



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських
технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі» за спеціальністю
133 Галузеве машинобудування
**на тему: «Розробка та дослідження мехатронної системи
керування електроприводом конвеєрного обладнання»**

Керівник роботи

Богдан ЦИМБАЛ

Консультант від
бази практики

Віктор БРАНИЦЬКИЙ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Здобувач

Наталія КАРЯВКІНА

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Бондар О.В

Запоріжжя 2026



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
ОПП Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Світлана ГУРКОВСЬКА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«09» березня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Карявкіна Наталія Сергіївна
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Розробка та дослідження мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання
керівник роботи (проєкту) Цимбал Богдан Михайлович, доктор наук з державного управління, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 21.02.2026 р. №41

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 22.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з обраної тематики, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ТОВ «МЕТІНВЕСТ МАШИНЕРІ» м. Кривий Ріг, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз конструкцій та систем керування конвеєрним обладнанням. 2. Розробка мехатронної системи керування електроприводом конвеєра. 3. Моделювання та дослідження системи керування. 4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи керування електроприводом конвеєра. 5. Охорона праці та безпека експлуатації обладнання. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу: презентація за темою кваліфікаційної роботи та креслення: 1. Загальний вигляд конвеєрного обладнання – креслення, формат А3 – 1 арк. 2. Кінематична схема конвеєра – схема, формат А3 – 1 арк. 3. 3D-модель конвеєрного обладнання – модель (візуалізація), формат А3 – 1 арк. 4. Структурна схема мехатронної системи керування електроприводом конвеєра – схема, формат А3 – 1 арк. 5. Функціональна схема системи керування конвеєрним обладнанням – схема, формат А3 – 1 арк. 6. Монтажна схема шафи



керування (розміщення контролера, частотного перетворювача, комутаційної апаратури) – **креслення**, формат **A3** – 1 арк.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)

7. Дата видачі завдання 09 березня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекта)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз конструкцій та систем керування конвеєрним обладнанням	20.04.2026 – 24.04.2026	
2	Розділ 2. Розробка мехатронної системи керування електроприводом конвеєра	27.04.2026 – 01.05.2026	
3	Розділ 3. Моделювання та дослідження системи керування	04.05.2026 – 08.05.2026	
4	Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи керування електроприводом конвеєра	11.05.2026 – 15.05.2026	
5	Розділ 5. Охорона праці та безпека експлуатації обладнання	18.05.2026 – 22.05.2026	
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	25.05.2026 – 29.05.2026	
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	01.06.2026 – 05.06.2026	
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	08.06.2026 – 12.06.2026	
8	Рецензування завершеної роботи.	15.06.2026 – 19.06.2026	
9	Захист	22.06.2026 – 26.06.2026	

Здобувач

(підпис)

Наталія КАРЯВКІНА

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Богдан ЦИМБАЛ

(прізвище та ініціали)



АНОТАЦІЯ

Карявкіна Наталія Сергіївна. Розробка та дослідження мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». ОПП «Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі». ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є розробка та дослідження мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання з використанням сучасних засобів автоматизації.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування та автоматизованого керування конвеєрним обладнанням у складі транспортних систем промислових підприємств.

Предмет дослідження – мехатронна система керування електроприводом конвеєрного обладнання, засоби автоматизації, алгоритми регулювання швидкості та методи забезпечення енергоефективної і безпечної роботи електропривода конвеєра.

У першому розділі проведено аналіз сучасних конструкцій конвеєрного обладнання, типів конвеєрів, їх технічних характеристик та систем керування електроприводами. Визначено основні переваги, недоліки та проблеми існуючих систем автоматизації.

У другому розділі розроблено мехатронну систему керування електроприводом конвеєра, сформовано структурну та функціональну схеми, обґрунтовано вибір програмованого логічного контролера, датчиків і частотного перетворювача.

У третьому розділі виконано математичне та комп'ютерне моделювання системи керування в середовищі MATLAB/Simulink. Досліджено перехідні процеси електропривода, режими пуску, регулювання швидкості та роботу системи при змінному навантаженні. Проведено аналіз результатів моделювання та оптимізацію параметрів ПІ-регулятора.

У четвертому розділі здійснено техніко-економічне обґрунтування впровадження системи. Визначено показники енергоспоживання, річну економію електроенергії.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, безпеки експлуатації конвеєрного обладнання, систем аварійного відключення та захисту персоналу відповідно до вимог нормативних документів.

КОНВЕЄРНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, МЕХАТРОННА СИСТЕМА, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПЛК, ПІ-РЕГУЛЯТОР, MATLAB/SIMULINK, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.



ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ КОНВЕЄРНИМ ОБЛАДНАННЯМ	10
1.1 Огляд сучасних конструкцій конвеєрів	10
1.2 Види конвеєрів та їх технічні характеристики	16
1.3 Системи керування електроприводами конвеєрів	19
1.4 Переваги та недоліки існуючих систем керування електроприводами конвеєрів	21
1.5 Проблеми та потреби автоматизації конвеєрного обладнання електроприводами конвеєрів	24
Висновок до 1	25
2 РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА	26
2.1 Постановка задачі та технічні вимоги	26
2.2 Структурна схема системи керування	27
2.3 Функціональна схема системи	30
2.4 Вибір та обґрунтування компонентів (контролери, датчики, перетворювачі частоти)	31
2.5 Алгоритми керування електроприводом	34
2.6 Заходи безпеки та аварійного відключення	36
Висновок до 2	40
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	41
3.2 Математичне моделювання системи	42
3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи	46
3.4 Результати експериментальних досліджень системи керування електроприводом конвеєра	47
3.5 Аналіз результатів та оптимізація системи	49
Висновок до 3	50
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА	51
4.1 Оцінка ефективності технічних рішень	51
4.2 Розрахунок економічної доцільності впровадження	51
4.3 Аналіз енергоспоживання та продуктивності	53
4.4 Прогнозований економічний та технічний ефект	54



4.5 Термін окупності та рекомендації щодо впровадження	55
Висновок до розділу.....	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ.....	57
5.1 Основні вимоги охорони праці	57
5.2 Заходи безпеки під час експлуатації конвеєрного обладнання	58
5.3 Захист операторів та обслуговуючого персоналу	59
5.4 Система аварійного відключення та сигналізації	61
5.5 Впровадження інструкцій та нормативів з охорони праці	62
Висновок до 5.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
Додаток А	70
Додаток Б	71
Додаток В	72
Додаток Г	73
Додаток Е	74
Додаток Є	75
Додаток Ж	76



ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ПЛК – програмований логічний контролер
ПЧ – частотний перетворювач
ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор
АСУ – автоматизована система управління
SCADA – система диспетчерського керування та збору даних
HMI – інтерфейс оператора
U – напруга, В
I – струм, А
P – потужність, Вт
M – електромагнітний момент, Н·м
 ω – кутова швидкість, рад/с
n – частота обертання, об/хв
U_{зш} – сигнал завдання швидкості
U_ш – сигнал зворотного зв'язку за швидкістю
U_{зс} – сигнал завдання струму
U_с – сигнал зворотного зв'язку за струмом
U_к – керуючий сигнал
K_p – коефіцієнт пропорційної складової регулятора
K_i – коефіцієнт інтегральної складової регулятора
e(t) – похибка регулювання
М – електродвигун
Р – редуктор
Б – приводний барабан
РШ – регулятор швидкості
РС – регулятор струму
ЛО – ланка обмеження
СІФК – система імпульсно-фазового керування
ФП – функціональний перетворювач



ВСТУП

Автоматизація конвеєрного обладнання є актуальною задачею сучасного машинобудування. Конвеєри впливають на продуктивність підприємства та безпеку персоналу. Зростання енергетичних витрат та конкуренції потребує впровадження інтелектуальних систем керування.

Мехатронні системи керування об'єднують механічні, електронні та програмні компоненти. Вони забезпечують точне регулювання роботи електроприводів. Системи підвищують надійність обладнання та знижують ризик аварій.

Аналіз показав, що сучасні конвеєрні системи потребують удосконалення керування. Застосування частотно-регульованих приводів та автоматизованих систем контролю підвищує точність роботи обладнання. Використання мехатронного підходу дозволяє зменшити енергоспоживання та стабілізувати роботу при змінних навантаженнях. Водночас існуючі рішення не повністю відповідають вимогам енергоефективності та інтеграції в сучасні системи автоматизації.

Результати роботи полягають у розробці мехатронної системи керування електроприводом конвеєра. Система забезпечує оптимальні режими роботи та підвищує надійність і безпеку. Розроблено структурну та функціональну схеми. Обрано основні компоненти системи. Запропоновано алгоритми керування. Проведено оцінку ефективності впровадження. Результати підтверджують доцільність використання розробки для підвищення продуктивності та зниження витрат.

Метою роботи є розробка та дослідження мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання. Система повинна підвищити продуктивність, енергоефективність та безпеку.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування та автоматизованого керування конвеєрним обладнанням у складі промислових транспортних систем гірничо-металургійного комплексу.

Предмет дослідження – мехатронна система керування електроприводом конвеєрного обладнання, що включає програмований логічний контролер, частотний перетворювач, датчики контролю параметрів роботи та алгоритми автоматичного регулювання швидкості й захисту електропривода.

Завдання роботи:

- 1) Проаналізувати сучасні конструкції конвеєрів та системи керування.
- 2) Виявити переваги та недоліки існуючих рішень.
- 3) Розробити структурну та функціональну схему системи керування.
- 4) Обрати контролери, датчики та перетворювачі частоти.
- 5) Розробити алгоритми керування та врахувати заходи безпеки.
- 6) Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження.



Методи дослідження включають аналіз літератури, нормативних документів, патентів, даних підприємства, моделювання та експериментальні дослідження.

Практична значимість роботи полягає у можливості впровадження розробленої мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання на промислових підприємствах для підвищення енергоефективності, стабільності та безпеки роботи транспортних систем. Запропоновані технічні рішення дозволяють зменшити пускові струми, знизити механічні навантаження на обладнання, підвищити точність регулювання швидкості та скоротити експлуатаційні витрати.

Аналіз показав, що застосування замкненої системи керування з ПІ-регулятором забезпечує стабільність роботи електропривода та точність регулювання швидкості. Перерегулювання не перевищує 5 %, а динамічні процеси мають затухаючий характер. Пускові струми обмежуються та є значно меншими порівняно з прямим пуском. Система забезпечує стійку роботу при змінному навантаженні.

Результати роботи полягають у розробці мехатронної системи керування електроприводом конвеєра з параметрами: потужність двигуна 30 кВт, напруга 380 В, частота обертання 1500 об/хв. Час виходу на усталений режим становить 2–3 с. Забезпечено стабільне регулювання швидкості та адаптацію при зміні навантаження.

Апробація результатів роботи. Основні результати кваліфікаційної роботи були представлені та обговорені на студентських науково-технічних конференціях і відображені у наукових публікаціях, присвячених питанням автоматизації, мехатронних систем та електроприводів конвеєрного обладнання.

1. Карявкіна Н.С., Цимбал Б.М. Теоретичні дослідження автоматизації ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами. Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування : збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції (м. Вінниця, 16-17 квітня 2025 р.) / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф.. – Краматорськ : ДДМА, 2025. с. 142-148.

2. Карявкіна Н.С., Цимбал Б.М. Дослідження модернізації ливарного виробництва промисловими дронами. XXXII Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» Матеріали конференції – Кременчук: КрНУ, 2025. с. 126-128.

3. Цимбал Б.М, Карявкіна Н.С. Розробка мехатронної системи на базі БПЛА для моніторингу техногенних ризиків у гірничо-металургійному виробництві. Start in Science: студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей. – Одеса : Олді+, 2025. – С. 154-156.



1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ КОНВЕЄРНИМ ОБЛАДНАННЯМ

1.1 Огляд сучасних конструкцій конвеєрів

Без конвеєра в сучасному серійному виробництві зараз не обійтися. Воно широко застосовується у галузях, де потрібно переміщувати сипучі, кускові та штучні вантажі. Конвеєри використовують на заводах, у портах та в інших промислових і складських сферах.

Застосування такого обладнання значно прискорює та спрощує виробничі й транспортні процеси. Воно забезпечує безперервність роботи підприємства та підвищує його ефективність [1].

Класифікація конвеєрів є досить широкою. Вона враховує напрям переміщення, тип і габарити вантажу, а також виконувані функції. За призначенням розрізняють транспортні, сортувальні та інші види конвеєрів.

Конвеєри – це невід’ємна частина сучасної промисловості та логістики, які використовуються для автоматизації переміщення матеріалів та виробів на виробничих підприємствах та в складах [5].

Сучасний розвиток будівельної галузі потребує підвищення ефективності виробничих процесів. Важливим є також постійне оновлення та вдосконалення обладнання відповідно до досягнень науково-технічного прогресу. На підприємствах з виробництва бетонних сумішей використовується комплекс технічних засобів для виконання основних, обслуговуючих і допоміжних операцій [1, с. 34].

До основних операцій належать змішування та підготовка компонентів бетонної суміші. Обслуговуючі операції включають транспортування складових, а також завантаження і розвантаження сипучих матеріалів. Допоміжні процеси забезпечують безперебійну роботу обладнання та його справний стан.

Обслуговуючі операції разом з основними суттєво впливають на продуктивність виробництва бетонної суміші. Важливо забезпечити своєчасну та безперервну подачу матеріалів до місць використання.

Значення мають швидкість транспортування, збереження якості матеріалів, скорочення часу операцій і підвищення продуктивності праці. Досягнення цих показників забезпечується за рахунок механізації та автоматизації транспортних процесів [1, с. 34].

Стрічковий конвеєр – це замкнена стрічка, яка рухається по колу завдяки тяговому механізму. Таке обладнання застосовують на різних виробництвах для переміщення вантажів. Воно зручне як при ручному контролі, так і в автоматичному режимі.

Робота конвеєра базується на терті між приводним барабаном і стрічкою. Стрічка рухається по нерухомих опорах, а її ковзання

забезпечують ролики. Конвеєри дозволяють обирати потрібну довжину і ширину стрічки (рисунок 1.1) [4]. У гірничій промисловості їх довжина може досягати кількох кілометрів [3].



Рисунок 1.1 – Загальна схема стрічкового конвеєра

Ланцюгові конвеєри застосовуються для переміщення важких вантажів. Їх робота базується на використанні безперервного ланцюга, який рухається по напрямних і передає тягове зусилля вантажу [5].

Такі конвеєри відзначаються високою міцністю та здатністю працювати в складних умовах експлуатації відображено на рисунку 1.2 [6].

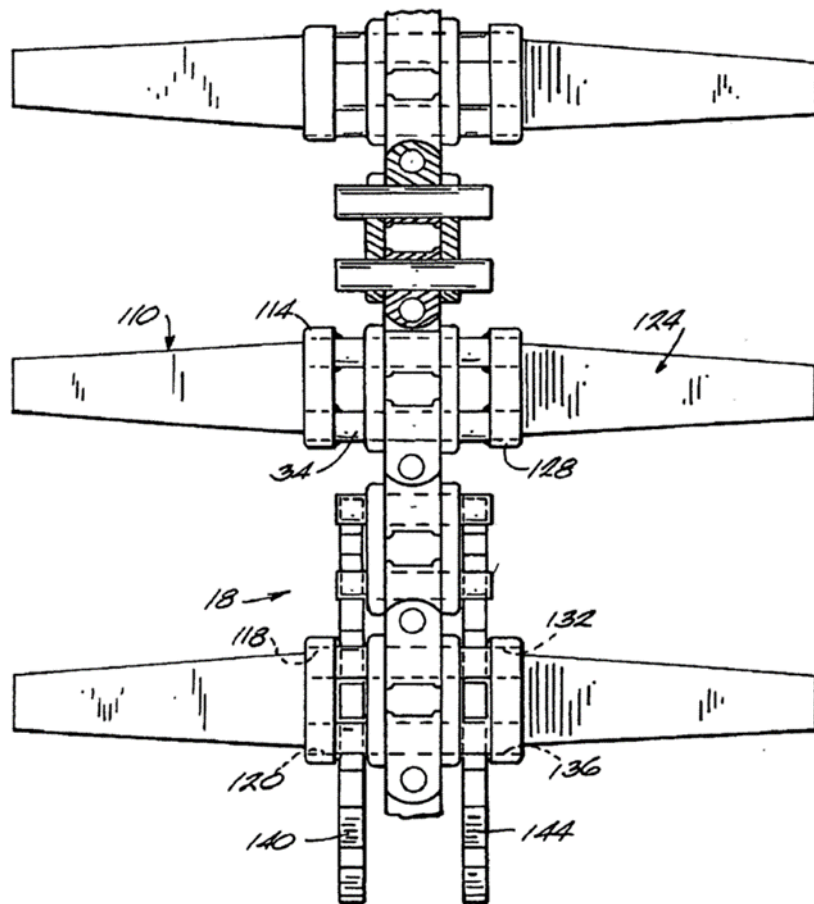


Рисунок 1.2 – Схема ланцюгового конвеєра

Гвинт (шнек) – робоча деталь гвинтового конвеєра, призначеного для транспортування вантажу переміщенням вздовж обертається гвинтової поверхні всередині труби [7, с. 23].

Основним елементом є гвинт, що обертається всередині кожуха і переміщує матеріал уздовж осі (рисунок 1.3). Вони забезпечують герметичність процесу та можливість роботи під кутом або у вертикальному положенні [8].

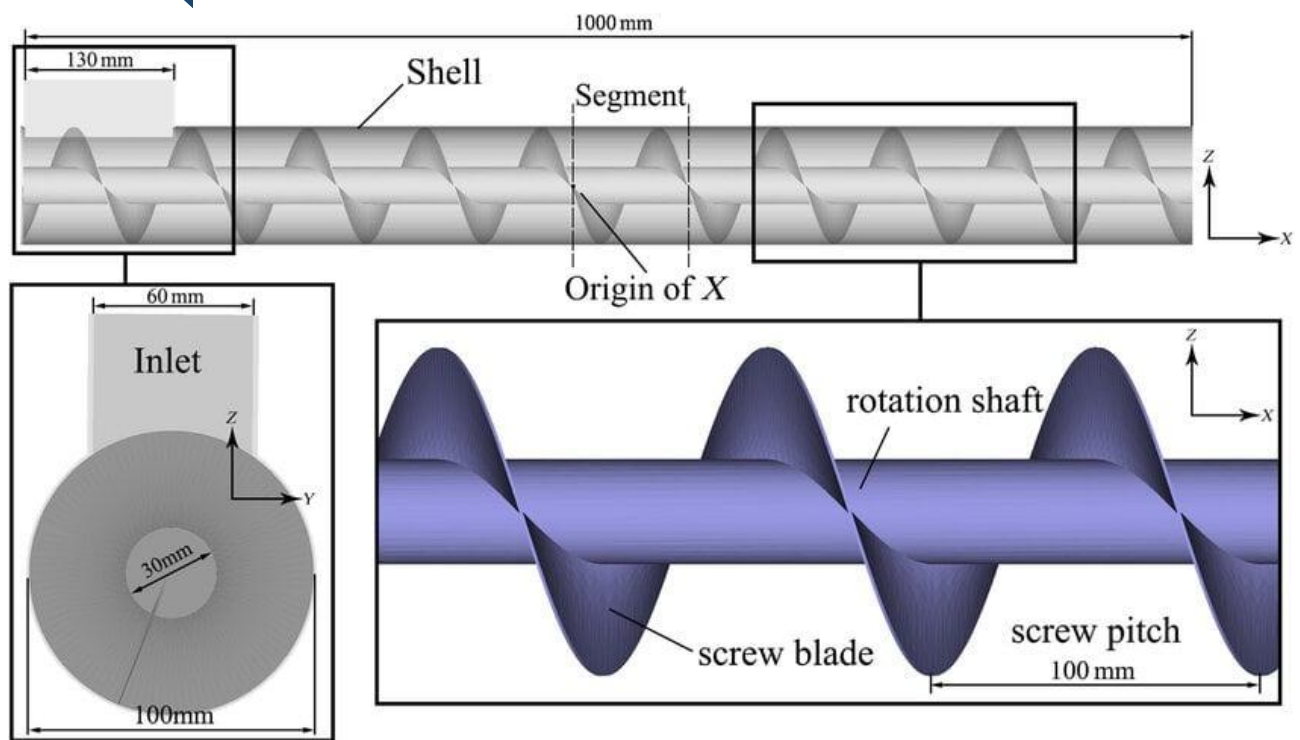


Рисунок 1.3 – Конструкція гвинтового конвеєра

Коли поряд із транспортуванням необхідно забезпечити перемішування матеріалу, застосовують гвинти з фасонними лопатями або окремими лопатками. Обґрунтовано використання шнекового конвеєра з ребрами на кожусі для транспортування сипучих матеріалів. У результаті підвищується продуктивність процесу [7, с. 23-24].

Також, ще один конвеєри, пластинчасті та ковшові конвеєри використовуються для переміщення штучних або сипучих вантажів по складних траєкторіях. Ковшові системи дозволяють здійснювати вертикальне транспортування матеріалів за допомогою закріплених ковшів, що рухаються замкнутим контуром наведено у рисунку 1.4 [5].

