), після чого в Serial Monitor виводиться підтвердження операції. Скидання доступне в будь-який момент – незалежно від стану конвеєра та сепараторів.

Модуль керування кроковим двигуном забезпечує неблокуюче формування імпульсів STEP для драйвера A4988 на основі порівняння поточного значення системного таймера millis() з часом попереднього кроку (рис. 4.12).

```
if (conveyorRunning && (now - lastStepTime >= (STEP_DELAY_US / 1000UL))) {
  // Для точніших затримок <1 мс використовуємо мікросекунди
  // Але щоб не заважати loop(), робимо один крок за ітерацію
  digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
  lastStepTime = now;
}
```

Рисунок 4.12 – Реалізація коду керування кроковим двигуном

Модуль також реалізує функції запуску startConveyor() та зупинки stopConveyor() приводу конвеєрної лінії з відповідним керуванням сигналом ENABLE драйвера та індикаторним світлодіодом стану (рис. 4.13).

```
void startConveyor() {
  conveyorRunning = true;
  digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);   // увімкнути драйвер
  digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
  digitalWrite(LED_CONVEYOR, HIGH);
  Serial.println(F("[CONVEYOR] Start"));
}

void stopConveyor() {
  conveyorRunning = false;
  digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);  // вимкнути драйвер (утримання вимкнено)
  digitalWrite(LED_CONVEYOR, LOW);
  Serial.println(F("[CONVEYOR] Stop"));
}
```

Рисунок 4.13 – Реалізація функції запуску та зупинки крокового двигуна

Модуль обробки датчиків присутності деталі здійснює незалежний моніторинг двох вхідних сигналів – датчика входу (D9) та датчика виходу (D10) – з програмним усуненням дребезгу та детектуванням виключно спадного фронту (момент появи деталі). При спрацюванні вхідного датчика модуль збільшує значення лічильника, оновлює показання індикатора TM1637, активує відповідний світлодіод та формує запит на спрацювання сепаратора відповідно до алгоритму почергового розподілу деталей.

Модуль планувальника подій сепараторів реалізує кільцевий буфер з чотирьох елементів структури SepEvent, кожен з яких зберігає ознаку активності, абсолютний час спрацювання та номер виконавчого пристрою. Функція scheduleSep() розміщує нову подію в перший вільний елемент буфера, а функція processSepQueue() в кожній ітерації головного циклу перевіряє готовність кожної події та виконує відповідну команду серводвигуну. Від'ємні значення номера пристрою використовуються як ознака команди повернення важеля у вихідне положення, що дозволяє реалізувати двофазний цикл спрацювання сепаратора в межах єдиного механізму черги.

Приклад реалізації обробки черги при керування сепараторами показано на рисунку 4.14.

```
void processSepQueue() {
  unsigned long now = millis();
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    if (sepQueue[i].active && now >= sepQueue[i].fireAt) {
      sepQueue[i].active = false;
      int sn = sepQueue[i].servoNum;

      if (sn == 1) {
        servo1.write(SERVO_CLOSE);
        digitalWrite(LED_SEP1, HIGH);
        Serial.print(F("[SEP1] Closed, part #")); Serial.println(partCount);
        // відкрити через SEP_HOLD_MS → ставимо ще одну подію зі спеціальним номером
        // використаємо від'ємний номер як ознаку «відкрити»
        scheduleSep(-1, SEP_HOLD_MS);
      } else if (sn == 2) {
        servo2.write(SERVO_CLOSE);
        digitalWrite(LED_SEP2, HIGH);
        Serial.print(F("[SEP2] Closed, part #")); Serial.println(partCount);
        scheduleSep(-2, SEP_HOLD_MS);
      } else if (sn == -1) {
        servo1.write(SERVO_OPEN);
        digitalWrite(LED_SEP1, LOW);
        Serial.println(F("[SEP1] Open"));
      } else if (sn == -2) {
        servo2.write(SERVO_OPEN);
        digitalWrite(LED_SEP2, LOW);
        Serial.println(F("[SEP2] Open"));
      }
    }
  }
}
```

Рисунок 4.14 – Приклад реалізації обробки черги при керування сепараторами

Модуль індикації об'єднує керування чотирма світлодіодами стану системи та чотирирозрядним індикатором TM1637. Функція updateDisplay() передає поточне значення лічильника на індикатор у форматі з провідними нулями через двопровідний інтерфейс бібліотеки TM1637Display.