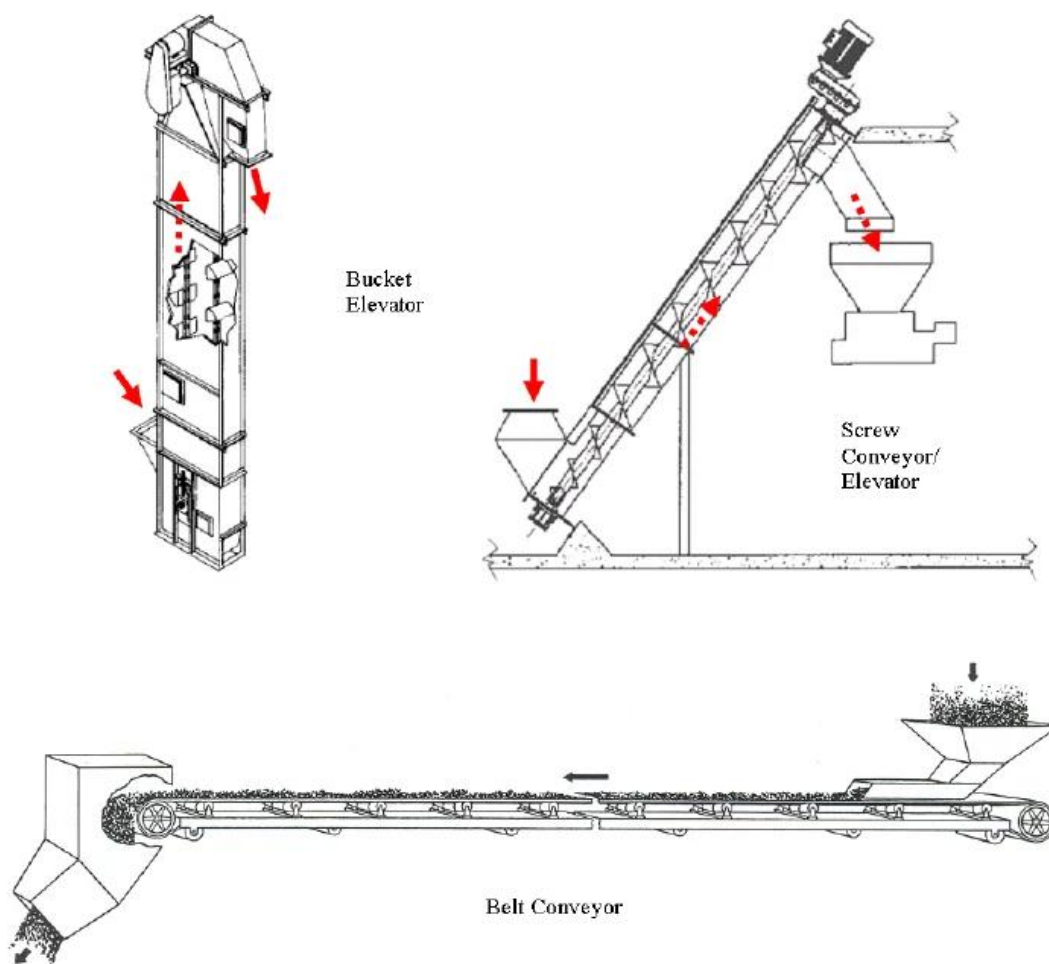


Рисунок 1.4 – Ковшовий конвеєр

Пневматичні конвеєри застосовуються для транспортування дрібнодисперсних матеріалів за допомогою потоку повітря. Такі системи забезпечують герметичність транспортування та мінімізують втрати матеріалу, що особливо важливо у сучасних виробничих умовах (рисунок 1.5) [9].

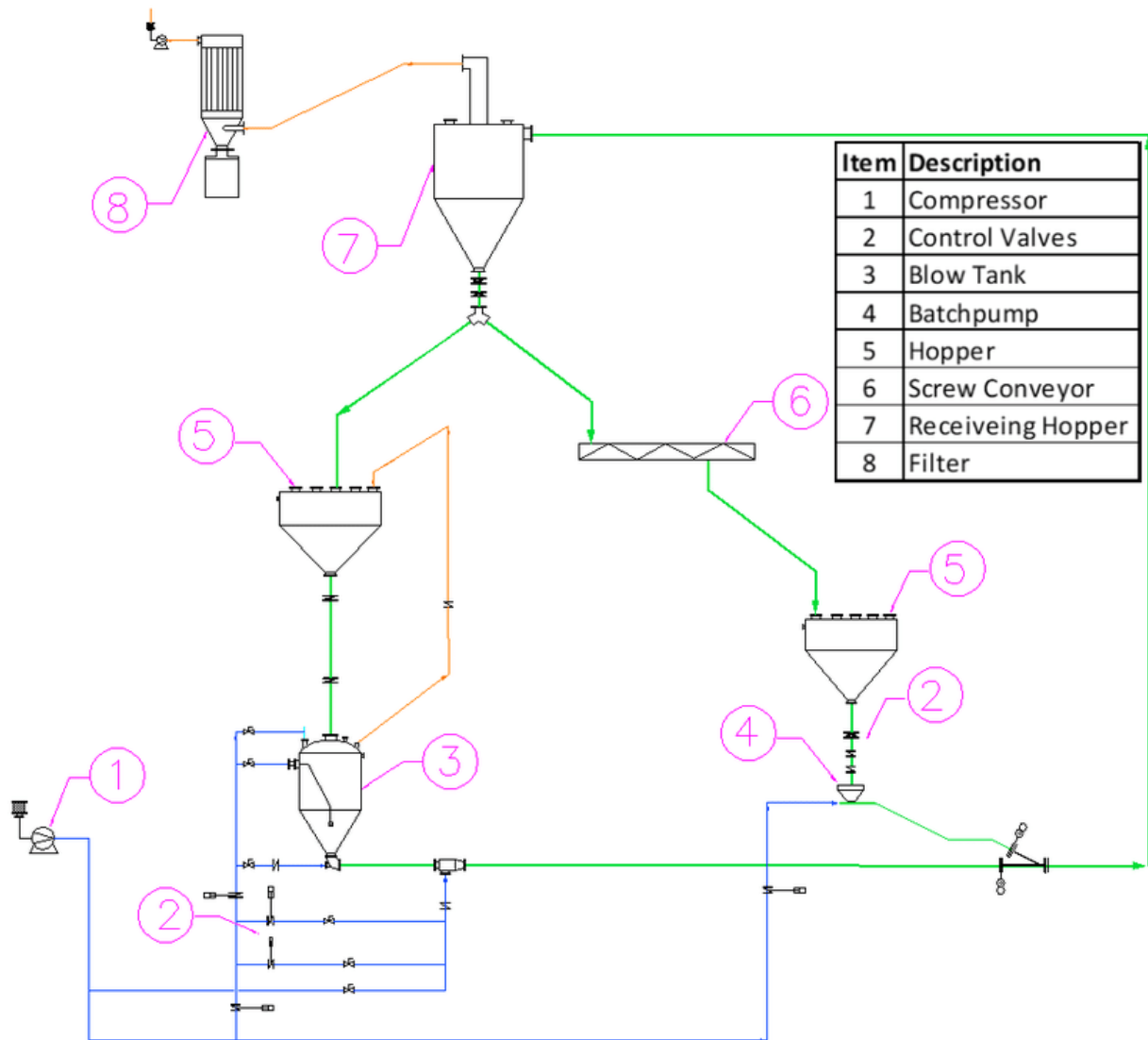


Рисунок 1.5 – Схема пневмотранспорту

З огляду на це сучасні конвеєрні системи представлені різними конструктивними рішеннями. Кожен тип має свої особливості будови та принципу дії. Вибір конвеєра залежить від властивостей вантажу, умов експлуатації та вимог до продуктивності.

Аналіз конструкцій показує, що найбільш поширеними є стрічкові, ланцюгові, гвинтові, ковшові та пневматичні конвеєри. Вони відрізняються за способом транспортування та конструктивним виконанням. Різноманітність рішень забезпечує можливість їх ефективного застосування у різних галузях промисловості.

Отже, розгляд сучасних конструкцій конвеєрного обладнання є основою для подальшого аналізу систем керування. Це дозволяє визначити вимоги до електроприводів і засобів автоматизації, які розглядаються у наступних підрозділах.

1.2 Види конвеєрів та їх технічні характеристики

Транспортування сипких матеріалів у закритих технологічних магістралях широко застосовується у виробничих процесах. Для цього використовують шнекові, пневматичні, гвинтові та інші види конвеєрів. Вибір типу обладнання залежить від властивостей матеріалу та умов експлуатації.

Шнекові конвеєри характеризуються простотою конструкції та надійністю роботи. Вони можуть працювати в горизонтальному, похилому та вертикальному положеннях. Основними технічними характеристиками є продуктивність, діаметр шнека, крок спіралі та швидкість обертання [11]. Також важливими параметрами є потужність електроприводу та довжина транспортування.

Конструктивно шнековий конвеєр складається з направляючого кожуха, гвинта, підшипникових опор і приводу. Привід може розташовуватися як з боку завантаження, так і з боку розвантаження [10]. Схема горизонтального шнекового конвеєра наведена на рисунку 1.6.

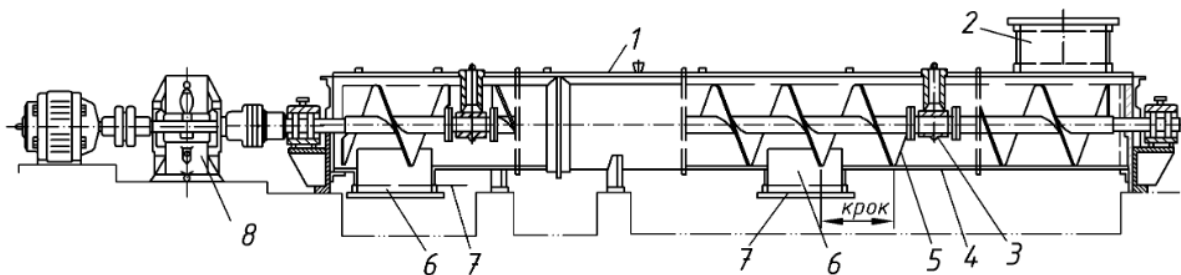


Рисунок 1.6 – Компонувальна схема горизонтального шнекового конвеєра [10]

Стрічкові конвеєри характеризуються такими основними технічними параметрами: довжина однієї конвеєрної лінії може досягати до 4 км, а потужність приводних станцій – до 5 МВт. Вони забезпечують безперервне транспортування матеріалів зі стабільною продуктивністю, яка залежить від ширини стрічки, швидкості її руху та властивостей вантажу [12]. Конвеєри здатні переміщувати сипучі, розсипчасті та штучні матеріали як по горизонтальних, так і по похилих трасах.

Ключовим конструктивним обмеженням є максимальний кут нахилу транспортування, який для стандартних стрічок зазвичай становить 16 – 20°. Експлуатаційний ресурс транспортерної стрічки коливається в межах 3 – 7 років залежно від умов роботи, зокрема абразивності матеріалу, навантаження та режиму експлуатації. Довжина окремих тканинних стрічок обмежується приблизно 300 м, що пов'язано з технологічними особливостями їх виготовлення та стикування [13].

Ефективність роботи конвеєра визначається взаємодією його основних вузлів (рисунок 1.7) [14]. Кінематична схема стрічкового конвеєра наведена у Додатку А.

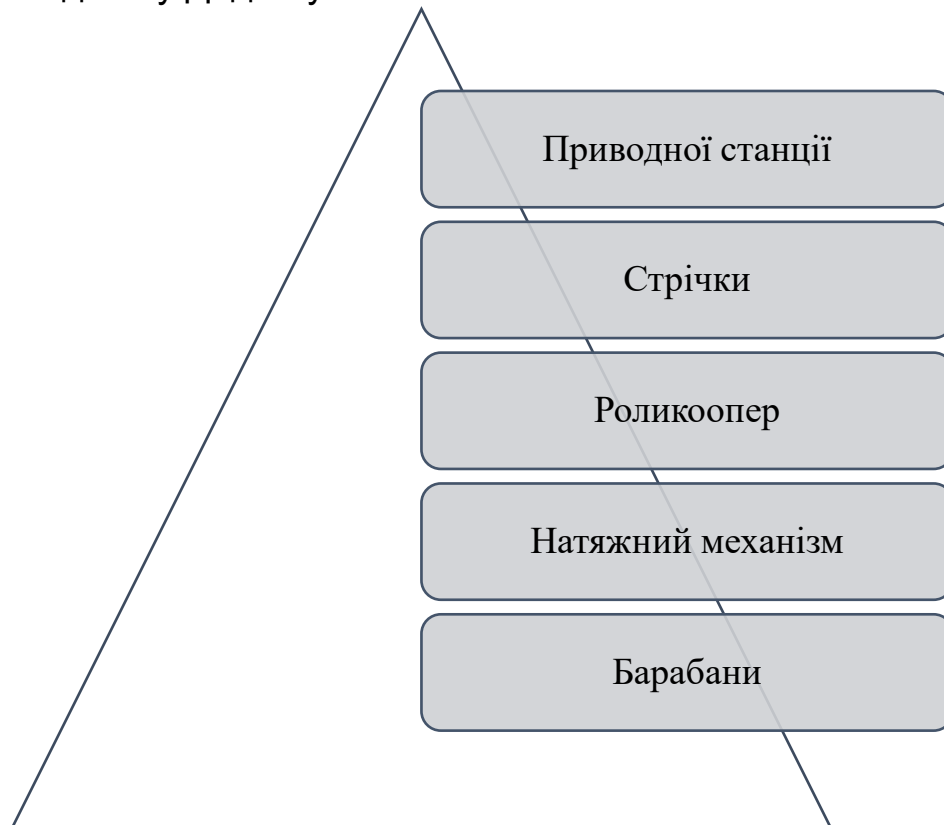


Рисунок 1.7 – Схема основних вузлів стрічкового конвеєра

Приводна система забезпечує передачу руху за рахунок сил тертя. Натяжний пристрій створює необхідне зусилля в стрічці. Він запобігає пробуксовуванню та компенсує її видовження під навантаженням. Кількість приводних барабанів може варіюватися (зазвичай 1 – 3) залежно від довжини та умов роботи конвеєра (рисунок 1.8) [14].

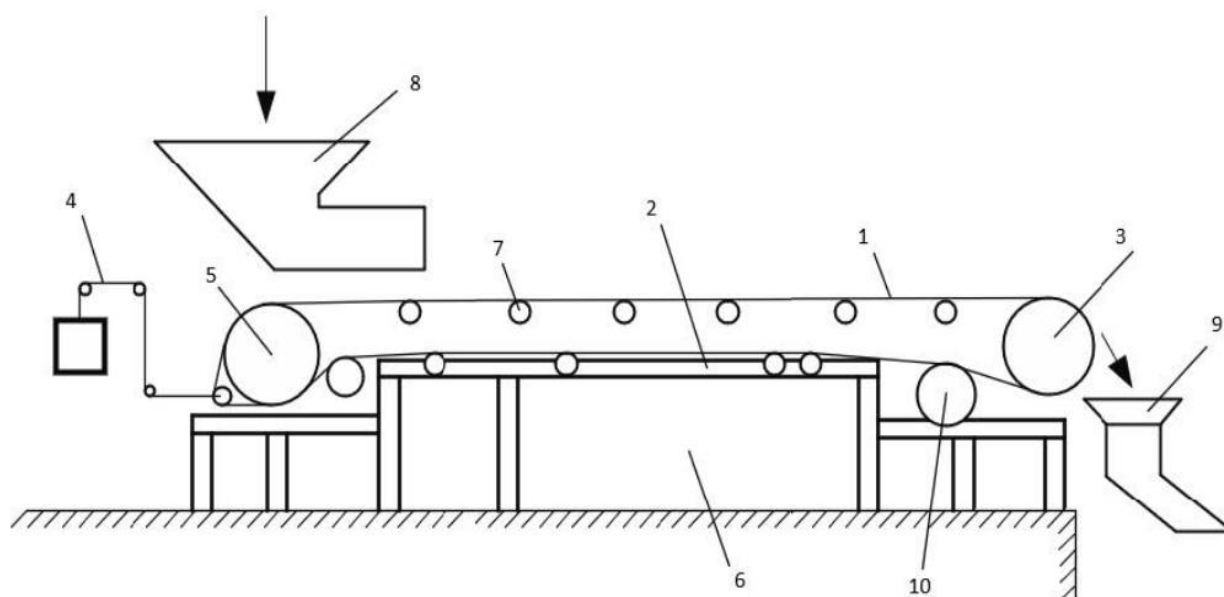


Рисунок 1.8 – Схема стрічкового конвеєра

Стрічка виконує одночасно функції несучого та тягового елемента і працює в умовах комбінованих навантажень відображено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні функції, умови роботи та властивості стрічки конвеєра [14]

Стрічка конвеєра	Характеристика
Функції	несучий елемент; тяговий елемент
Умови роботи	статичні навантаження (від маси вантажу); динамічні навантаження (пуск, зупинка); нерівномірне завантаження
Конструкція	гумові обкладки; армувальні прокладки або сталеві троси
Основні властивості	міцність; зносостійкість; допустиме видовження

Роликоопори підтримують стрічку та зменшують опір її руху. Барабани формують замкнений контур і забезпечують передачу тягового зусилля. Важливими є рівномірність завантаження стрічки, ефективне очищення її поверхні та правильне налаштування натяжної системи. Це впливає на продуктивність і надійність роботи.

Стрічкові конвеєри є складними технічними системами. Їх ефективність визначається на рисунку 1.9 [13].

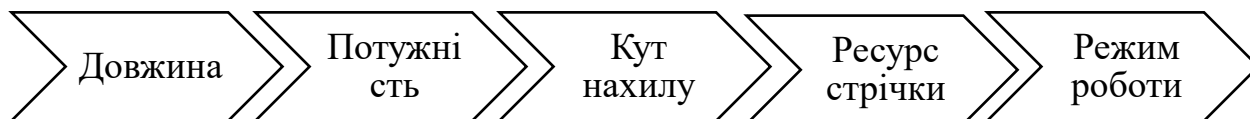


Рисунок 1.9 – Основні технічні параметри стрічкових конвеєрів

Таким чином, вибір типу конвеєра залежить від властивостей матеріалу та умов експлуатації. Шнекові конвеєри ефективні для коротких відстаней і локального транспортування сипких матеріалів.

1.3 Системи керування електроприводами конвеєрів

Система регулювання електроприводу – це сукупність пристроїв, що забезпечують автоматичне управління швидкістю, моментом, положенням та іншими параметрами електродвигуна. Вона призначена для виконання заданої технологічної операції [17].

Електропривод – це керована електромеханічна система, яка виконує перетворення електричної енергії в механічну і навпаки [15]. Електропривод має два канали – силовий та інформаційний (рисунок 1.10). Силовий канал включає перетворювач електричної енергії (ПЕ), електродвигун (М) і перетворювач механічної енергії (ПМ).

Через нього передається енергія від джерела до споживача (широкі стрілки рисунок 1.10). Інформаційний канал забезпечує керування потоком енергії, а також збір і обробку даних про стан і роботу системи (тонкі стрілки рисунок 1.10) [15].

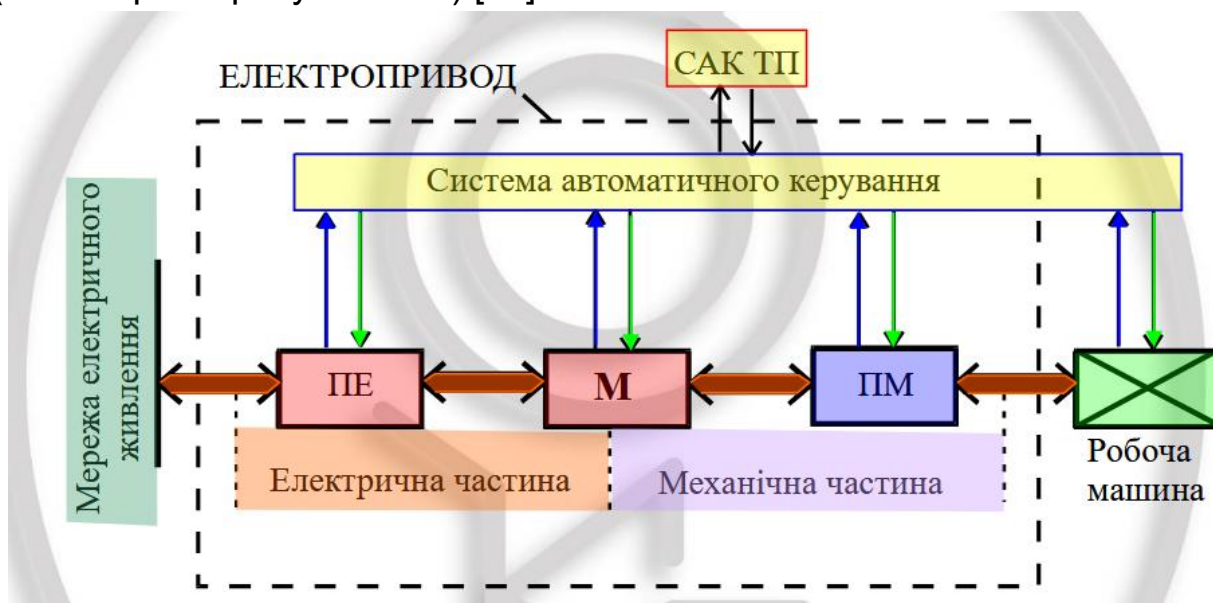


Рисунок 1.10 – Загальна структура електропривод

Електроприводи стрічкових конвеєрів працюють у складі систем автоматичного керування. Вони забезпечують регулювання швидкості руху стрічки та узгодження навантаження. Основним завданням є підтримання заданих параметрів роботи при змінних умовах навантаження.

У сучасних електроприводах конвеєрів застосовують частотне керування асинхронними двигунами. Воно дозволяє змінювати швидкість обертання шляхом зміни частоти та напруги живлення [15].

Розрізняють два основні методи частотного керування: скалярне та векторне. Скалярне керування базується на підтриманні відношення напруги до частоти ($U/f = \text{const}$). Воно є простим у реалізації, але має обмежену точність регулювання, особливо на малих швидкостях, та не забезпечує незалежного керування моментом (рисунк 1.11) [16].

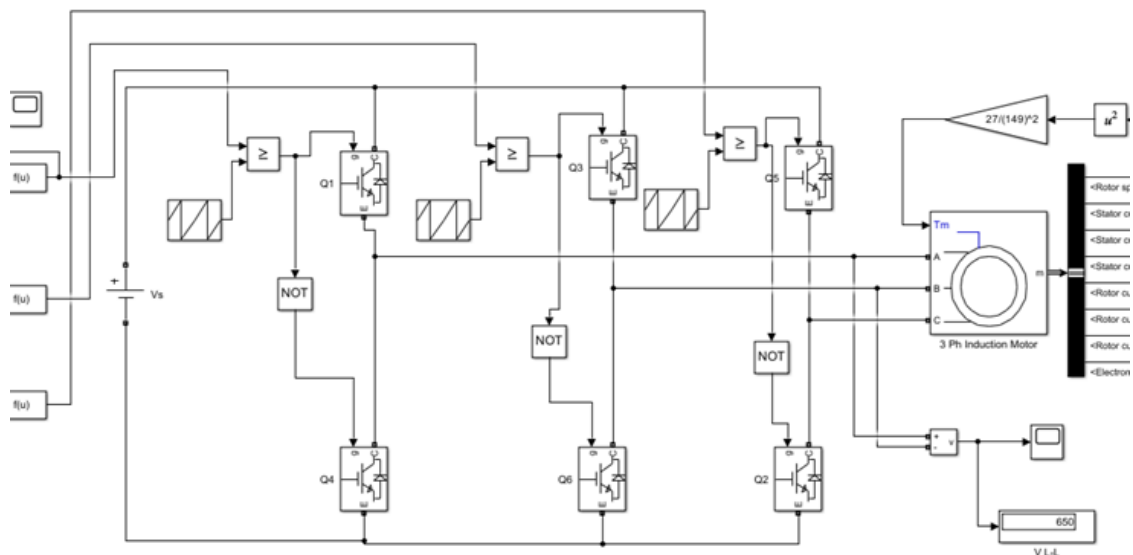


Рисунок 1.11 – Схема векторного керування асинхронним електроприводом із трифазним інвертором

Векторне керування забезпечує незалежне регулювання моменту і швидкості електродвигуна. Це досягається за рахунок використання математичної моделі двигуна. Також застосовується розділення складових струму, що відповідають за магнітний потік і момент [15].

Для стрічкових конвеєрів важливими є вимоги до системи керування. Серед них: плавний пуск і зупинка, стабільна швидкість руху, мінімізація динамічних перевантажень.

Важливим є забезпечення рівномірного розподілу навантаження. Необхідне узгодження роботи всіх елементів привода. Виконання цих вимог підвищує надійність роботи конвеєрної системи. Можемо зазначити, що це сприяє зниженню зносу її основних вузлів.

1.4 Переваги та недоліки існуючих систем керування електроприводами конвеєрів

У електроприводах конвеєрів широко застосовуються релейно-контакторні системи керування, а також системи автоматичного регулювання у функції часу, швидкості та струму.

Релейно-контакторні системи забезпечують пуск, зупинку та захист електродвигунів. Для двигунів постійного струму використовується реостатний спосіб пуску (рисунок 1.12), при якому струм якоря визначається залежністю [17]

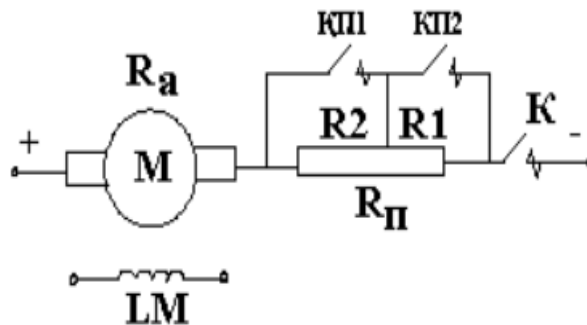


Рисунок 1.12 – схема пуску ДПС

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R_p} \quad (1.1)$$

Такий спосіб дозволяє обмежити пусковий струм і забезпечити розгін двигуна по штучних механічних характеристиках (рисунок 1.13) [17]. Його перевагами є простота реалізації та надійність, а недоліками – значні втрати енергії в пускових резисторах і ступінчастий характер регулювання.

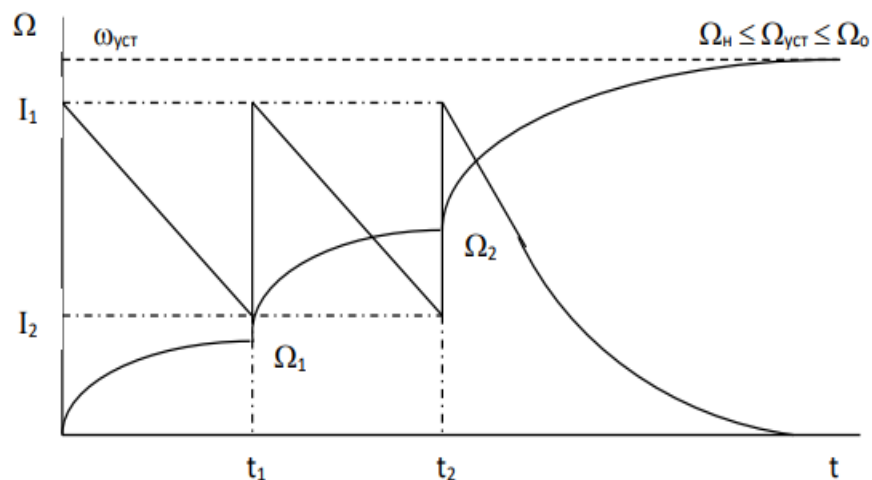


Рисунок 1.13 – Штучні механічні характеристики двигуна при реостатному пуску

Керування у функції часу (рисунк 1.14) реалізується за допомогою реле часу, які забезпечують поетапне виведення пускових резисторів через задані інтервали. Перевагою є незалежність часу пуску від навантаження, однак можливі кидки струму при зміні режимів роботи [17].

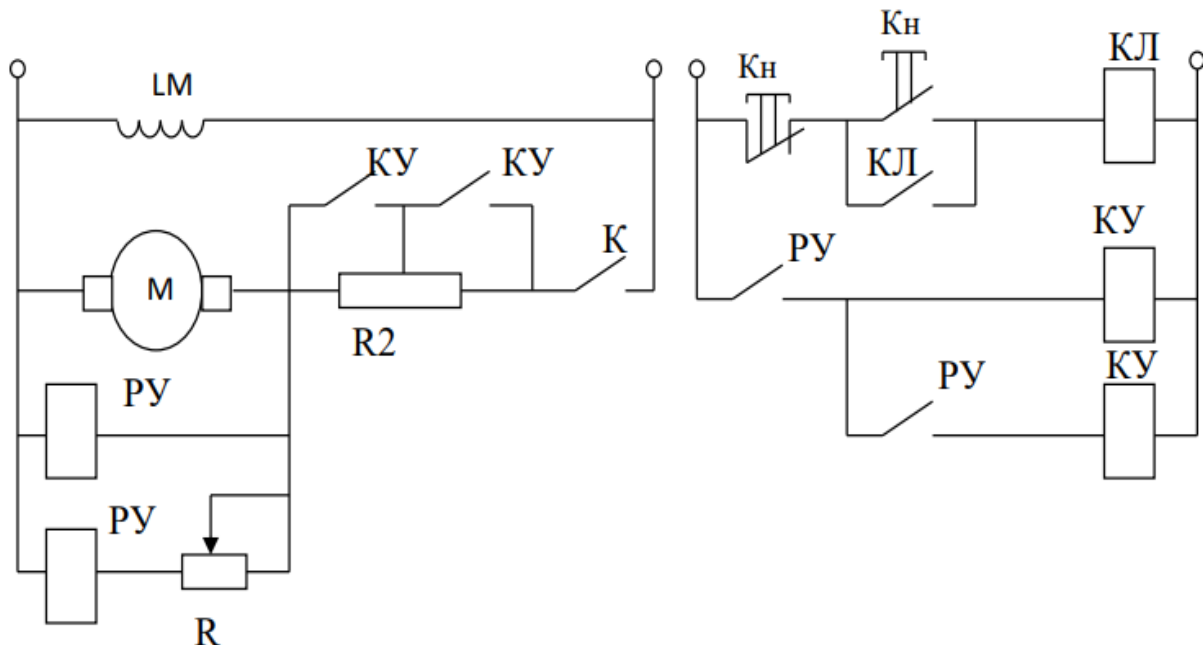


Рисунок 1.14 – Схема керування електроприводом у функції часу

Керування у функції швидкості (рисунк 1.15, 1.16) базується на контролі електрорушійної сили якоря або напруги: [17].

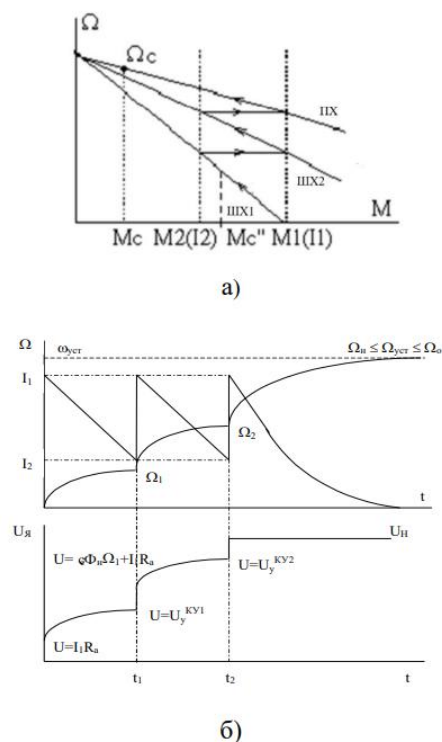




Рисунок 1.15 – Механічні характеристики та діаграми струму

$$\omega = \frac{E}{k\Phi} \quad (1.2)$$

Цей спосіб забезпечує більш точне узгодження режимів роботи електропривода. До його недоліків належать складність налаштування та залежність часу пуску від навантаження [17].

Керування у функції струму (рисунок 1.16) передбачає підтримання струму якоря в заданих межах:

$$I_{min} \leq I_a \leq I_{max} \quad (1.3)$$

Це дозволяє автоматично враховувати зміну навантаження. Перевагою є адаптивність системи, недоліком – необхідність індивідуального налаштування та залежність параметрів від характеристик двигуна [17].

Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M = k\Phi I_a \quad (1.4)$$

У системах електропривода також застосовуються режими гальмування (рисунок 1.16, 1.17), які забезпечують швидке зниження швидкості або зупинку привода [17].

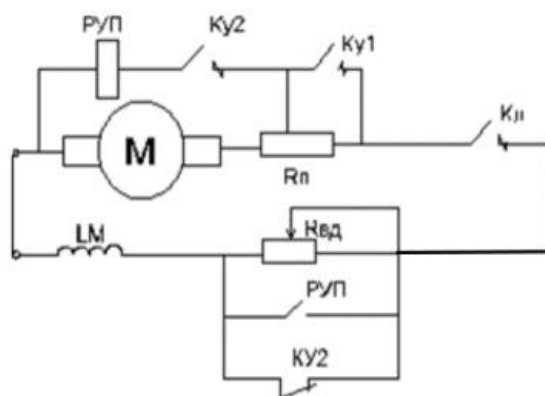


Рисунок 1.16 – Схема динамічного гальмування двигуна постійного струму

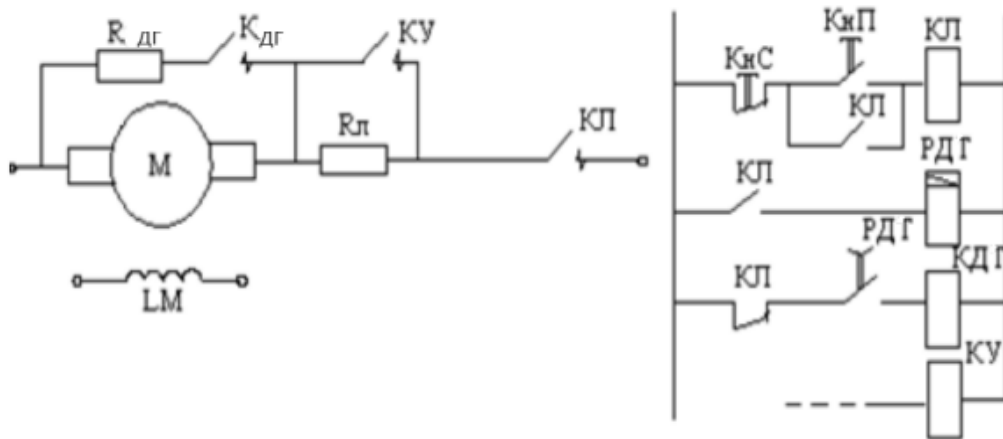


Рисунок 1.17 – Схема гальмування противмиканням асинхронного двигуна

У сучасних конвеєрних установках використовуються частотно-регульовані електроприводи, які працюють за законом $U/f = const$, що забезпечує стабільність магнітного потоку, плавний пуск і зупинку, а також зменшення динамічних навантажень [18].

Перевагами сучасних систем є висока енергоефективність, точність регулювання та надійність роботи. До недоліків належать складність реалізації та висока вартість [17].

Отже, кожен тип системи керування має свої переваги та недоліки. Вони визначають доцільність застосування залежно від умов експлуатації конвеєра та вимог до якості регулювання.

1.5 Проблеми та потреби автоматизації конвеєрного обладнання електроприводами конвеєрів

Експлуатація електроприводів конвеєрів супроводжується рядом типових проблем. Основною з них є змінне навантаження. Воно викликає перевантаження двигуна, нестабільність швидкості та підвищений знос обладнання.

Іншою проблемою є великі пускові струми. Вони створюють додаткове навантаження на електромережу та знижують ресурс електродвигуна. Ступінчастий пуск призводить до ударних механічних навантажень.

Традиційні системи керування не забезпечують точного регулювання швидкості. Це погіршує якість транспортування та може порушувати технологічний процес.



Важливою проблемою є також низька енергоефективність. Значна частина енергії втрачається під час пуску та регулювання. Особливо це характерно для реостатних систем. Недостатній рівень контролю та діагностики ускладнює виявлення несправностей. Це підвищує ризик аварій та простоїв.

Наведені недоліки визначають основні потреби автоматизації. Необхідне плавне регулювання швидкості. Потрібна адаптація до змін навантаження. Важливим є зменшення пускових струмів і динамічних навантажень.

Система керування повинна забезпечувати енергоефективність і надійний захист обладнання. Також необхідні функції моніторингу та діагностики.

Отже, автоматизація електроприводів конвеєрів спрямована на підвищення стабільності роботи, зменшення втрат та покращення експлуатаційних характеристик системи.

Висновок до 1

Проведений аналіз конструкцій конвеєрного обладнання показав різноманітність технічних рішень та їх залежність від умов експлуатації і властивостей вантажу. Найбільш поширеними залишаються стрічкові, гвинтові та ланцюгові конвеєри, які відрізняються принципом дії та сферою застосування.

Дослідження систем електроприводів засвідчило перехід від простих релейно-контакторних схем до сучасних частотно-регульованих приводів. Класичні системи характеризуються надійністю, проте поступаються за точністю регулювання та енергоефективністю.

Аналіз переваг і недоліків виявив обмеження традиційних підходів. Серед них – високі пускові струми, втрати енергії та недостатня гнучкість керування. Сучасні системи забезпечують кращі показники, але потребують складнішої реалізації.

Виявлені проблеми визначають основні напрями вдосконалення. Пріоритетними є підвищення точності регулювання, зменшення динамічних навантажень і впровадження засобів контролю.



2 РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА

2.1 Постановка задачі та технічні вимоги

Мехатроніка – це сфера науки та техніки, яка базується на синергетичному поєднанні механічних, електротехнічних, електронних та комп'ютерних компонентів. Вона забезпечує проектування і виробництво якісно нових пристроїв з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами.

Пристрої, створені за принципами мехатроніки, називають мехатронними системами. Термін «мехатроніка» вперше з'явився в Японії у 1969 році і був запропонований Тецуро Морі, співробітником компанії Yaskawa Electric [19, с. 10].

Метою розробки є створення мехатронної системи керування електроприводом конвеєрного обладнання, яка забезпечує автоматизацію процесів запуску, зупинки та регулювання швидкості конвеєра. Система повинна підвищити ефективність роботи обладнання, зменшити енергоспоживання та підвищити рівень безпеки при експлуатації.

Основні завдання системи:

- 1) автоматичне керування електроприводом конвеєра у режимах старту, розгону, стабілізації швидкості та зупинки.
- 2) контроль навантаження на конвеєр та захист від перевантаження.
- 3) забезпечення дистанційного моніторингу та керування оператором або SCADA-системою.
- 4) реалізація аварійного відключення при критичних станах обладнання.

Технічні вимоги до системи:

- 1) номінальна потужність електродвигуна: 22–45 кВт (залежно від моделі конвеєра).
- 2) діапазон регулювання швидкості конвеєра: 0–3 м/с.
- 3) точність підтримки заданої швидкості: $\pm 2\%$.
- 4) сумісність з існуючими механічними та електричними компонентами конвеєра.
- 5) використання контролера з програмованою логікою (ПЛК), датчиків обертів, навантаження та температури, а також частотного перетворювача для регулювання швидкості двигуна.
- 6) відповідність системи вимогам охорони праці та промислової безпеки (ДСТУ ISO 13849-1:2016).



2.2 Структурна схема системи керування

Система побудована за ієрархічним принципом і забезпечує збирання інформації від датчиків, її обробку контролером, формування керуючих впливів на перетворювач частоти та керування електродвигуном конвеєра (рис. 2.1).

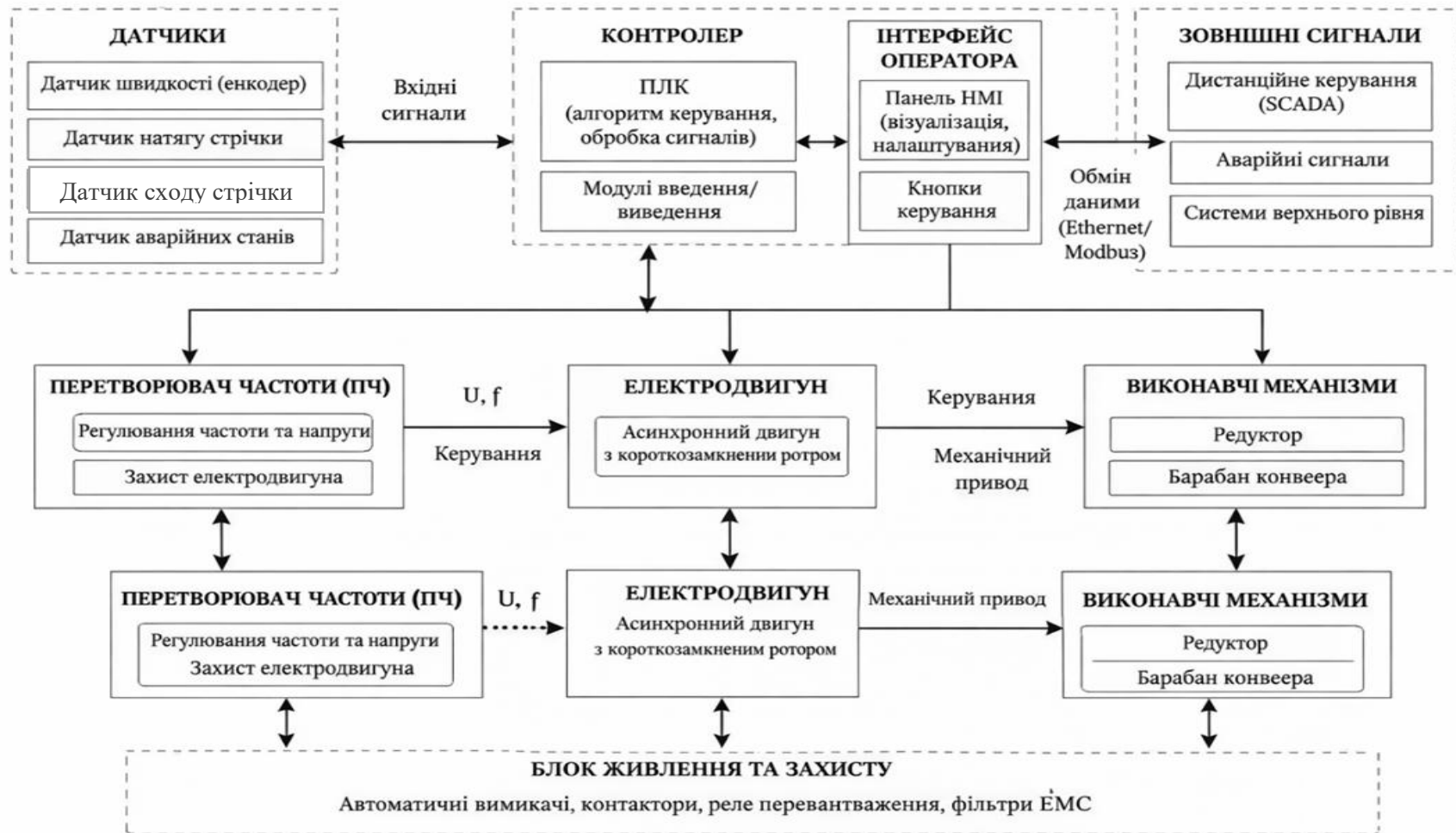


Рисунок 2.1 – Структурна схема мехатронної системи керування електроприводом конвеєра



Основні функціональні зв'язки:

- 1) сигнал від датчика → контролер (збір та обробка даних).
- 2) контролер → перетворювач частоти (формування керуючого сигналу).
- 3) перетворювач частоти → електродвигун (регулювання швидкості та крутного моменту).
- 4) електродвигун → виконавчі механізми (механічний привід конвеєра).
- 5) контролер ↔ інтерфейс оператора (керування та передача даних).
- 6) контролер ↔ зовнішні сигнали (аварійні, дистанційне керування, SCADA).