На рисунку 4.15 наведено приклад протоколу проведеного дослідження працездатності розробленої програми.

Розроблена програма керування демонстраційним стендом промислового конвеєра реалізує повний цикл автоматичного сортування деталей між двома лініями накопичення з почерговим розподілом потоку виробів. Архітектура програми побудована за принципом неблокуючого виконання: замість традиційного використання функції delay() для організації

часових затримок застосовується механізм порівняння поточного значення системного таймера millis() з моментом запланованої події, що дозволяє мікроконтролеру ATmega328P одночасно обслуговувати привід конвеєра, два серводвигуни, п'ять кнопок керування та два датчики присутності деталі в межах єдиного потоку виконання без взаємного блокування.

```
=== Conveyor Demo Stand ===
Ready. Press START.
[CONVEYOR] Start
[IR_INLET] Part detected. Count = 1
[SEP1] Closed, part #1
[SEP1] Open
[IR_INLET] Part detected. Count = 2
[SEP2] Closed, part #2
[SEP2] Open
[IR_INLET] Part detected. Count = 3
[SEP1] Closed, part #3
[SEP1] Open
[IR_INLET] Part detected. Count = 4
[SEP2] Closed, part #4
[SEP2] Open
[IR_OUTLET] Part passed sorting zone
[IR_INLET] Part detected. Count = 5
[SEP1] Closed, part #5
[SEP1] Open
[IR_OUTLET] Part passed sorting zone
[COUNTER] Reset
```

Рисунок 4.15 – Приклад протоколу проведеного дослідження працездатності розробленої програми

Ключовою особливістю програми є реалізація планувальника відкладених подій на основі кільцевого буфера структур SepEvent, що дозволяє ставити в чергу команди спрацювання сепараторів з заданою затримкою відносно моменту виявлення деталі датчиком. Це технічне рішення відтворює реальну виробничу логіку, за якою між моментом виявлення деталі та її фізичним відхиленням існує часовий інтервал, обумовлений відстанню між

давачем і виконавчим механізмом та швидкістю руху стрічки. Програмне усунення дребезгу контактів реалізоване єдиним універсальним механізмом через структуру Button з детектуванням фронту сигналу, що забезпечує однакову поведінку для всіх дискретних входів системи – як кнопок керування, так і датчиків присутності деталі.

З точки зору надійності програма передбачає захист від некоректних станів керування: запуск конвеєра блокується при вже активному русі стрічки, зупинка – при вже зупиненому приводі, а відключення сепараторів через кнопки-перемикачі діє незалежно від поточного стану системи і набирає чинності для наступної деталі. Виведення діагностичних повідомлень у Serial Monitor через макрос з розміщенням рядкових літералів у флеш-пам'яті дозволяє вести повноцінний журнал подій без критичного споживання обмеженого обсягу оперативної пам'яті мікроконтролера, що є важливим чинником при розробці програмного забезпечення для вбудованих систем з жорсткими ресурсними обмеженнями.

4.4 Питання охорони праці при роботі з демонстраційним стендом промислового контролера

Експлуатація демонстраційного стенду промислового конвеєра пов'язана з впливом на оператора ряду потенційно небезпечних факторів, що потребує дотримання відповідних вимог безпеки згідно з чинними нормативними документами, зокрема НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин» та ДСТУ EN 60204-1:2016 «Безпечність машин. Електрообладнання машин».

Основним джерелом електричної небезпеки при роботі зі стендом є напруга живлення силової частини драйвера крокового двигуна A4988, яка може становити до 12 В постійного струму, а також напруга мережі живлення 220 В змінного струму від якої живиться імпульсний блок живлення стенду.