Запропонована структура системи забезпечує централізоване керування технологічним процесом та дозволяє оперативно реагувати на зміну режимів роботи обладнання. Використання програмованого логічного контролера дає змогу реалізувати алгоритми автоматичного регулювання, моніторингу та діагностики стану системи в режимі реального часу. Наявність зворотних зв'язків від датчиків забезпечує контроль основних технологічних параметрів і підвищує точність керування електроприводом.

Інтеграція інтерфейсу оператора забезпечує зручне налаштування параметрів роботи, візуалізацію поточного стану обладнання та відображення повідомлень про несправності. Передбачена можливість підключення систем диспетчерського контролю та збору даних, що розширює функціональні можливості системи та дозволяє здійснювати віддалений моніторинг роботи конвеєра. Така структура характеризується високою гнучкістю, надійністю та придатністю до подальшої модернізації відповідно до вимог сучасних автоматизованих виробництв.

Таблиця 2.2 – Пояснення до елементів структурної схеми системи керування електроприводом конвеєра

Елемент	Призначення
Датчики	Вимірюють технологічні параметри і передають сигнали на контролер.
Контролер (ПЛК)	Обробляє сигнали, реалізує алгоритми керування і формує вихідні команди.
Інтерфейс оператора (HMI)	Відображає параметри, дозволяє налаштування та ручне керування.
Зовнішні сигнали	Забезпечують обмін даними з системами верхнього рівня та прийом команд дистанційного керування.
Перетворювач частоти (ПЧ)	Регулює частоту та напругу живлення двигуна, забезпечує плавний пуск і захист.
Електродвигун	Приводить у рух конвеєр, перетворюючи електричну енергію на механічну.
Виконавчі механізми	Передають крутний момент від двигуна до конвеєрної стрічки.
Блок живлення та захисту	Стабільне живлення компонентів, захист від перевантажень і коротких замикань.

2.3 Функціональна схема системи

Функціональна схема мехатронної системи керування електроприводом конвеєра відображає логіку обробки сигналів і послідовність дій системи у різних режимах роботи. Вона визначає взаємодію між датчиками, контролером, виконавчими пристроями та оператором.

У процесі роботи система реалізує послідовність функцій: пуск, розгін, стабілізацію швидкості, зупинку та аварійне відключення. Керуючі сигнали формуються на основі аналізу даних, що надходять від вимірювальних пристроїв, та передаються до виконавчих елементів системи.

Функціональну схему системи керування наведено на рисунку 2.2.

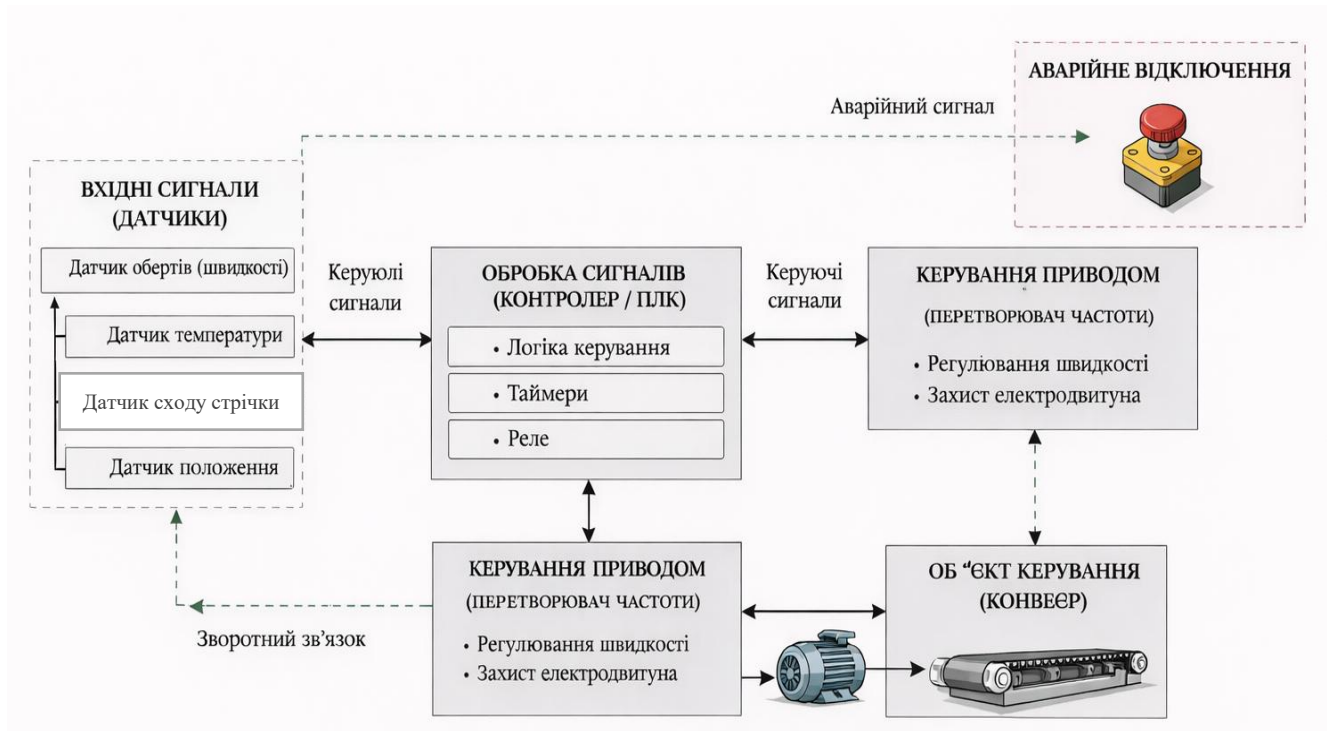


Рисунок 2.2 – Функціональна схема мехатронної системи керування електроприводом конвеєра

Сигнали від датчиків обертів, температури, положення стрічки та навантаження надходять до контролера, де здійснюється їх обробка за допомогою логічних елементів, таймерів і релейних функцій. На основі отриманої інформації формується керуючий сигнал, який передається на перетворювач частоти.

Перетворювач частоти регулює параметри живлення електродвигуна, забезпечуючи плавний пуск, зміну швидкості та стабілізацію режиму роботи. Електродвигун приводить у рух конвеєр, який є об'єктом керування системи.

Зворотний зв'язок реалізується через датчики, що дозволяє контролювати параметри роботи та оперативно коригувати режими функціонування системи. У разі виникнення аварійної ситуації формується сигнал аварійного відключення, який забезпечує негайну зупинку обладнання.

2.4 Вибір та обґрунтування компонентів (контролери, датчики, перетворювачі частоти)

У якості центрального елемента системи керування доцільно використовувати програмований логічний контролер (ПЛК), оскільки він забезпечує стабільну роботу в промислових умовах і має широкі можливості для реалізації алгоритмів керування.



Основні вимоги до контролера:

- наявність достатньої кількості дискретних і аналогових входів/виходів;
- підтримка промислових протоколів зв'язку (Modbus, Profibus, Ethernet);
- висока швидкодія обробки сигналів;
- можливість програмування складних алгоритмів;
- наявність вбудованих засобів діагностики.

Для даної системи доцільно застосувати контролери типу:

- Siemens S7-1200 / S7-1500;
- Schneider Electric Modicon;
- Mitsubishi FX-серії.

Порівняно з мікроконтролерами, ПЛК мають підвищену надійність, простоту інтеграції у промислові системи, зручність обслуговування та підтримку стандартів автоматизації.

Застосування комбінованої системи датчиків дозволяє реалізувати повноцінний контроль стану системи та підвищити її надійність.

Перетворювач частоти (ПЧ) є ключовим елементом системи керування електроприводом, оскільки він забезпечує регулювання швидкості обертання електродвигуна.

Основні критерії вибору ПЧ:

- відповідність номінальній потужності двигуна;
- діапазон регулювання частоти (0–50/60 Гц і більше);
- наявність функції плавного пуску та гальмування;
- вбудовані системи захисту (перевантаження, перегрів, коротке замикання);
- підтримка зв'язку з контролером.

Для даної системи доцільно використовувати:

- ABB ACS580;
- Siemens SINAMICS V20 / G120;
- Schneider Altivar.

Обґрунтування:

Застосування частотного регулювання дозволяє:

- зменшити пускові струми;
- підвищити енергоефективність;
- зменшити механічні навантаження на обладнання;
- забезпечити точне регулювання швидкості.

Схему процесу запуску електродвигуна та впливу пускового струму наведено на рисунку 2.3.

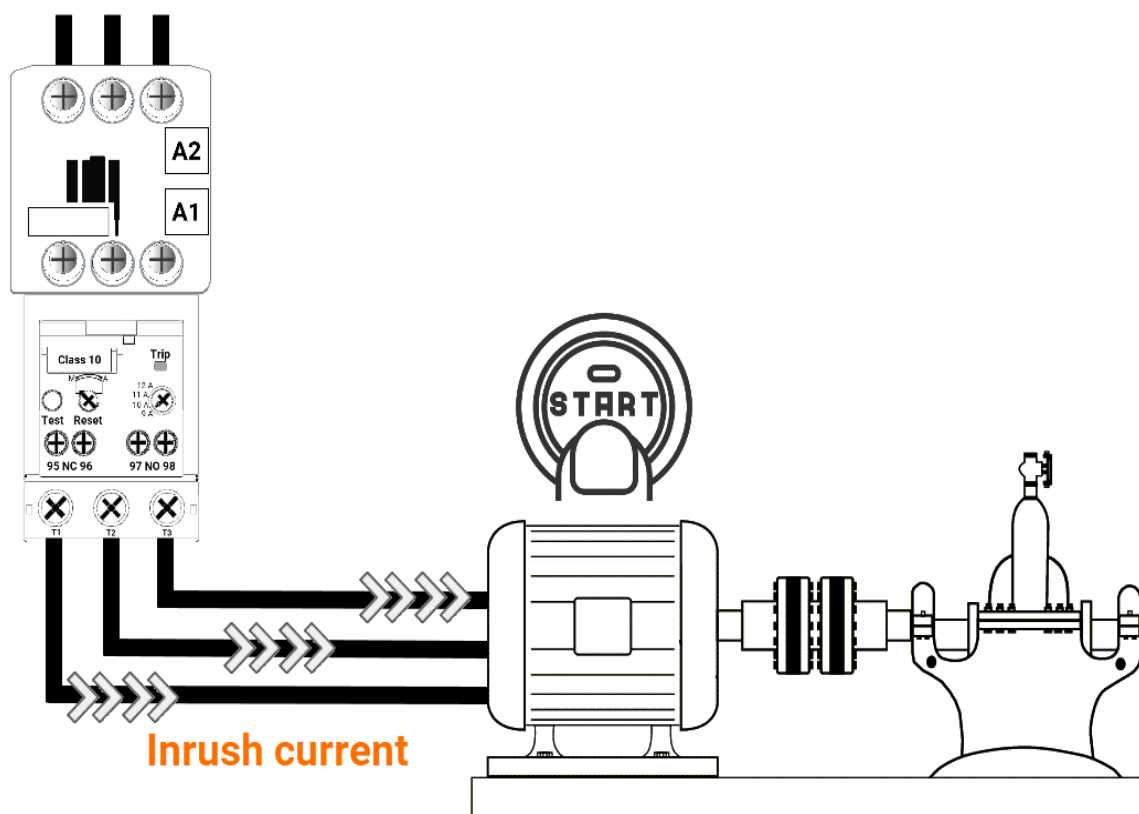


Рисунок 2.3 – Схема пуску електродвигуна та впливу пускового струму

Таблиця 2.3 – Порівняння варіантів компонентів системи

Компонент	Варіант	Переваги	Недоліки
Контролер	ПЛК	Надійність, гнучкість	Вартість
Контролер	Мікроконтролер	Дешевизна	Обмежений функціонал
Датчики	Аналогові	Висока точність	Чутливість до завад
Датчики	Цифрові	Стійкість	Складність інтеграції
ПЧ	Промисловий	Захист, стабільність	Вища ціна
ПЧ	Бюджетний	Дешевий	Менше функцій

Інтеграція всіх компонентів здійснюється через контролер, який виконує роль центрального керуючого елемента. Датчики передають сигнали на вхідні модулі ПЛК, де вони обробляються відповідно до заданого алгоритму. Після цього формується керуючий сигнал, який передається на перетворювач частоти.



Перетворювач частоти змінює параметри живлення електродвигуна, що дозволяє регулювати швидкість руху конвеєра. Зворотний зв'язок забезпечує адаптацію системи до змін навантаження та умов роботи.

Можна зазначити, що обрані компоненти забезпечують ефективну, надійну та безпечну роботу мехатронної системи керування електроприводом конвеєра, що відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

2.5 Алгоритми керування електроприводом

Послідовність дій мехатронної системи при зміні режимів роботи конвеєрного обладнання. Його реалізація здійснюється програмованим логічним контролером, який обробляє сигнали від датчиків і формує керуючі впливи на перетворювач частоти.

У системі передбачено такі основні режими роботи: запуск, розгін, стабілізація швидкості, зупинка, реверс та аварійне відключення. Перехід між режимами здійснюється автоматично або за командою оператора.

Алгоритм функціонування системи включає такі етапи:

- отримання команди запуску від оператора або системи верхнього рівня;
- перевірка стану системи (наявність аварій, стан датчиків, готовність приводу);
- формування сигналу на запуск перетворювача частоти;
- плавний розгін електродвигуна до заданої швидкості;
- підтримка швидкості за допомогою зворотного зв'язку;
- постійний контроль температури, навантаження та положення стрічки;
- виконання команд зупинки або реверсу;
- аварійне відключення у разі виникнення небезпечних умов.

Керування швидкістю здійснюється за принципом замкненого контуру, де фактичне значення швидкості порівнюється із заданим, а відхилення використовується для коригування сигналу керування.

Помилка регулювання швидкості:

$$e(t) = \omega_{\text{зад}}(t) - \omega_{\text{факт}}(t) \quad (2.5)$$

Закон регулювання (ПІ-регулятор):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.6)$$

Це дозволяє забезпечити стабільність та точність підтримки швидкості.

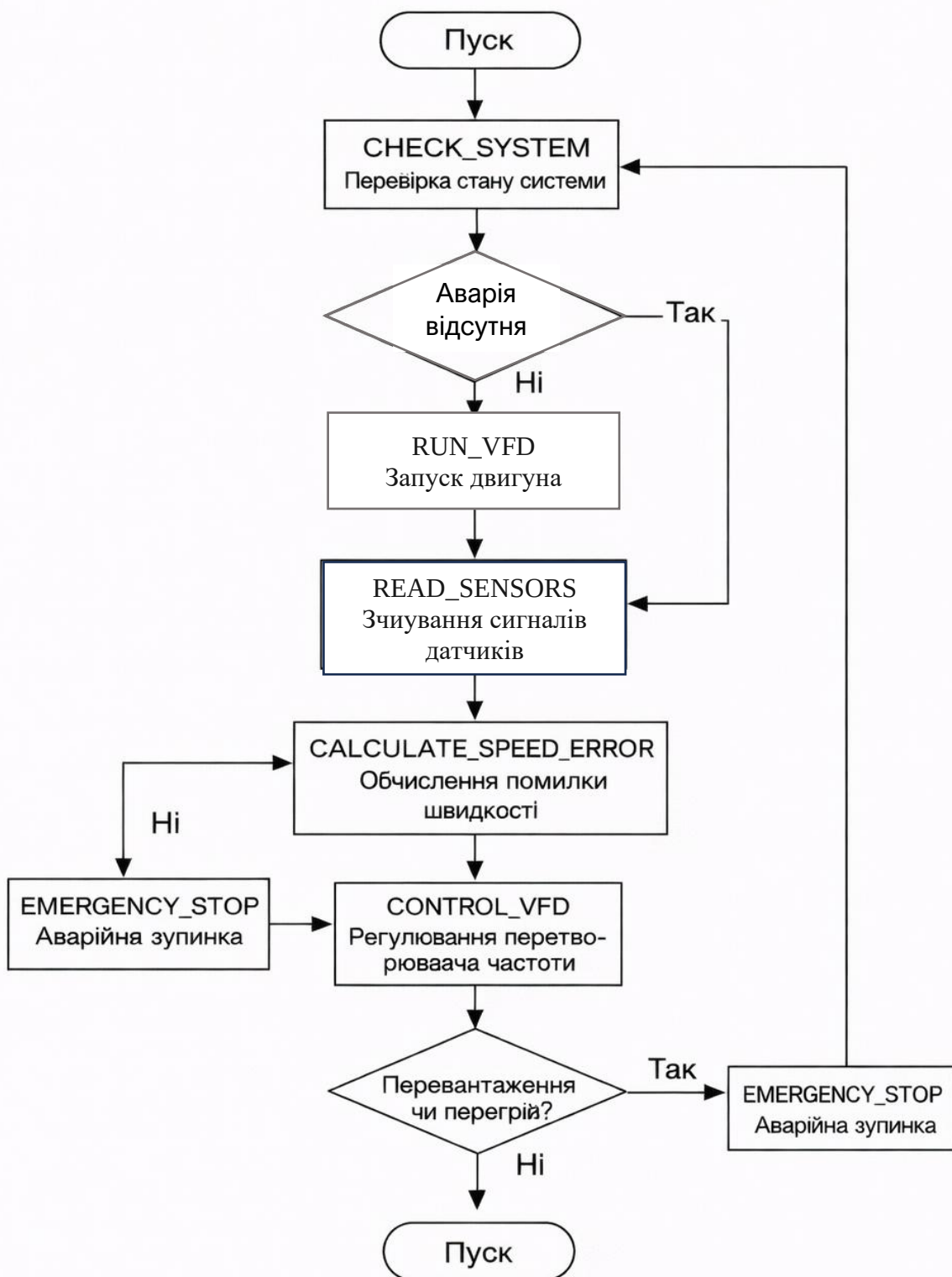


Рисунок 2.4 – Алгоритм керування електроприводом конвеєра



Застосування замкненого контуру керування із використанням ПІ-регулятора забезпечує високу точність підтримки швидкості електропривода, зменшення динамічних навантажень та підвищення енергоефективності системи.

Наявність алгоритму аварійного відключення дозволяє своєчасно виявляти небезпечні режими роботи. Такі як перевантаження або перегрів, та забезпечує автоматичну зупинку обладнання, що підвищує рівень безпеки експлуатації.

2.6 Заходи безпеки та аварійного відключення

Безпечна експлуатація конвеєрного обладнання є одним із ключових аспектів функціонування мехатронної системи керування електроприводом.

Особливо це важливо в умовах гірничо-металургійного виробництва, де обладнання працює в складних і потенційно небезпечних умовах.

Потенційні небезпеки

У процесі експлуатації конвеєрного обладнання можуть виникати такі небезпечні ситуації:

- перевантаження електродвигуна;
- коротке замикання в електричних колах;
- перегрів обмоток двигуна або підшипників;
- обрив або перекіс конвеєрної стрічки;
- заклинювання механізмів;
- падіння або зміщення вантажу;
- травмування обслуговуючого персоналу рухомими частинами.

Врахування зазначених факторів є необхідним для забезпечення безпечної роботи системи.

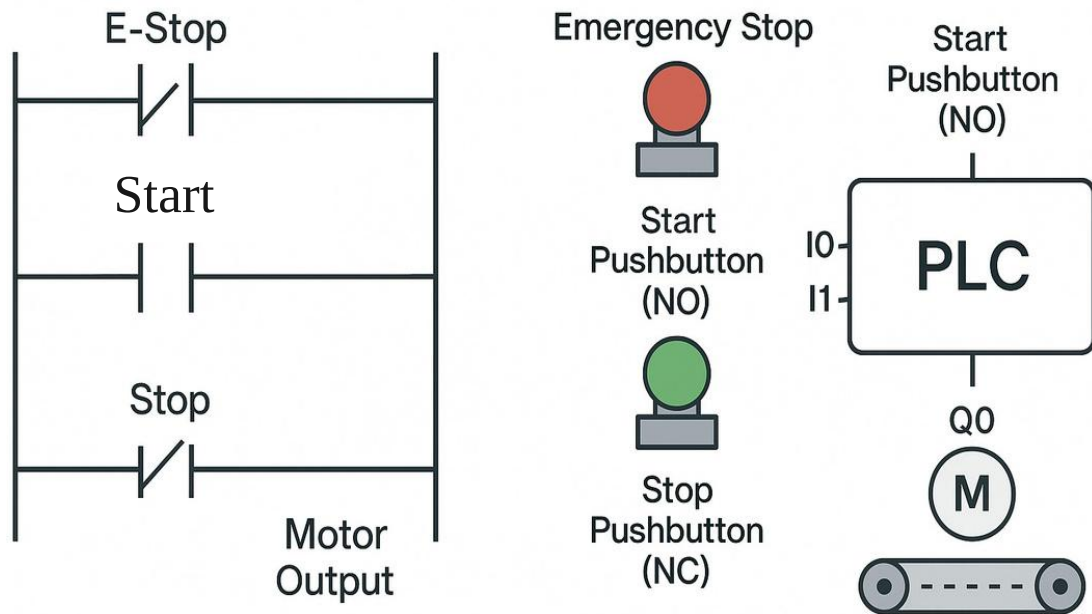


Рисунок 2.5 – Схема контролю небезпечних станів електропривода конвеєра

Система аварійного відключення

Для запобігання аварійним ситуаціям у системі передбачено комплекс засобів захисту:

- кнопки аварійного зупинення («Стоп»), розміщені вздовж конвеєра;
- реле захисту (струмові, теплові), що відключають живлення при перевантаженні або перегріві;
- датчики контролю стану (температури, навантаження, положення стрічки);
- автоматичні вимикачі, що спрацьовують при короткому замиканні;
- частотний перетворювач, який має вбудовані функції захисту.

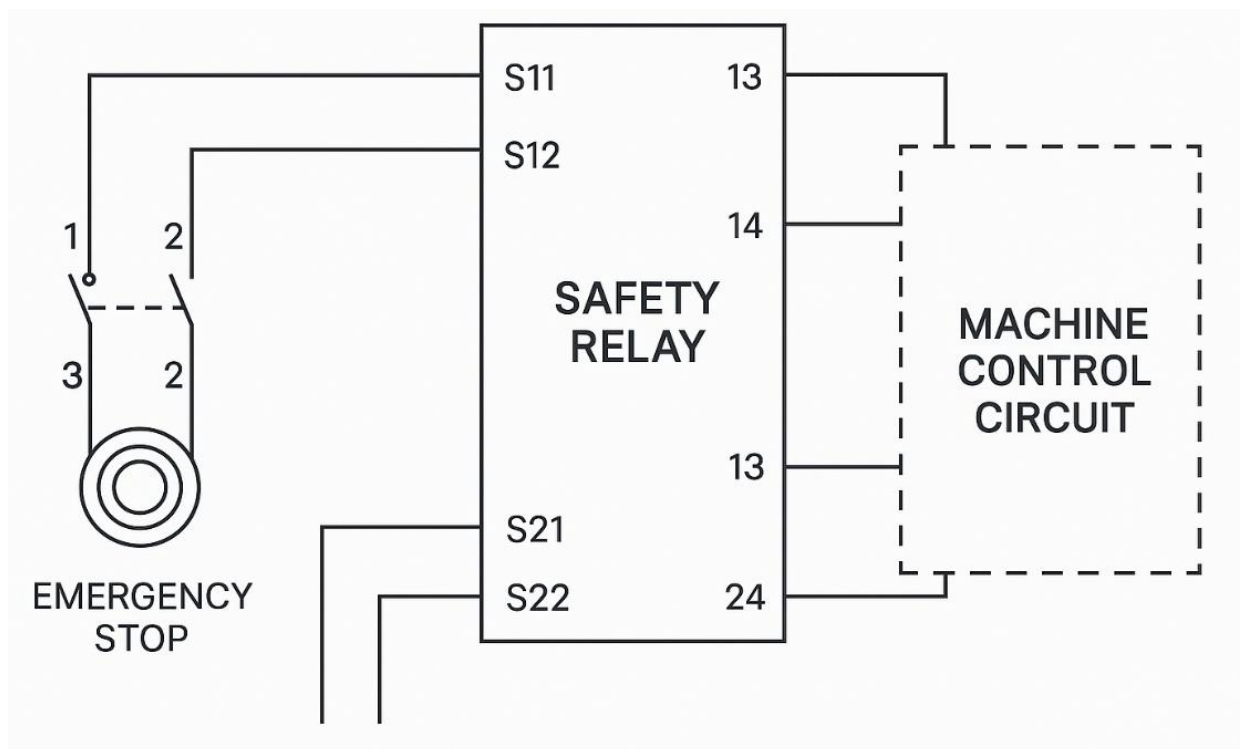


Рисунок 2.6 – Схема системи аварійного відключення електропривода конвеєра

У розробленій системі керування передбачено комплекс заходів безпеки, спрямованих на забезпечення надійної та безпечної експлуатації обладнання. Для інформування персоналу про поточний стан системи використовується світлова та звукова сигналізація, а основні параметри роботи відображаються на HMI-панелі оператора. З метою запобігання аварійним ситуаціям реалізовано обмеження максимальної швидкості руху конвеєра, а також постійний контроль справності датчиків і виконавчих пристроїв. Крім того, система здійснює блокування запуску обладнання за наявності аварійних сигналів. Аварійне відключення виконується автоматично у разі перевищення допустимих технологічних параметрів або може бути ініційоване оператором у ручному режимі. реалізація алгоритмів плавного пуску та зупинки.

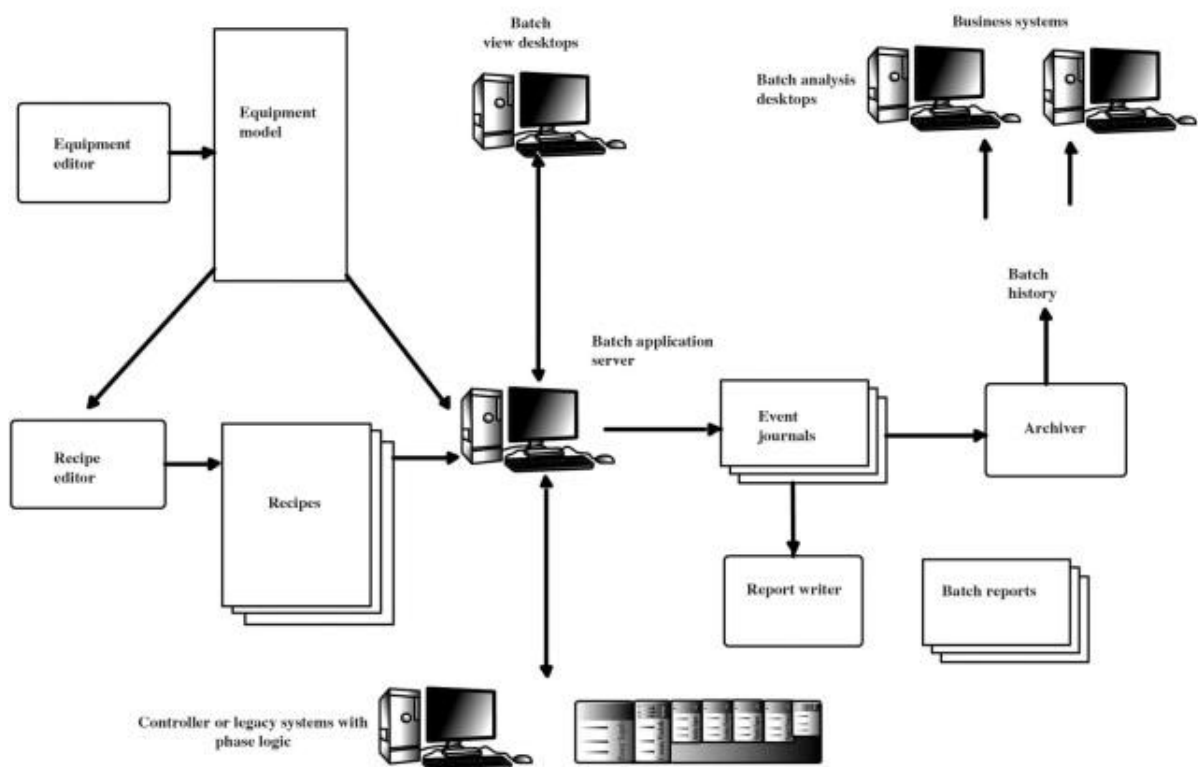


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи безпеки конвеєра

Регламент дій при аварійній ситуації

У разі виникнення аварійної ситуації передбачено такий порядок дій:

- 1) автоматичне або ручне аварійне відключення системи.
- 2) передача сигналу оператору (світлова/звукова індикація).
- 3) визначення причини аварії за показами датчиків і системи діагностики.
- 4) усунення несправності.
- 5) перевірка працездатності системи.
- 6) повторний запуск обладнання після дозволу відповідальної особи.

Розроблена система керування відповідає вимогам нормативних документів з охорони праці та промислової безпеки, зокрема:

- ДСТУ ISO 13849-1:2016 – безпека машин та систем керування;
- вимогам електробезпеки та захисту персоналу від ураження електричним струмом;
- правилам експлуатації електроустановок споживачів.

Застосування сучасних засобів автоматизації та захисту дозволяє забезпечити високий рівень безпеки, мінімізувати ризики аварій та підвищити надійність роботи конвеєрного обладнання.



Висновок до 2

У другому розділі роботи було розроблено мехатронну систему керування електроприводом конвеєрного обладнання з урахуванням вимог сучасного гірничо-металургійного виробництва.

Визначено мету та основні завдання системи, сформовано технічні вимоги до її функціонування, що забезпечують ефективну автоматизацію процесів транспортування матеріалів. Розроблено структурну та функціональну схеми системи керування, які відображають взаємодію її основних елементів і логіку обробки сигналів.

Обґрунтовано вибір основних компонентів системи, зокрема програмованого логічного контролера, датчиків контролю технологічних параметрів та перетворювача частоти, що дозволяє забезпечити точне регулювання швидкості електропривода, зменшення енергоспоживання та підвищення надійності роботи обладнання.

Окрему увагу приділено питанням безпеки експлуатації, де визначено потенційні небезпеки, розроблено систему аварійного відключення, заходи захисту та регламент дій при аварійних ситуаціях. Запропоновані рішення відповідають вимогам нормативних документів з охорони праці та промислової безпеки.

Таким чином, розроблена мехатронна система керування електроприводом конвеєра забезпечує ефективну, надійну та безпечну роботу обладнання і може бути використана в умовах сучасного промислового виробництва.



3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Методика моделювання електроприводу конвеєра

У розроблюваній системі керування електроприводом стрічкового конвеєра застосовується двоконтурна система регулювання, що забезпечує підвищену точність та стабільність роботи привода. Така структура передбачає використання двох регуляторів, які працюють у взаємозв'язку через систему зворотних зв'язків.

Внутрішній контур системи призначений для регулювання струму електродвигуна та виконує функцію швидкого реагування на зміну навантаження. Зовнішній контур забезпечує регулювання кутової швидкості обертання двигуна і визначає основний режим роботи електропривода.

На вхід зовнішнього контуру подається задавальний сигнал, який визначає необхідну швидкість руху конвеєрної стрічки. Зміна цього сигналу дозволяє регулювати продуктивність конвеєра залежно від умов роботи та технологічних вимог.

Для забезпечення стабільності функціонування системи та уникнення перевантажень передбачено обмеження сигналів керування на виходах регуляторів. Це досягається шляхом використання спеціальних обмежувальних ланок, які запобігають перевищенню допустимих значень струму та напруги.

У рамках моделювання реалізується функціональна схема системи керування, яка включає контур регулювання швидкості, контур регулювання струму, блок формування задавального сигналу, обмежувальні елементи та модель електродвигуна.

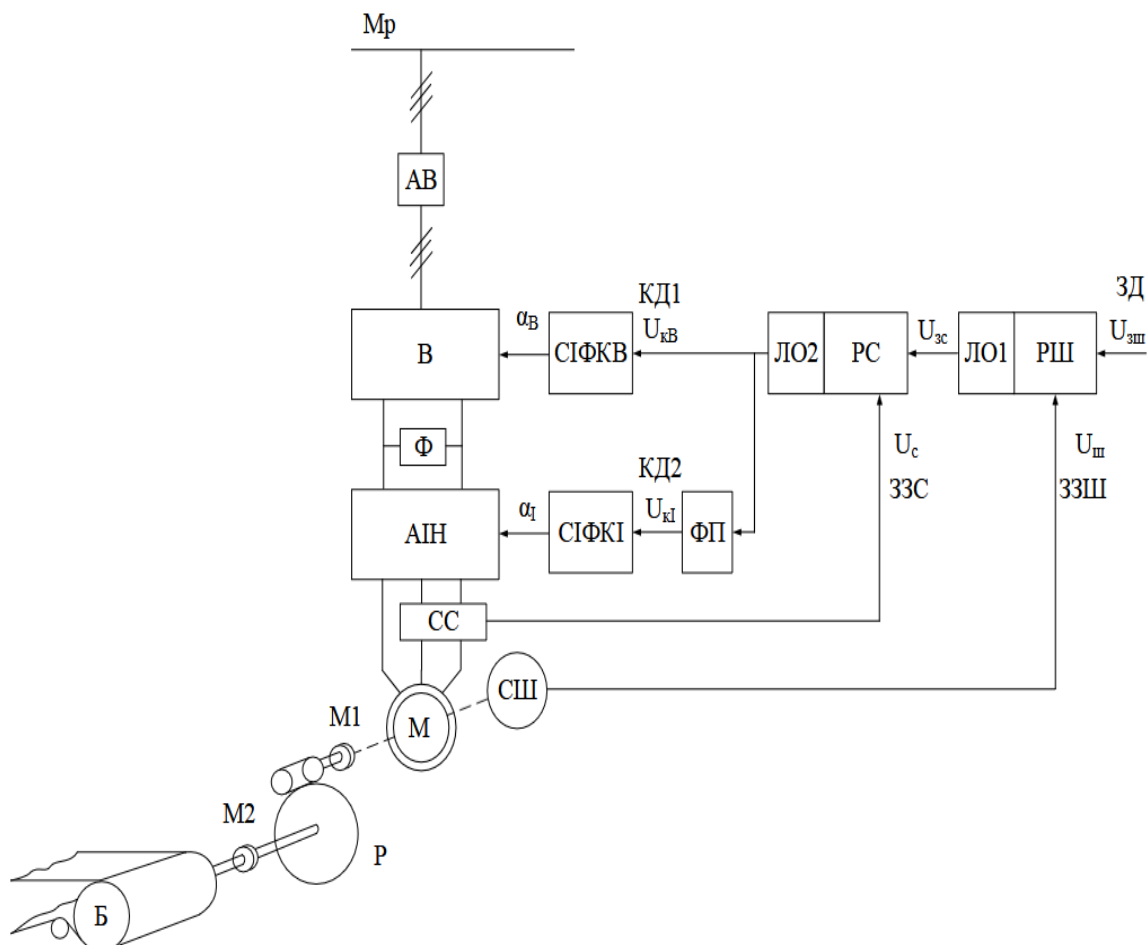


Рисунок 3.1 – Функціональна схема моделі системи керування електроприводом стрічкового конвеєра

РШ – регулятор швидкості; ЛО1 – ланка обмеження сигналу регулятора швидкості; РС – регулятор струму статора двигуна; ЛО2 – ланка обмеження сигналу регулятора струму; СІФК – система керування силовим перетворювачем; ФП – функціональний перетворювач сигналів; $U_{ш}$ – сигнал завдання швидкості; $U_{ш}$ – сигнал зворотного зв'язку за швидкістю; $U_{с}$ – сигнал завдання струму; $U_{с}$ – сигнал зворотного зв'язку за струмом; $U_{к}$ – керуючий сигнал перетворювача; α – керуючий параметр силового перетворювача; М – електродвигун; Р – редуктор; Б – приводний барабан конвеєра.

3.2 Математичне моделювання системи

Математична модель електропривода стрічкового конвеєра базується на описі електро механічних процесів, що відбуваються в асинхронному двигуні та механічній частині привода. Модель враховує



взаємодію електричної та механічної підсистем і використовується для подальшого комп'ютерного моделювання.

Для розрахунків приймаємо параметри електродвигуна:

$P=30$ кВт,

$U=380$ В,

$n=1500$ об/хв,

$\eta=0,9$.

1. Визначення кутової швидкості двигуна

Кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.7)$$

де n – частота обертання, об/хв

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} \\ \omega &= \frac{9420}{60} = 157 \text{ рад/с} \end{aligned} \quad (3.8)$$

2. Розрахунок електромагнітного моменту двигуна

Момент визначається через потужність:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.9)$$

де P – потужність двигуна, Вт

$$M = \frac{30000}{157} \quad (3.10)$$

$$M \approx 191 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3. Основне рівняння руху електропривода

Рух електропривода описується диференціальним рівнянням:



$$L \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{дв}} - M_{\text{н}} \quad (3.11)$$

де J – момент інерції системи; $M_{\text{дв}}$ – момент двигуна; $M_{\text{н}}$ – момент навантаження

Приймаємо:

$$J = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.12)$$

Тоді:

$$2 \frac{d\omega}{dt} = 191 - M_{\text{н}} \quad (3.13)$$

4. Розрахунок номінального струму
Для трифазного двигуна:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta} \quad (3.14)$$

де $\sqrt{3} = 1,73$.

$$I = \frac{30000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,9} \quad (3.15)$$

$$I = \frac{30000}{591,66} \approx 50,7 \text{ А}$$

5. Модель електромагнітного моменту через струм
У спрощеному вигляді:

$$M_{\text{дв}} = k \cdot I \quad (3.16)$$

де k – коефіцієнт пропорційності
Звідси:



$$k = \frac{M}{I} = \frac{191}{50,7} \approx 3,77 \quad (3.17)$$

Отже:

$$M_{\text{дв}} = 3,77 \cdot I \quad (3.18)$$

6. Рівняння електричного кола
Електрична частина двигуна описується:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = U \quad (3.19)$$

Приймаємо:

$L=0,5\text{Гн}$

$R=1\text{ Ом}$

$$0,5 \frac{dI}{dt} + I = U \quad (3.20)$$

7. Помилка регулювання швидкості

$$e(t) = \omega_{\text{зад}} - \omega(t) \quad (3.21)$$

Наприклад:

$$e = 160 - 157 = 3\text{рад/с} \quad (3.22)$$

8. Закон регулювання (ПІ-регулятор)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3.23)$$

Приймаємо:

$K_p = 2, K_i = 5.$

$$u(t) = 2 \cdot 3 + 5 \cdot \int 3 dt \quad (3.24)$$

$$u(t) = 6 + 15t$$

9. Передавальні функції системи
Механічна частина:



$$W(s) = \frac{1}{J_s} = \frac{1}{2_s} \quad (3.25)$$

Електрична частина:

$$W(s) = \frac{1}{L_s + R} = \frac{1}{0,5_s + 1} \quad (3.26)$$

10. Узагальнена модель системи

Система включає:

- контур швидкості
- контур струму
- двигун
- механічне навантаження

Модель є замкненою системою з негативним зворотним зв'язком.

Отримана математична модель дозволяє описати динаміку електропривода стрічкового конвеєра та визначити основні параметри його роботи. Використання двоконтурної системи керування та ПІ-регулятора забезпечує стабільність, точність і швидкодію системи при змінних режимах навантаження.

3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи

Комп'ютерне моделювання мехатронної системи керування електроприводом стрічкового конвеєра виконано з метою перевірки працездатності розробленої математичної моделі, оцінки динамічних характеристик та аналізу процесів регулювання швидкості.

Моделювання здійснювалося у програмному середовищі MATLAB/Simulink, яке є одним із найбільш поширених інструментів для дослідження електромеханічних систем. Дане середовище дозволяє створювати структурні схеми, моделювати роботу електроприводів та аналізувати результати у вигляді графіків.

У процесі моделювання було реалізовано структурну модель системи керування електроприводом, яка включає такі основні блоки:

- блок задання швидкості (задатчик);
- суматор для визначення похибки регулювання;
- ПІ-регулятор швидкості;
- модель частотного перетворювача;
- модель асинхронного електродвигуна;
- блок зворотного зв'язку за швидкістю.

Принцип роботи моделі полягає у порівнянні заданої швидкості з фактичною. Отримана різниця (похибка) обробляється ПІ-регулятором, який формує керуючий сигнал для частотного перетворювача. Перетворювач змінює параметри живлення двигуна, що забезпечує регулювання його швидкості.

У моделі враховано замкнений контур керування із зворотним зв'язком, що дозволяє:

- підтримувати стабільну швидкість руху конвеєра;
- компенсувати зміну навантаження;
- забезпечити плавний пуск і зупинку електропривода.