Незважаючи на те, що напруги живлення керуючої частини (5 В та 3,3 В) є безпечними для людини відповідно до ДСТУ EN 50178:2007, необхідно дотримуватись таких вимог: підключення та відключення компонентів стенду слід здійснювати виключно при відключеному живленні; не допускається замикання виводів живлення та сигнальних ліній між собою; монтажні роботи з елементами схеми необхідно виконувати інструментом з ізольованими рукоятками. Блок живлення стенду повинен мати захисне заземлення корпусу, підключене відповідно до вимог ПУЕ-2017.

Конвеєрна стрічка, приводний ролик та виконавчі важелі серводвигунів є рухомими частинами стенду, що створюють потенційну небезпеку защемлення пальців або одягу оператора. Під час роботи стенду забороняється торкатись рухомої конвеєрної стрічки та роликів руками; вносити сторонні предмети в зону руху виконавчих важелів сортувальних вузлів; нахилятись над стендом на відстань менше 30 см під час активного циклу сортування. Технічне обслуговування, регулювання та усунення несправностей допускається виключно після повної зупинки конвеєра кнопкою «Стоп» та відключення живлення стенду. Конструкція стенду повинна забезпечувати надійну фіксацію на робочому столі для унеможливлення зміщення або падіння під час роботи.

Робоче місце оператора стенду повинно відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 щодо організації роботи з відеодисплейними терміналами та персональними комп'ютерами. Стенд розміщується на горизонтальній стійкій поверхні робочого столу з достатньою площею для розміщення всіх елементів без звисання за край. Рівень освітленості робочої поверхні повинен становити не менше 300 лк згідно з ДБН В.2.5-28:2018. З'єднувальні кабелі живлення та сигнальні проводи необхідно прокладати таким чином, щоб унеможливити їх натяг, перегин або перетискання рухомими частинами стенду, а також виключити можливість займання від теплових елементів схеми.

При тривалій роботі стенду слід контролювати температуру драйвера A4988 та обмоток крокового двигуна, оскільки перегрів цих елементів може призвести до їх пошкодження або займання навколишніх матеріалів. Струм

фази двигуна повинен бути відкалібрований відповідно до номінальних значень, вказаних у документації на двигун NEMA 17. У приміщенні, де експлуатується стенд, повинен бути розміщений первинний засіб пожежогасіння – вуглекислотний або порошковий вогнегасник, придатний для гасіння електрообладнання під напругою. Не допускається залишати стенд під напругою без нагляду оператора, а після завершення роботи живлення стенду повинно бути повністю відключено від мережі.

До самостійної роботи з демонстраційним стендом допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці та електробезпеки, ознайомлені з принципом роботи стенду та конструкцією його основних вузлів, а також пройшли первинний інструктаж на робочому місці. Студенти допускаються до роботи зі стендом виключно у присутності викладача або лаборанта, відповідального за безпеку навчального процесу в лабораторії.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз аналогічних демонстраційних стендів та принципів їх побудови. Розглянуті особливості роботи конвеєрних ліній. Розроблено структурну схему автоматизованої системи управління демонстраційним стендом промислового конвеєра. Схема побудована за ієрархічним принципом, де центральним елементом виступає модуль керування, який координує роботу всіх підсистем стенду.

Розроблено панель керування демонстраційним стендом, яка є основним інтерфейсом взаємодії оператора з автоматизованою системою управління конвеєром. Панель виконана у вигляді горизонтально орієнтованого модуля, на якому розміщені елементи індикації, кнопки керування та перемикачі режимів роботи.

Виконано опис алгоритму роботи стенду в демонстраційному режимі. Алгоритм роботи демонстраційного стенду промислового конвеєра реалізує логіку автоматичного сортування деталей між двома лініями накопичення з почерговим розподілом потоку виробів. Алгоритм побудований за принципом циклічної обробки деталей з контролем їх кількості та автоматичною зупинкою після досягнення заданого ліміту.

Описаний алгоритм демонструє базові принципи побудови систем автоматичного керування конвеєрними лініями з елементами сортування та може бути використаний як навчальна модель для вивчення основ промислової автоматизації, програмування мікроконтролерів та розробки алгоритмів керування технологічними процесами у виробничих умовах.