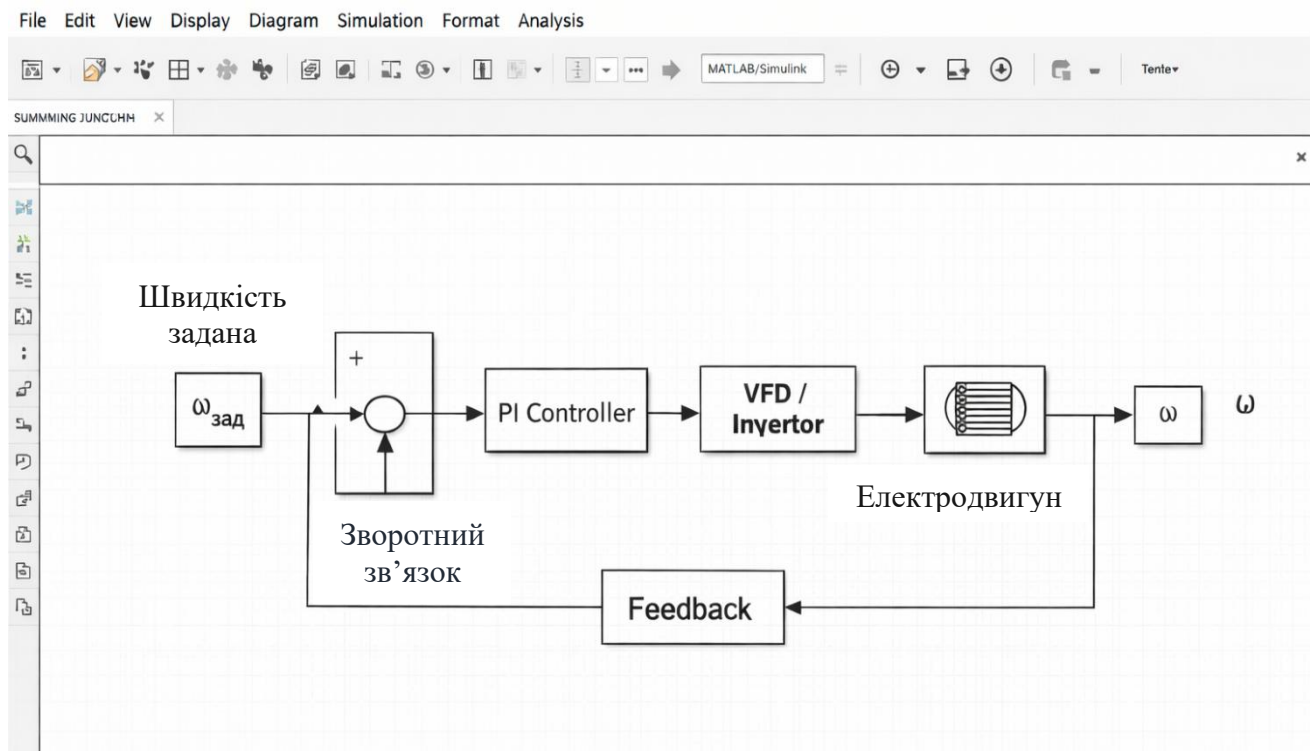


Рисунок 3.2 – Модель системи керування електроприводом конвеєра в середовищі MATLAB/Simulink

Під час моделювання було досліджено режим пуску електропривода, вихід на задану швидкість та роботу системи при змінному навантаженні. Крім того, виконано аналіз перехідних процесів, оцінено стійкість системи керування та перевірено її реакцію на зміну технологічних параметрів. Отримані результати підтвердили коректність роботи алгоритму керування, забезпечення необхідної швидкодії системи та стабільне підтримання заданих режимів роботи електропривода в різних умовах експлуатації.

3.4 Результати експериментальних досліджень системи керування електроприводом конвеєра

У результаті комп'ютерного моделювання було отримано графічні залежності зміни основних параметрів електропривода, а саме: швидкості обертання, струму та електромагнітного моменту двигуна.

Результати моделювання швидкості

На рисунку 3.3 зображено графік зміни швидкості електропривода у процесі пуску.

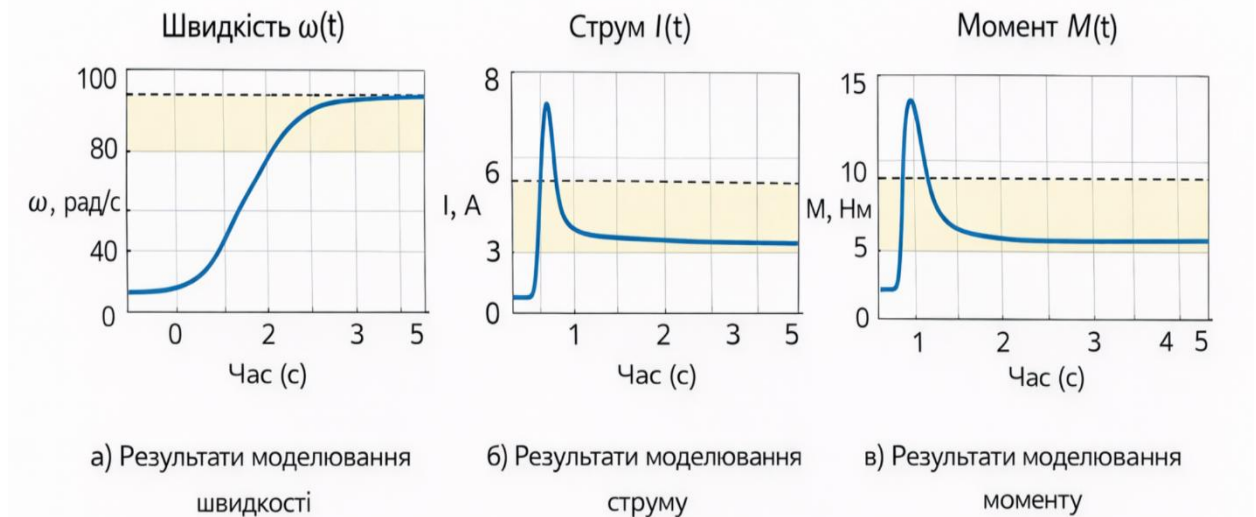


Рисунок 3.3 – Результати комп'ютерного моделювання параметрів електропривода конвеєра

Аналіз графіка показує, що швидкість електродвигуна зростає плавно від початкового значення до заданого рівня без різких коливань. Час виходу на усталений режим становить приблизно 2–3 с, що відповідає вимогам до роботи конвеєрних систем.

Перерегулювання швидкості є незначним і не перевищує 5%, що свідчить про ефективне налаштування ПІ-регулятора та стабільність роботи системи.

Результати моделювання струму

У момент пуску спостерігається короткочасний пік струму, який виникає внаслідок розгону двигуна. Максимальне значення струму не перевищує допустимих меж, що підтверджує ефективність використання частотного перетворювача.

Після завершення перехідного процесу струм стабілізується та відповідає робочому навантаженню системи.

Результати моделювання моменту

У процесі пуску момент різко зростає, забезпечуючи розгін електропривода, після чого поступово зменшується та встановлюється на рівні, що відповідає навантаженню конвеєра.



Система демонструє швидку реакцію на зміну режимів роботи без значних коливань, що свідчить про ефективність замкненого контуру керування.

Загальна оцінка результатів

Отримані результати підтверджують, що розроблена система керування електроприводом конвеєра:

- забезпечує плавний пуск електродвигуна;
- гарантує стабільне підтримання заданої швидкості;
- обмежує пускові струми до допустимих значень;
- забезпечує адаптацію до зміни навантаження;
- характеризується високою стійкістю та точністю регулювання.

3.5 Аналіз результатів та оптимізація системи

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що розроблена система керування електроприводом конвеєра відповідає сучасним вимогам до промислових мехатронних систем.

Аналіз роботи системи

У результаті дослідження встановлено (рис. 3.4):

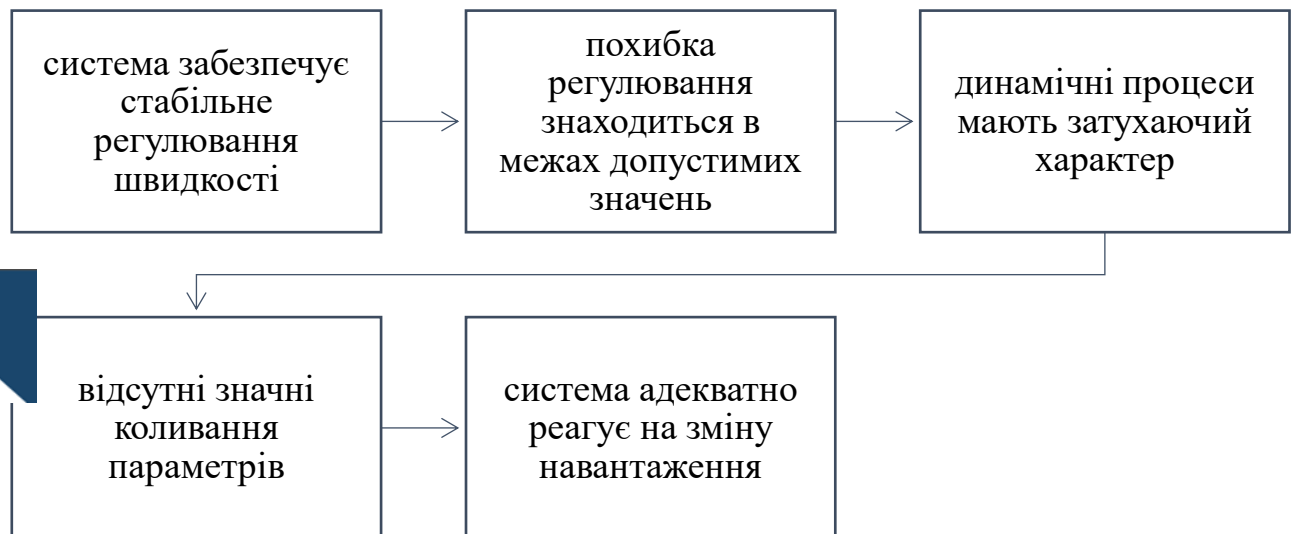


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси системи керування електроприводом стрічкового конвеєра

Застосування ПІ-регулятора дозволило досягти оптимального співвідношення між швидкодією та стійкістю системи.

Оптимізація параметрів системи



Для покращення характеристик системи було виконано налаштування параметрів ПІ-регулятора:

- коефіцієнт пропорційності K_p впливає на швидкість реакції системи;
- інтегральна складова K_i забезпечує усунення статичної похибки.

У результаті оптимізації:

- зменшено перерегулювання;
- скорочено час перехідного процесу;
- підвищено точність підтримки швидкості.

Для підвищення ефективності системи можливе:

- застосування адаптивних або нечітких регуляторів;
- використання векторного керування двигуном;
- впровадження системи діагностики та прогнозування несправностей;
- інтеграція з SCADA-системами.

Висновок до 3

У третьому розділі було виконано моделювання та дослідження системи керування електроприводом стрічкового конвеєра.

У процесі роботи розроблено математичну модель електропривода, яка враховує електричні та механічні процеси в системі. На основі вихідних даних двигуна визначено основні параметри, зокрема кутову швидкість, електромагнітний момент, струм та передавальні функції елементів системи.

Реалізовано комп'ютерну модель у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило дослідити роботу системи керування в різних режимах. Побудована модель включає контур регулювання швидкості, ПІ-регулятор, частотний перетворювач та асинхронний електродвигун із зворотним зв'язком.

У результаті моделювання отримано графіки зміни швидкості, струму та моменту двигуна. Аналіз результатів показав, що система забезпечує плавний пуск електропривода, швидкий вихід на заданий режим роботи, обмеження пускових струмів та стабільну роботу при змінному навантаженні.

Встановлено, що використання ПІ-регулятора дозволяє забезпечити необхідну точність і стійкість системи керування. Проведена оптимізація параметрів регулятора сприяла зменшенню перерегулювання та скороченню часу перехідних процесів.



4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА

4.1 Оцінка ефективності технічних рішень

У даній роботі запропоновано впровадження мехатронної системи керування електроприводом стрічкового конвеєра, що базується на використанні частотного перетворювача та ПІ-регулятора.

Основною метою впровадження є підвищення ефективності роботи конвеєрного обладнання, зменшення енергоспоживання та покращення якості регулювання швидкості.

До основних технічних переваг розробленої системи належать:

- забезпечення плавного пуску електродвигуна без ударних навантажень;
- зменшення пускових струмів у 2–3 рази;
- підвищення точності підтримання заданої швидкості;
- стабільна робота при змінному навантаженні;
- зниження зносу механічних елементів (редуктора, стрічки, роликів);
- можливість автоматизації процесу транспортування.

Застосування частотного керування дозволяє оптимізувати режим роботи електропривода відповідно до технологічних потреб, що значно підвищує загальну ефективність системи.

У порівнянні з традиційними схемами керування (прямий пуск), запропонована система має кращі динамічні характеристики та забезпечує більш економну роботу обладнання.

4.2 Розрахунок економічної доцільності впровадження

Для оцінки економічної ефективності впровадження мехатронної системи керування електроприводом конвеєра виконаємо розрахунок енергоспоживання та економії електроенергії.

1. Вихідні дані:

Номінальна потужність двигуна:

$$P = 30 \text{ кВт} \quad (4.27)$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = 0,9 \quad (4.28)$$

Час роботи конвеєра:



$$t = 4000 \text{ год/рік} \quad (4.29)$$

Вартість електроенергії:

$$C = 4 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

2. Річне енергоспоживання без регулювання

При роботі без частотного перетворювача двигун працює на повній потужності:

$$W_1 = P \cdot t \quad (4.30)$$

$$W_2 = 30 \cdot 4000 = 120000 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

3. Річне енергоспоживання з частотним керуванням

З урахуванням регулювання швидкості економія становить приблизно 20–30%. Прийmemo 25%.

$$W_1 = W_2 \cdot (1 - 0,25) \quad (4.31)$$

$$W_2 = 120000 \cdot 0,75 = 90000 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

4. Річна економія електроенергії

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (4.32)$$

$$\Delta W = 120000 - 90000 = 30000 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

5. Річна економія коштів

$$E = \Delta W \cdot C \quad (4.33)$$


$$E = 30000 \cdot 4 = 120000 \text{ грн/рік}$$

6. Витрати на впровадження

Орієнтовна вартість обладнання:

- частотний перетворювач: 60 000 грн
- система керування та монтаж: 20 000 грн.

$$K = 80000 \text{ грн}$$

Отримана річна економія становить:

$$E = 120000 \text{ грн/рік} \quad (4.34)$$

Що перевищує витрати на впровадження.

4.3 Аналіз енергоспоживання та продуктивності

1. Аналіз енергоспоживання

У традиційних системах керування електродвигун працює на номінальній швидкості незалежно від фактичного навантаження, що призводить до перевитрати електроенергії.

У запропонованій системі реалізовано регулювання швидкості, що дозволяє:

- зменшити споживання електроенергії при неповному завантаженні;
- уникнути пікових навантажень у момент пуску;
- забезпечити роботу двигуна в оптимальному режимі.

З урахуванням проведених розрахунків (п. 4.2), річне енергоспоживання зменшується на:

$$\Delta W = 30000 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.35)$$

2. Аналіз продуктивності

Продуктивність стрічкового конвеєра визначається швидкістю руху стрічки та кількістю транспортованого матеріалу.

Застосування мехатронної системи керування забезпечує:

- плавне регулювання швидкості руху стрічки;
- можливість адаптації продуктивності до технологічних потреб;
- стабільність роботи при змінному навантаженні;



– зменшення простоїв обладнання.

Регулювання швидкості дозволяє підтримувати оптимальний режим транспортування матеріалу, що підвищує ефективність виробничого процесу.

3. Вплив системи керування на роботу електропривода

У результаті впровадження системи:

- зменшуються механічні навантаження на вузли конвеєра;
- знижується знос обладнання;
- підвищується надійність роботи електропривода;
- покращуються динамічні характеристики системи.

Особливо важливим є зменшення пускових струмів, що позитивно впливає на електричну мережу підприємства.

4. Загальна оцінка

Проведений аналіз показав, що використання частотного керування дозволяє одночасно:

- знизити енергоспоживання;
- підвищити продуктивність конвеєра;
- покращити якість регулювання;
- забезпечити стабільну та безпечну роботу системи.



Таким чином, впровадження мехатронної системи керування є технічно доцільним і ефективним рішенням для модернізації конвеєрного обладнання.

4.4 Прогнозований економічний та технічний ефект

Впровадження мехатронної системи керування електроприводом стрічкового конвеєра дозволяє досягти як економічного, так і технічного ефекту.

1. Економічний ефект

На основі проведених розрахунків (п. 4.2) встановлено, що річна економія електроенергії становить:

$$\Delta W = 30000 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.36)$$

Річна економія коштів:

$$E = 120000 \text{ грн/рік} \quad (4.37)$$

Впровадження системи дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію та підвищити економічну ефективність експлуатації обладнання.



Крім прямої економії електроенергії, додатковий економічний ефект досягається за рахунок:

- зменшення витрат на технічне обслуговування;
- зниження зносу механічних елементів;
- скорочення кількості аварійних простоїв;
- підвищення ресурсу роботи обладнання.

2. Технічний ефект

Технічний ефект впровадження системи полягає у покращенні характеристик роботи електропривода:

- забезпечення плавного пуску та зупинки;
- підвищення точності регулювання швидкості;
- зменшення динамічних навантажень;
- стабільна робота при змінному навантаженні;
- підвищення надійності системи.

Використання частотного перетворювача дозволяє адаптувати режим роботи електропривода до реальних умов експлуатації, що значно підвищує ефективність роботи конвеєра.

3. Загальний ефект

Сумарний ефект від впровадження системи полягає у підвищенні продуктивності, зниженні експлуатаційних витрат та покращенні технічних характеристик обладнання.

Отримані результати підтверджують доцільність використання сучасних засобів автоматизації у конвеєрних системах.

4.5 Термін окупності та рекомендації щодо впровадження

1. Розрахунок терміну окупності

Термін окупності визначається як відношення витрат на впровадження до річної економії:

$$T = \frac{K}{E} \quad (4.38)$$

де $K=80000$ – витрати на впровадження; $E=354000$ грн/рік – річна економія.

$$T = \frac{80000}{354000} \approx 0,22 \text{ року}$$

Отже, термін окупності становить приблизно 8 місяців.

2. Рекомендації щодо впровадження

Для ефективного впровадження системи доцільно:

- 
- використовувати сучасні частотні перетворювачі з функціями захисту;
 - забезпечити правильне налаштування ПІ-регулятора;
 - впровадити систему моніторингу параметрів роботи;
 - здійснювати регулярне технічне обслуговування;
 - інтегрувати систему з SCADA для централізованого керування.
- Застосування зазначених заходів дозволить підвищити ефективність експлуатації та забезпечити стабільну роботу системи.

Висновок до розділу

У четвертому розділі було виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи керування електроприводом стрічкового конвеєра.

Проведений аналіз показав, що застосування частотного керування дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, підвищити продуктивність та покращити технічні характеристики системи. Річна економія електроенергії становить 30000 кВт·год, що відповідає економії коштів у розмірі 120000 грн.

Розрахунок терміну окупності показав, що витрати на впровадження системи повертаються менш ніж за один рік, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованого рішення.



5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ

5.1 Основні вимоги охорони праці

Охорона праці є важливою складовою експлуатації конвеєрного обладнання та електроприводів, оскільки такі системи працюють в умовах підвищеної небезпеки. Основною метою забезпечення охорони праці є створення безпечних умов роботи персоналу, запобігання виробничому травматизму та забезпечення надійного функціонування обладнання.

Під час експлуатації конвеєрного обладнання на працівників можуть впливати різні небезпечні та шкідливі виробничі фактори. До них належать рухомі частини механізмів, такі як приводні елементи, транспортуючі органи, ролики та барабани, які можуть становити небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Значну загрозу також становить електричний струм, оскільки електроприводи працюють від мережі змінного струму. Додатковими факторами є підвищений рівень шуму, вібрації, пилове забруднення, а також можливість перегріву окремих елементів системи.

Відповідно до вимог законодавства України у сфері охорони праці, експлуатація електромеханічного обладнання повинна здійснюватися з дотриманням нормативних документів і правил безпеки. До роботи допускаються лише працівники, які пройшли навчання, інструктаж та перевірку знань з охорони праці. Регулярне проведення інструктажів і контроль знань персоналу є необхідною умовою зниження ризику виникнення нещасних випадків.

Важливою складовою забезпечення безпеки є технічний стан обладнання. Усі елементи електропривода та системи керування повинні перебувати у справному стані, а захисні пристрої мають функціонувати відповідно до встановлених вимог. Обов'язковим є використання заземлення електрообладнання, що забезпечує захист від ураження електричним струмом. Крім того, застосовуються автоматичні вимикачі, реле захисту та інші засоби, які забезпечують відключення системи у разі виникнення аварійних ситуацій.

Особлива увага приділяється захисту рухомих частин обладнання. Вони повинні бути оснащені огороженнями або захисними кожухами, що унеможливають доступ персоналу до небезпечних зон під час роботи. Також важливим є використання систем аварійного відключення, які дозволяють оперативно зупинити обладнання у разі виникнення небезпечної ситуації.

Забезпечення електробезпеки є одним із ключових аспектів охорони праці. Для цього необхідно дотримуватися вимог щодо ізоляції струмопровідних частин, використовувати захисні засоби та регулярно



проводити контроль технічного стану електрообладнання. Роботи з обслуговування та ремонту повинні виконуватися лише при відключеному живленні та з дотриманням встановлених правил безпеки.

5.2 Заходи безпеки під час експлуатації конвеєрного обладнання

Експлуатація конвеєрного обладнання потребує дотримання комплексу заходів безпеки, спрямованих на запобігання аварійним ситуаціям, зниження ризику травматизму та забезпечення надійної роботи мехатронної системи керування електроприводом. Безпечна експлуатація досягається шляхом поєднання технічних, організаційних та експлуатаційних заходів.

Одним із основних заходів безпеки є забезпечення належного технічного стану обладнання. Перед початком роботи необхідно проводити огляд конвеєра, перевіряти справність електропривода, системи керування, датчиків та захисних пристроїв. Особлива увага приділяється перевірці стану електричних з'єднань, наявності заземлення та справності автоматичних вимикачів.

Важливим елементом безпеки є використання захисних огорожень, які запобігають доступу персоналу до рухомих частин обладнання. Огороження повинні бути надійно закріплені та відповідати вимогам безпеки. Забороняється експлуатація конвеєра при відсутності або пошкодженні захисних елементів.



У процесі роботи необхідно забезпечити постійний контроль за параметрами функціонування системи. Це включає моніторинг швидкості руху, навантаження, температури електродвигуна та стану основних вузлів. Використання датчиків та автоматичних систем контролю дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та запобігати аваріям.

Особливу роль відіграє система аварійного відключення. Вона повинна забезпечувати можливість негайної зупинки обладнання у разі виникнення небезпечної ситуації. Аварійні кнопки повинні бути розташовані у зручних для доступу місцях і знаходитися в справному стані. Використання таких систем значно підвищує рівень безпеки експлуатації.

Під час роботи забороняється втручання у функціонування обладнання без його попереднього відключення. Проведення ремонтних або налагоджувальних робіт допускається лише після повного знеструмлення системи та вжиття відповідних заходів безпеки. Персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту, такі як захисний одяг, рукавички та взуття.

Також важливим є дотримання правил експлуатації та інструкцій з техніки безпеки. Робота обладнання повинна здійснюватися відповідно до встановлених режимів, без перевищення допустимих навантажень. Регулярне технічне обслуговування та діагностика дозволяють



підтримувати систему у працездатному стані та запобігати виникненню несправностей.

Додатково важливим заходом безпеки є забезпечення належної організації робочого простору. Робочі зони біля конвеєрного обладнання повинні бути добре освітлені, очищені від сторонніх предметів та забезпечені вільним доступом до органів керування і аварійних вимикачів. Наявність попереджувальних знаків та розмітки дозволяє знизити ризик нещасних випадків та підвищити рівень обізнаності персоналу щодо потенційних небезпек.

Важливу роль відіграє впровадження систем автоматичного контролю та діагностики. Сучасні мехатронні системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технічного стану обладнання, включаючи контроль перевантажень, температури, вібрацій та інших параметрів. Це дає змогу своєчасно виявляти несправності та запобігати аварійним ситуаціям ще на ранніх стадіях їх виникнення.

Особливу увагу необхідно приділяти профілактичному обслуговуванню обладнання. Планові огляди, регламентні роботи та своєчасна заміна зношених елементів забезпечують стабільну роботу системи та знижують імовірність відмов. Регулярне технічне обслуговування також сприяє продовженню строку служби обладнання та підвищенню його надійності.

5.3 Захист операторів та обслуговуючого персоналу

Забезпечення безпеки операторів та обслуговуючого персоналу є одним із ключових аспектів експлуатації конвеєрного обладнання та мехатронної системи керування електроприводом. Робота з таким обладнанням пов'язана з підвищеним рівнем небезпеки, тому необхідно передбачити комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків для здоров'я та життя працівників.

Одним із основних напрямів захисту персоналу є організація безпечного робочого місця. Робочі зони повинні бути достатньо освітлені, мати зручний доступ до органів керування та аварійних вимикачів. Розміщення обладнання повинно виключати можливість випадкового контакту з небезпечними елементами, а проходи та робочі майданчики мають бути вільними від сторонніх предметів.

Важливим елементом є використання засобів індивідуального захисту. Оператори та обслуговуючий персонал повинні бути забезпечені спеціальним одягом, захисним взуттям, рукавицями та, за необхідності, засобами захисту органів слуху та зору. Використання таких засобів дозволяє зменшити вплив небезпечних факторів виробничого середовища.

Особлива увага приділяється запобіганню ураженню електричним струмом. Для цього необхідно забезпечити надійну ізоляцію електричних



частин, використання заземлення та захисних пристроїв. Доступ до електрообладнання повинен бути обмежений, а всі роботи з обслуговування повинні виконуватися лише кваліфікованим персоналом.

З метою підвищення рівня безпеки у системі передбачено використання засобів сигналізації та індикації. Світлова та звукова сигналізація інформує персонал про стан обладнання, наявність аварійних режимів або необхідність втручання. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни у роботі системи.

Важливим заходом є навчання персоналу правилам безпечної роботи. Працівники повинні бути ознайомлені з інструкціями, знати порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій та вміти користуватися засобами захисту. Регулярне проведення інструктажів та перевірка знань сприяють підвищенню рівня безпеки.

Також необхідно враховувати психофізіологічні фактори, що впливають на роботу персоналу. Перевтома, неуважність або недостатня підготовка можуть призвести до помилок у керуванні обладнанням. Тому важливо дотримуватися режимів праці та відпочинку, а також забезпечувати належні умови роботи.

Додатково важливим напрямом захисту персоналу є використання систем блокування та міжблокувань, які унеможливають запуск обладнання при відкритих захисних кожухах або під час проведення ремонтних робіт. Такі системи дозволяють автоматично відключати електропривод у разі порушення умов безпечної експлуатації, що значно знижує ризик травмування персоналу.

Важливу роль відіграє ергономічна організація системи керування. Пульти керування, кнопки та елементи індикації повинні бути розташовані з урахуванням зручності користування та мінімізації помилок оператора. Зрозуміле маркування органів керування та використання стандартних кольорових позначень дозволяє швидко орієнтуватися у роботі системи та приймати правильні рішення в умовах виробничого процесу.

Особливу увагу слід приділяти захисту від впливу шуму та вібрації. Тривала дія цих факторів може негативно впливати на здоров'я персоналу, знижувати працездатність і концентрацію уваги. Для цього застосовуються шумоізоляційні матеріали, амортизаційні елементи, а також засоби індивідуального захисту, що дозволяють зменшити негативний вплив виробничого середовища.

Крім того, доцільним є впровадження систем дистанційного контролю та керування, які дозволяють зменшити безпосередню участь персоналу у небезпечних зонах. Використання сучасних мехатронних рішень дає можливість здійснювати моніторинг та керування процесами на відстані, що значно підвищує рівень безпеки працівників.

Не менш важливим є забезпечення інформаційної підтримки персоналу. Наявність схем, інструкцій, попереджувальних написів та візуальних підказок сприяє кращому розумінню принципів роботи обладнання та правильному виконанню операцій.



5.4 Система аварійного відключення та сигналізації

Система аварійного відключення та сигналізації є важливим елементом забезпечення безпечної експлуатації конвеєрного обладнання та мехатронної системи керування електроприводом. Її основним призначенням є своєчасне виявлення небезпечних режимів роботи, інформування персоналу та забезпечення швидкого відключення обладнання у разі виникнення аварійної ситуації.

У розробленій системі передбачено автоматичне та ручне аварійне відключення. Автоматичне відключення здійснюється при перевищенні допустимих параметрів роботи, таких як перевантаження електродвигуна, перегрів, коротке замикання або порушення нормального режиму функціонування. У таких випадках система керування формує сигнал на відключення живлення електропривода, що дозволяє запобігти пошкодженню обладнання.

Ручне аварійне відключення реалізується за допомогою кнопок аварійного зупинення, які розміщуються у доступних місцях уздовж конвеєра. Це дає можливість оператору або обслуговуючому персоналу оперативно зупинити обладнання у разі виникнення небезпечної ситуації.

Важливим елементом системи є використання різних типів захисних пристроїв. До них належать автоматичні вимикачі, струмові та теплові реле, а також вбудовані функції захисту частотного перетворювача. Ці пристрої забезпечують контроль параметрів роботи та відключення системи при відхиленні від допустимих значень.

Система сигналізації забезпечує інформування персоналу про стан обладнання. Світлова індикація використовується для відображення режимів роботи, наявності аварій або несправностей, тоді як звукова сигналізація застосовується для привернення уваги у критичних ситуаціях.

У системі також реалізовано контроль стану датчиків і виконавчих пристроїв. У разі виявлення несправності система блокує запуск обладнання, що забезпечує додатковий рівень безпеки. Крім того, передбачено алгоритми плавного пуску та зупинки, які зменшують динамічні навантаження та підвищують надійність роботи системи.

Датчики контролю стану технологічного процесу виконують ключову роль у забезпеченні безпеки. До них належать датчики перевантаження, швидкості, температури та положення. У разі відхилення контрольованих параметрів від допустимих значень система формує сигнал тривоги або відключення, що дозволяє запобігти розвитку аварійної ситуації.

Реалізація принципу відмовобезпечності передбачає перехід системи у безпечний стан при виникненні несправностей або втраті сигналів керування. У таких випадках здійснюється зупинка електропривода, що забезпечує запобігання неконтрольованій роботі обладнання та підвищує рівень надійності системи.



Швидкодія системи аварійного відключення визначає ефективність її функціонування. Час реагування на небезпечні режими роботи повинен бути мінімальним. Використання сучасних електронних компонентів і алгоритмів керування дозволяє забезпечити оперативне відключення обладнання при виникненні критичних ситуацій.

Застосування резервування елементів системи керування підвищує її надійність. Резервні канали передачі сигналів, дублювання датчиків та окремих вузлів дозволяють зберігати працездатність системи навіть у разі відмови окремих компонентів, що є особливо актуальним для безперервних технологічних процесів.

Ведення журналу аварійних подій та діагностики дозволяє фіксувати всі випадки спрацювання захистів і відхилення параметрів. Аналіз отриманих даних забезпечує можливість виявлення причин несправностей, підвищення ефективності технічного обслуговування та запобігання повторним відмовам у роботі системи.

5.5 Впровадження інструкцій та нормативів з охорони праці

Впровадження інструкцій та дотримання нормативно-правових актів з охорони праці є обов'язковою умовою безпечної експлуатації конвеєрного обладнання та мехатронної системи керування електроприводом. Нормативна база України у сфері охорони праці включає державні стандарти (ДСТУ), правила безпечної експлуатації електроустановок, а також галузеві нормативні акти, які регламентують вимоги до технічного стану обладнання, організації робіт і підготовки персоналу [20].

Одним із ключових нормативних документів є стандарт щодо безпеки машин, який визначає принципи проєктування безпечних систем керування. Зокрема, відповідно до вимог стандарту щодо функціональної безпеки систем керування, необхідно забезпечити надійність роботи систем, здатність до виявлення відмов та безпечну реакцію на аварійні ситуації [20]. Безпосередньо стосується мехатронних систем керування електроприводом, де правильна робота алгоритмів керування впливає на загальний рівень безпеки.

Значну роль відіграють правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, які встановлюють вимоги до технічного стану обладнання, умов його експлуатації та контролю за безпекою. Вони визначають критерії перевірки електроустановок, порядок їх обслуговування та вимоги до захисних засобів [23]. Згідно з цими правилами, електрообладнання повинно бути справним, мати відповідне заземлення та захист від короткого замикання.

Важливим елементом системи охорони праці є розробка локальних інструкцій для персоналу. Інструкція з охорони праці є нормативним документом, який містить обов'язкові вимоги щодо безпечного виконання робіт, експлуатації обладнання та поведінки працівників у виробничих



умовах [21]. Такі інструкції повинні включати порядок підготовки до роботи, правила безпечного запуску обладнання, дії у разі виникнення аварійних ситуацій, а також вимоги до завершення роботи.

Особлива увага приділяється електробезпеці. Відповідно до нормативних документів, усі металеві частини обладнання повинні бути заземлені, а доступ до струмопровідних елементів має бути обмежений. До обслуговування електроустановок допускається лише персонал, який пройшов відповідне навчання, має групу з електробезпеки та пройшов інструктаж [23]. Це дозволяє мінімізувати ризик ураження електричним струмом та підвищити рівень безпеки.

Крім того, нормативна база передбачає використання засобів колективного та індивідуального захисту. До засобів колективного захисту належать огороження, блокувальні пристрої, сигналізація та системи аварійного відключення. Засоби індивідуального захисту включають спеціальний одяг, діелектричні рукавички, взуття та інші засоби, що зменшують вплив небезпечних факторів [21].

Організаційні заходи також відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки. Вони включають проведення інструктажів, навчання персоналу, перевірку знань, а також контроль за дотриманням правил охорони праці. Відповідно до вимог нормативних документів, працівники повинні виконувати лише ті роботи, які передбачені їх посадовими обов'язками, та дотримуватися встановлених правил безпеки [21].

Таким чином, впровадження інструкцій та дотримання нормативів з охорони праці забезпечує комплексний підхід до безпеки експлуатації конвеєрного обладнання.

Висновок до 5

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації конвеєрного обладнання з урахуванням особливостей мехатронної системи керування електроприводом.

Проведений аналіз показав, що експлуатація конвеєрного обладнання пов'язана з дією небезпечних і шкідливих виробничих факторів, зокрема рухомих частин механізмів, електричного струму, шуму та вібрації. У зв'язку з цим обґрунтовано необхідність дотримання вимог охорони праці та застосування комплексного підходу до забезпечення безпеки.

У розділі визначено основні вимоги охорони праці, розглянуто заходи безпеки під час експлуатації обладнання, а також засоби захисту операторів та обслуговуючого персоналу. Особливу увагу приділено впровадженню систем аварійного відключення та сигналізації, що дозволяють своєчасно реагувати на небезпечні режими роботи.

Встановлено, що використання сучасних мехатронних систем керування сприяє підвищенню рівня безпеки за рахунок автоматизації процесів контролю та захисту. Впровадження нормативних документів,



інструкцій та системи навчання персоналу забезпечує зниження ризику виникнення аварійних ситуацій і виробничого травматизму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблена система керування електроприводом конвеєрного обладнання реалізує сучасний підхід до автоматизації промислових процесів. Поєднання механічних вузлів, електротехнічних компонентів та програмного керування забезпечує узгоджену роботу привода. Застосування частотного регулювання дозволило змінювати швидкість обертання двигуна відповідно до виробничих умов. Впровадження замкненого контуру керування підвищило точність підтримання заданих параметрів. Використання датчиків і контролера забезпечує постійний моніторинг режимів роботи. Отримана система відповідає вимогам до надійності та ефективності.

Проведений аналіз показав, що традиційні системи керування мають значні обмеження. Вони характеризуються високими пусковими струмами та значними втратами електроенергії. Ступінчастий характер регулювання призводить до нестабільної роботи електропривода. Динамічні навантаження негативно впливають на механічні вузли. Знос обладнання зростає, що скорочує термін експлуатації. Такі недоліки обмежують використання застарілих методів у сучасних умовах виробництва.

Застосування частотного перетворювача дозволило суттєво покращити характеристики електропривода. Пуск двигуна відбувається плавно без різких стрибків струму. Регулювання швидкості здійснюється в широкому діапазоні. Робота привода адаптується до змін навантаження. Зменшуються механічні навантаження на стрічку, редуктор і ролики. Підвищується загальна надійність системи.

Реалізація двоконтурної системи керування забезпечила підвищення швидкодії та точності. Внутрішній контур регулює струм електродвигуна і швидко реагує на зміну навантаження. Зовнішній контур формує швидкість обертання відповідно до заданого сигналу. Узгоджена робота контурів забезпечує стабільність параметрів. Вплив зовнішніх збурень мінімізується. Досягається ефективне керування електроприводом.

Використання ПІ-регулятора дозволило досягти оптимального режиму роботи системи. Пропорційна складова формує швидку реакцію на відхилення. Інтегральна складова усуває статичну похибку. Перехідні процеси мають затухаючий характер. Коливання параметрів відсутні. Система працює стабільно у різних режимах.

Результати комп'ютерного моделювання підтвердили працездатність розробленої моделі. Швидкість електродвигуна змінюється плавно від нуля до заданого значення. Час виходу на усталений режим становить кілька секунд. Перерегулювання не перевищує допустимих значень. Струм у процесі пуску обмежується та не перевищує номінальних параметрів. Момент двигуна стабілізується відповідно до навантаження.



Дослідження показали, що система ефективно реагує на зміну режимів роботи. При змінному навантаженні параметри залишаються стабільними. Відсутні різкі коливання швидкості та струму. Динамічні процеси мають плавний характер. Забезпечується швидка адаптація до нових умов. Робота привода залишається стійкою.

Регулювання швидкості дозволяє знизити енергоспоживання електропривода. Двигун працює у відповідності до реального навантаження. Відсутня перевитрата електроенергії. Зменшується навантаження на електричну мережу підприємства. Підвищується ефективність використання ресурсів. Енергетичні витрати скорочуються.

Зменшення пускових струмів має важливе практичне значення. Знижується нагрів електродвигуна. Зменшується ймовірність аварійних ситуацій. Підвищується ресурс електрообладнання. Робота системи стає більш надійною. Вплив на мережу зменшується.

Плавний режим роботи позитивно впливає на механічну частину конвеєра. Знижується знос стрічки та роликів. Редуктор працює без перевантажень. Зменшується кількість відмов. Термін експлуатації обладнання збільшується. Витрати на обслуговування скорочуються.

Система забезпечує стабільне підтримання швидкості транспортування. Відсутні різкі зміни режимів роботи. Рух матеріалу здійснюється рівномірно. Підвищується якість виробничого процесу. Зменшуються втрати матеріалу. Продуктивність підприємства зростає.

Використання датчиків забезпечує точний контроль параметрів. Вимірюються швидкість, струм і температура. Інформація передається до контролера. Обробка даних здійснюється у реальному часі. Формуються керуючі впливи. Підтримується оптимальний режим роботи.

Контролер виконує функцію центрального елемента системи. Він реалізує алгоритми керування. Забезпечує взаємодію між компонентами. Обробляє сигнали від датчиків. Формує команди для виконавчих пристроїв. Забезпечує стабільність функціонування.

Частотний перетворювач виконує регулювання параметрів живлення двигуна. Змінюється частота та напруга. Це дозволяє керувати швидкістю обертання. Забезпечується плавний пуск і зупинка. Зменшуються електричні навантаження. Підвищується ефективність роботи.

Реалізація систем захисту підвищує безпеку експлуатації. Використовуються автоматичні вимикачі та реле. Контролюються параметри роботи обладнання. При відхиленнях відбувається відключення. Запобігається пошкодження вузлів. Знижується ризик аварій.

Аварійне відключення забезпечує швидку реакцію у небезпечних ситуаціях. Кнопки зупинки розміщені у доступних місцях. Оператор може оперативно зупинити систему. Захисні алгоритми працюють автоматично. Забезпечується безпечна експлуатація. Ризик травматизму зменшується.

Сигналізація інформує персонал про стан обладнання. Використовується світлова та звукова індикація. Оператор отримує



інформацію про відхилення. Реакція на несправності прискорюється. Контроль стає ефективнішим. Надійність роботи підвищується.

Організаційні заходи також впливають на безпеку. Персонал проходить навчання та інструктаж. Використовуються засоби індивідуального захисту. Дотримуються правила експлуатації. Роботи виконуються відповідно до вимог. Знижується ризик нещасних випадків.

Застосування мехатронного підходу дозволило інтегрувати всі елементи системи. Забезпечується узгоджена робота компонентів. Підвищується ефективність керування. Система функціонує як єдине ціле. Досягається високий рівень автоматизації. Покращуються експлуатаційні характеристики.

Підвищення продуктивності конвеєра досягається завдяки стабільній роботі. Швидкість регулюється відповідно до потреб. Зменшуються простой обладнання. Поліпшується організація виробничого процесу. Зростає ефективність транспортування. Підприємство отримує додаткові переваги.

Зниження зносу обладнання забезпечує економічний ефект. Скорочуються витрати на ремонт. Підвищується ресурс роботи вузлів. Зменшується кількість аварій. Обслуговування стає простішим. Загальні витрати знижуються.