Розроблена конструкція демонстраційного навчального стенда промислового конвеєра у вигляді 3Д моделі за допомогою середовища Creo Elements/Direct Modeling Express

Моделювання роботи електричної частини демонстраційного стенду виконано в онлайн середовище Wokwi, яке призначене для розробки, налагодження та тестування електронних схем на базі популярних мікроконтролерів. Використання цього середовища дозволило відтворити структуру електричних з'єднань між основними компонентами стенду, перевірити правильність їх взаємодії та протестувати алгоритми керування ще до виготовлення фізичного макета.

Розроблена програма керування демонстраційним стендом промислового конвеєра реалізує повний цикл автоматичного сортування деталей між двома лініями накопичення з почерговим розподілом потоку виробів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 05 лютого 2025 р. № 44. – URL: https://nure.ua/wpcontent/uploads/2025/polozhennia_z_akademichnoi_dobrochesnosti.pdf (дата звернення: 09.04.2026).

2. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» для другого (магістерського) рівня вищої освіти, затверджений наказом МОН України No 1022 від 10.08.2020р. «Про затвердження стандарту вищої освіти за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології для другого (магістерського) рівня вищої освіти» Режим доступу: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/vishchaosvita/zatverdzeni%20standarty/2020/08/10/151-avtomatizatsiya-ta-kit-magistr.pdf

3. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання / Нац. стандарт України. – Вид. офіц. – [Чинний від 2017 – 07 – 01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 26 с.

4. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарєва, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2023. 65 с.

5. MecLab Technology for schools. Startseite Festo MINT & Bionics4Education. URL: https://stem.festo.com/us/en/products-courses/mechatronics/meclab/index.html (date of access: 10.04.2026).

6. Startseite Festo MINT & Bionics4Education. Startseite Festo MINT & Bionics4Education. URL: https://stem.festo.com (date of access: 10.04.2026).

7. IMS Industrial Mechatronics System – the New Generation - Alpha Technical Solutions Inc. Alpha Technical Solutions Inc. URL: https://alphatsinc.com/lucas-nulle/automation-technology/mechatronic-systems/ims-industrial-mechatronics-system-the-new-generation/ (date of access: 10.04.2026).

8. UniTrain - Alpha Technical Solutions Inc. Alpha Technical Solutions Inc. URL: https://alphatsinc.com/lucas-nulle/unitrain/ (date of access: 10.04.2026).

9. Призначення і види різного конвеєрного і елеваторного обладнання URL: https://erk.com.ua/news/news-10/#:~:text=Призначення%20і%20види%20різного%20конвеєрного%20та%20елеваторного,і%20призначення%20для%20різних%20потреб%20і%20виробництв.6тв. (дата звернення: 10.04.2026).

10. Пластинчастий конвеєр. URL: https://stprom.com.ua/ua/p15330832-plastinchatyj-konvejer.html?srsltid=AfmBOoo2TJO2KbGfsm_6_km4j0n_f46FyAjI7KBWOIhwtzZrM6Uqss7t (дата звернення: 10.04.2026).

11. Роликові конвеєри, рольганги. TAMТехніка. URL: https://tamtechnica.com.ua/portfolio-view/rolikovi-konveyeri-rolgangi/ (дата звернення: 10.04.2026).

12. Скребковий Конвеєр. URL: https://kirelmash.com.ua/transportery-tls/?gad_source=1&gad_campaignid=20340860767&gbraid=0AAAADnZ2lAzJkN3-RcpvjG-3tu_eQHmn&gclid=Cj0KCQjwv-LOBhCdARIsAM5hdKfCw19F9GjcipV2c41ybmrID5EmqO6XeTCI96COunWnXfdaqjV1wawaAnBZEALw_wcB (дата звернення: 10.04.2026).

13. ASCO Screw conveyor. URL: https://www.machineseeker.com.ua/asco-screw+conveyor+-+horizontal/i-19895500?srsltid=AfmBOor10CwROSRoWF0q_EdBgvdAFwR1EC71MtipvfW9d8JTLuYUZ_jm (date of access: 10.04.2026).

14. Ланцюговий конвеєр. URL: https://konsort.com.ua/catalog/lanczyugovyj-konveyer-transporter/ (дата звернення: 10.04.2026).