Енергоефективність системи є важливою перевагою впровадження. Споживання електроенергії зменшується. Робота оптимізується відповідно до навантаження. Використання ресурсів стає раціональним. Підвищується економічна ефективність. Знижується собівартість виробництва.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої системи. Вона забезпечує стабільність, надійність та ефективність роботи електропривода. Відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації. Дозволяє підвищити продуктивність і безпеку. Може бути використана на підприємствах різних галузей.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дьяченко О., Делембовський М., Левчук К., Противень О. Огляд конструкцій конвеєрів для переміщення сипких матеріалів, порівняння і дослідження їх параметрів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2024. Вип. 103. С. 33–44. URL: <https://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/311690>.
2. Amber Industries. Overhead conveyor. URL: <https://www.amber-industries.ltd.uk/overhead-conveyors> (дата звернення: 15.03.2026).
3. Pavlenko I. I. Robotic technological complexes: monograph. I. I. Pavlenko, V. A. Mazhara; under the editorship I. I. Pavlenko. Kropyvnytskyi: KOD, 2019. 382 p.
4. VIMAL SPECIAL BUILDING. Inclined belt conveyor [Електронний ресурс]. URL: <https://spetsbud.vimal.ua/ua/inclined-belt-conveyor> (дата звернення: 15.03.2026).
5. Konsort. Типи та види конвеєрів. URL: <https://konsort.com.ua/typy-ta-vydy-konveyeriv/> (дата звернення: 15.03.2026).
6. CHAIN AND FLIGHT CONVEYOR – diagram, schematic, and image 03. Patents Encyclopedia. URL: <https://www.patentsencyclopedia.com/app/20090250318> (дата звернення: 15.03.2026).
7. Казак І. О., Мотрич В. А. Аналіз особливостей конструкції гвинтового живильника з метою удосконалення його роботи // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2021. № 1. С. 22–30. URL: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2021.228085>.
8. Sun H., Ma H., Zhao Y. DEM investigation on conveying of non-spherical particles in a screw conveyor. Particuology. 2021. Vol. 65. PP. 17-31. URL: https://www.researchgate.net/publication/353148984_DEM_investigation_on_conveying_of_non-spherical_particles_in_a_screw_conveyor/
9. Freitas A. G. de. Energy and Sustainable Development. October 2019. Federal University of ABC. P. 255. URL: https://www.researchgate.net/publication/339934406_Energy_and_Sustainable_Development.
10. Rulmeca Corporation. Conveyor Technology Handbook (TC101 Catalog). 2024. 104 c. URL: https://rulmecacorp.com/wp-content/uploads/2024/09/TC101_catalog_2024a_complete_website.pdf (дата звернення: 15.03.2026).
11. Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA). Technical Resources and Guidelines. URL:



<https://cemanet.org/resources/technical-downloads/> (дата звернення: 15.03.2026).

12. Коруняк П., Баранович С., Вечерік-Дриженко В., Оліфер О. Підвищення ефективності використання стрічкових конвеєрів. Машина та робочі процеси агропромислового виробництва. Дубляни, 2020. С. 33–38. URL: <https://visnyk.lnup.edu.ua/index.php/agroengineering/article/view/78>.

13. Дудка В. С. Електромеханічна система стрічкового конвеєра. Київ, 2025. 84 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2dd54c05-0fc6-4474-a774-3c4d65b69be2/content>.

14. Новак Д., Карпукін В., Єршов Р., Чен Х. Автоматизація та діагностика несправностей машин з використанням методів машинного навчання. *Автоматизація*. 2025. Т. 6, № 3. С. 34. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4052/6/3/34>.

15. Воскобойник В. Е. Основи електропривода виробничих машин та комплексів: навч. посіб. В.Е. Воскобойник, В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с.

16. Abubaker A. V/f Control of 3-Phase Induction Motor Using VFD: A Study. *LinkedIn*. 2025. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/vf-control-3-phase-induction-motor-using-vfd-study-abubaker-mieee-svvoe> (дата звернення: 15.03.2026).

17. Автоматизований електропривод ч. 2. навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». В.І. Теряєв. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 204 с.

18. Бутенко С. П. Автоматизований пристрій керування конвеєром : кваліфікаційний проєкт бакалавра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Хмельницький, 2025. 73 с. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/18940>.

19. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навчальний посібник. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 342 с. URL: <https://surl.li/wwohkb>.

20. ДСТУ EN ISO 13849-1:2016 Безпечність машин. Деталі систем управління, пов'язані з забезпеченням безпеки. Частина 1. Загальні принципи проектування (EN 13849-1:2015, IDT; ISO 13849-1:2015, IDT). URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page>.

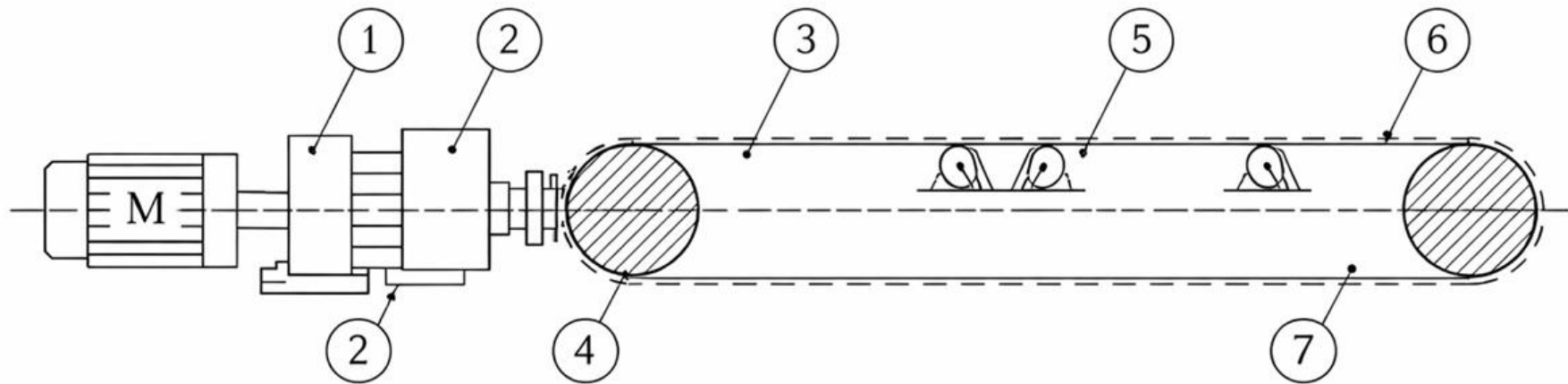
21. Про критерії безпечної експлуатації електроустановок: шпаргалка від журналу «Охорона праці і пожежна безпека». 2025. URL: <https://oppb.com.ua/news/pro-kryteriyi-bezpechnoyi-ekspluatatsiyi-elektroustanovok-shpargalka-vid-zhurnalu-ohorona-pratsi-i-pozhezhna-bezpeka>.

22. ДСТУ EN 62061:2017. Безпека машин. Функціональна безпека систем керування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 72 с.



23. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
Київ : Міністерство енергетики України, 2017. 306 с.

Додаток А



Кінематична схема стрічкового конвеєра

1 – електродвигун 2 – редуктор 3 – муфта 4 – привідний барабан, 5 – стрічка, 6 – натяжний барабан 7 – роlikоопори

Кінематична схема відображає передачу руху від електродвигуна через редуктор і муфту до привідного барабана, який забезпечує переміщення конвеєрної стрічки.

Рисунок А – Кінематична схема стрічкового конвеєра

Додаток Б

Конвеєр стрічковий. Загальний вигляд

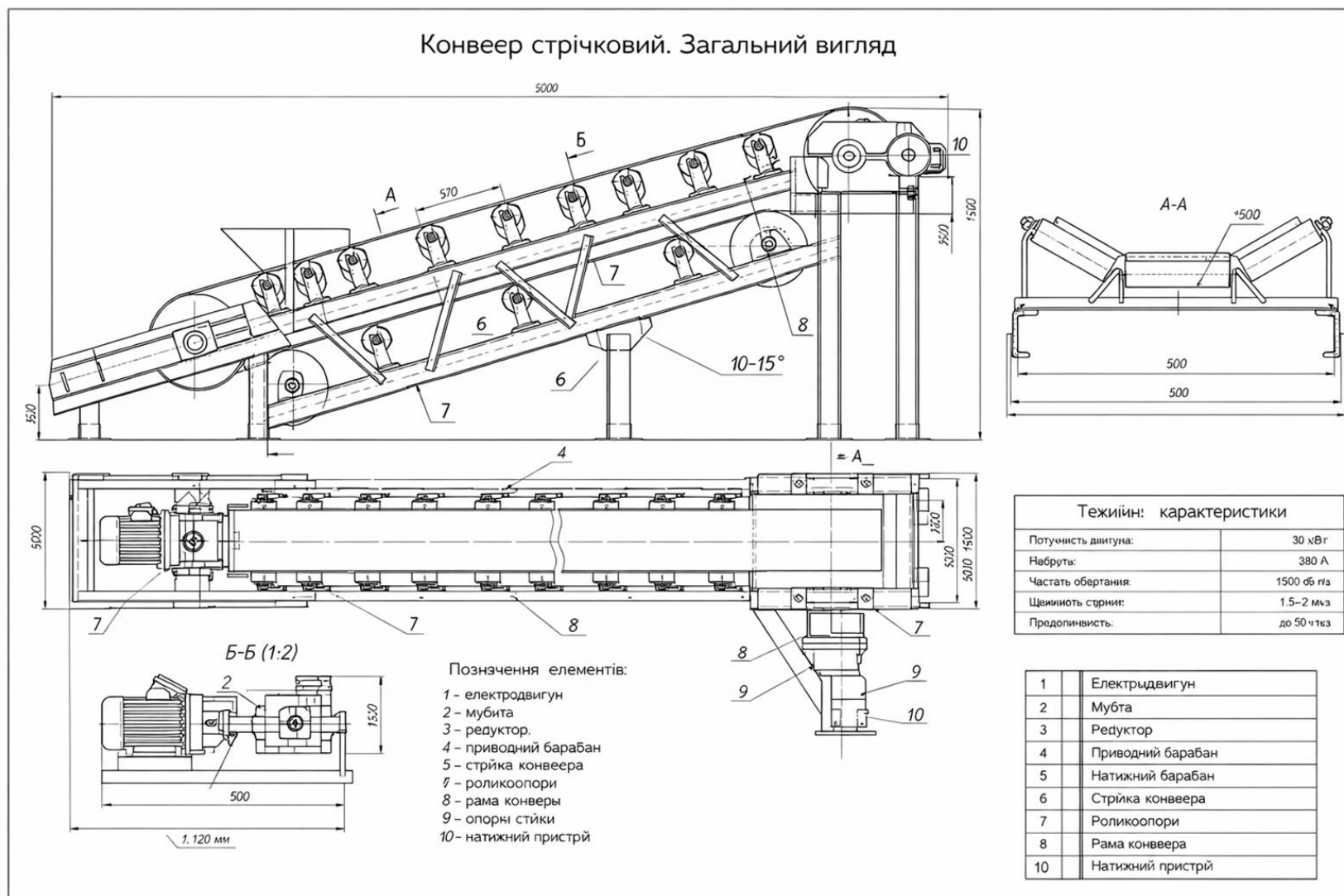


Рисунок Б – Конвеєр стрічковий. Загальний вигляд

Додаток В



Рисунок В – 3D модель стрічкового конвеєра з електроприводом

Додаток Г

СТРУКТУРНА СХЕМА МЕХАТРОННОЇ СІС
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА

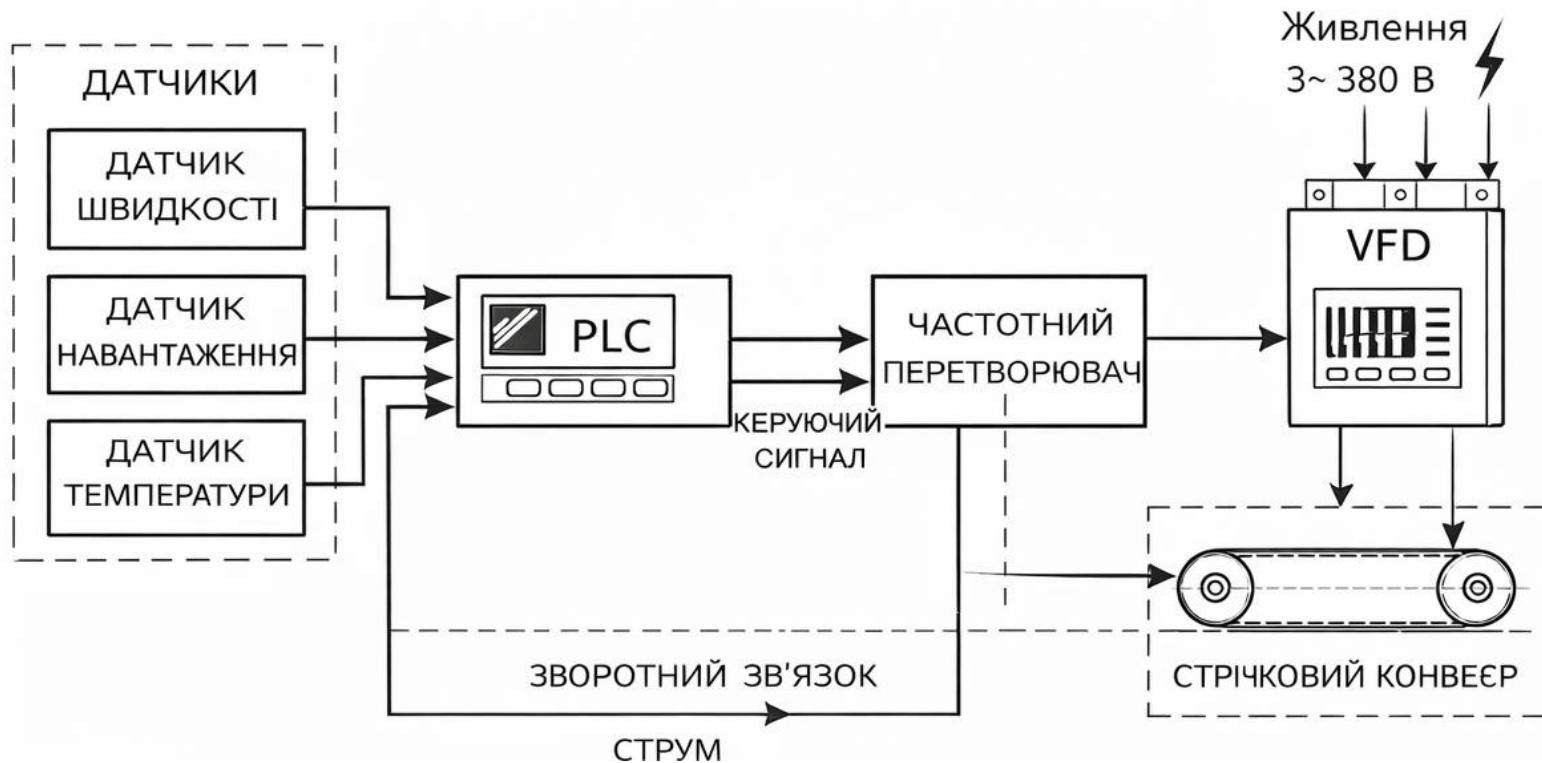


Рисунок Г – Структурна схема мехатронної системи керування електроприводом конвеєра

Додаток Е



Рисунок Е – Функціональна схема системи керування конвеєрним обладнанням

Додаток Є

VFD CONTROL AND POWER DRAWING

InstrumentationTools.com

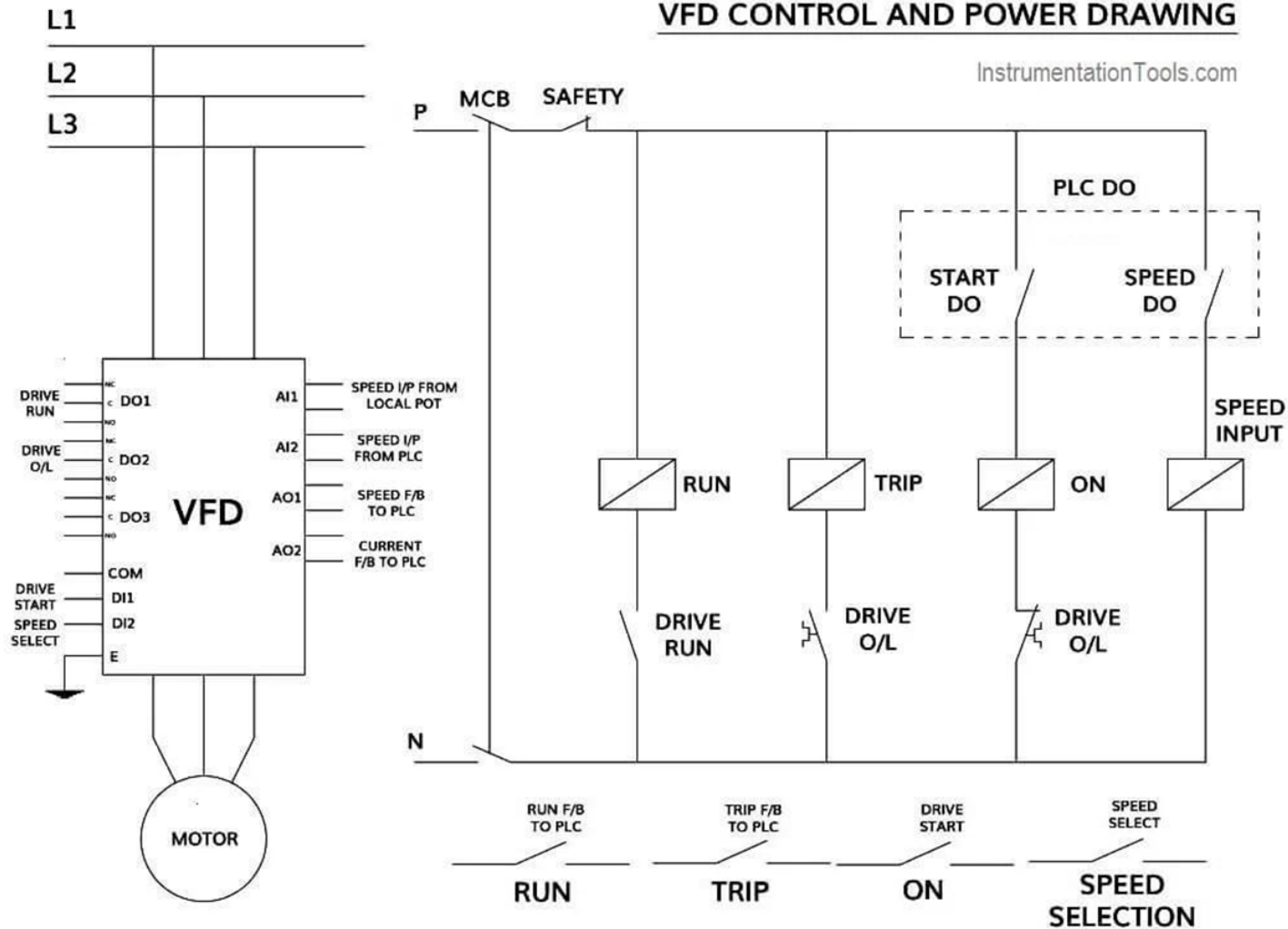


Рисунок Є – Принципова електрична схема підключення елементів системи керування електроприводом конвеєра

Додаток Ж

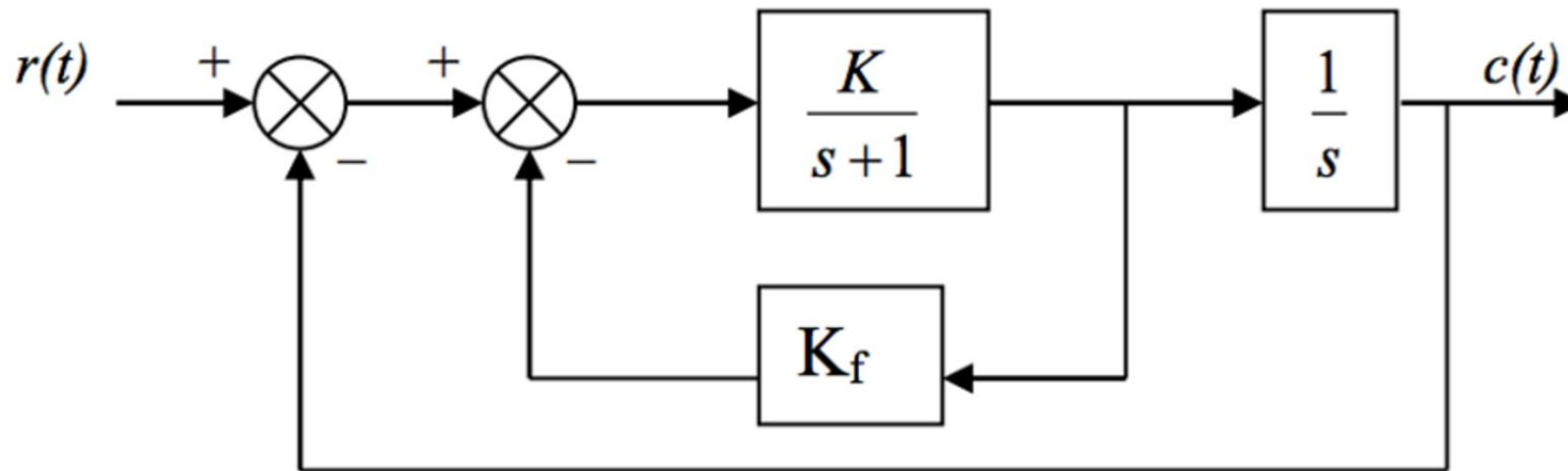


Рисунок Ж – Алгоритм роботи мехатронної системи керування електроприводом конвеєра