

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

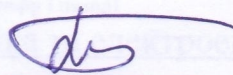
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

на тему: «Автоматизація системи керування шнековим транспортером
на базі ESP32»

Виконав: студент IV курсу, групи 4317ст3

Кашук Микола Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

асист. каф. автоматики, к.т.н, Іванов А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

доц. каф. автоматики, Савченко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

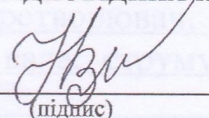
Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

м. Миколаїв – 2026 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електромеханіка та електроенергетика»

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	ЗАТВЕРДЖУЮ Завідувач кафедри, к.т.н. доцент <i>О. Г. Васильєв</i> О. Г. Васильєв «16» лютого 2026 року
Охорона праці	Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри	

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ**

гр. 4317стЗ

Кашук Микола Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація системи керування шнековим транспортером на базі ESP32»

керівник роботи Іванов Антон Віталійович, кандидат технічних наук, асистент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року № 286-УЧ

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи керований об'єкт — шнековий транспортер для сипучих матеріалів; тип електроприводу — асинхронний двигун змінного струму; джерело живлення — промислова мережа 380 В / 220 В для силової частини та постійна напруга 24 В / 5 В / 3.3 В для ланцюгів керування і датчиків; метод керування — ручний, віддалений (через локальний веб-сервер) та автоматичний (захист від заклинювання, плавний пуск); апаратна база — мікроконтролер ESP32, частотний перетворювач, промислові датчики (рівня заповнення, швидкості обертання вала, струму); протокол передачі даних — Wi-Fi, MQTT.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз технологічних процесів транспортування сипучих

матеріалів та вибір мікроконтролерної бази. 2 Проектування апаратної частини системи керування (вибір силового обладнання, датчиків та розробка схем узгодження). 3 Розробка програмного комплексу, локального веб-сервера та налаштування передачі даних. 5 Охорона праці та техніка безпеки. 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових графіків)

1 Функціональна схема автоматизації шнекового транспортера з функцією віддаленого контролю. 2 Принципова електрична схема системи керування та схема узгодження рівнів напруги. 3 Блок-схема загального алгоритму роботи системи керування шнеком. 4 Алгоритм роботи локального веб-сервера та передачі даних по протоколу MQTT. 5 Інтерфейс віддаленого моніторингу та керування. 6 Результати програмування автоматичної системи.

6. Консультанти розділів роботи

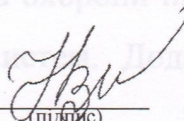
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри	15.05.26	01.06.26

7. Дата видачі завдання 16 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

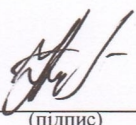
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження технологічних процесів транспортування сипучих матеріалів	27.04.26	
2	Проектування апаратної частини системи керування	11.05.26	
3	Розробка програмного комплексу та веб-інтерфейсу	25.05.26	
4	Охорона праці	01.06.26	

Студент


(підпис)

Кащук М. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Іванов А. В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ключові слова: система керування шнековим транспортером, автоматизація, мікроконтролер ESP32, частотний перетворювач, IoT, веб-сервер, протокол MQTT, SCADA, промислові датчики.

Об'єм пояснювальної записки складає 86 аркушів, вона містить 4 розділи, 20 ілюстрацій, 2 таблиці та 27 найменувань в списку використаної літератури та 6 аркушів мультимедійної презентації.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та проектуванню системи автоматизованого керування шнековим транспортером для сипучих матеріалів. Розроблена система базується на мікроконтролері ESP32 та забезпечує як локальне, так і віддалене управління технологічним процесом транспортування, підвищуючи його надійність та енергоефективність.

В роботі подано характеристику основних компонентів системи, таких як частотний перетворювач для регулювання швидкості, датчики заповнення, швидкості обертання вала та струму. Складено функціональну та принципову електричну схеми, обґрунтовано вибір силового обладнання та розроблено схему узгодження рівнів напруги між ESP32 та промисловими датчиками.

Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє керування через Wi-Fi, з можливістю візуалізації параметрів у реальному часі на локальному веб-сервері та інтеграції в систему верхнього рівня (SCADA) за протоколом MQTT. Реалізовано алгоритми плавного пуску, зупинки та захисту шнека від заклинювання. Для демонстрації алгоритмів роботи системи використано блок-схеми та методи програмної реалізації.

Крім того, в роботі розглянуті питання з охорони праці при експлуатації рухомих механізмів та мікропроцесорних систем. Додатки містять слайди мультимедійної презентації (Додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1. Принцип роботи та конструктивні особливості шнекових транспортерів.....	9
1.2. Огляд існуючих систем керування та їхні недоліки.....	13
1.3. Аналіз можливостей мікроконтролера ESP32 для промислової автоматизації.....	19
Висновки за розділом.....	23
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	25
2.1. Розробка структурно-функціональної схеми автоматизації.....	25
2.2. Розрахунок та вибір приводного електродвигуна.....	27
2.2.1 Розрахунок необхідної потужності електропривода.....	27
2.2.2 Обґрунтування вибору та технічні характеристики електродвигуна.....	30
2.3. Вибір силового обладнання та засобів вимірювання.....	32
2.3.1 Вибір та обґрунтування частотного перетворювача.....	32
2.3.2 Обґрунтування та вибір датчиків контролю.....	35
2.4. Проєктування схеми узгодження рівнів напруги.....	39
2.5. Розробка принципової електричної схеми пристрою.....	40
Висновки за розділом.....	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	44
3.1. Алгоритм функціонування системи автоматизованого керування шнековим транспортером.....	44
3.2. Розробка прикладного програмного забезпечення для системи керування ..	48
3.3. Алгоритм функціонування інтерфейсу дистанційного керування системою.....	57
3.4. Дослідження та аналіз динамічних показників роботи автоматизованої системи.....	60
Висновки за розділом.....	62
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	64
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	64

4.2 Вимоги електробезпеки при експлуатації системи керування.....	66
4.3 Заходи безпеки під час обслуговування шнекового транспортера.....	69
4.4 Пожежна безпека та дії при аварійних ситуаціях.....	71
Висновки за розділом.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
ДОДАТОК А МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	81

ВСТУП

Сучасні промислові підприємства та агропромислові комплекси перебувають на етапі активної цифрової трансформації, де автоматизація технологічних процесів є ключовим фактором підвищення продуктивності та конкурентоспроможності. Однією з найважливіших складових багатьох виробничих ліній (харчової, хімічної, будівельної та сільськогосподарської галузей) є безперебійне транспортування сипучих матеріалів. Шнекові (гвинтові) транспортери завдяки своїй компактності, надійності та здатності працювати в закритих контурах є найбільш розповсюдженим рішенням для цього завдання. Проте традиційні релейно-контакторні системи керування такими транспортерами вже не задовольняють сучасні вимоги щодо енергоефективності, безпеки та інтеграції в єдиний інформаційний простір підприємства.

Актуальність даної роботи полягає у розробці сучасної, інтелектуальної системи автоматизованого керування шнековим транспортером, яка поєднує в собі переваги IoT-технологій, точне керування електроприводом та адаптивний моніторинг. Використання мікроконтролера ESP32 дозволяє не лише забезпечити надійне локальне керування (плавний пуск, захист від заклинювання), а й створити економічно вигідний вузол для віддаленого моніторингу параметрів роботи механізму через локальний веб-сервер та інтеграції із системами диспетчеризації (SCADA) за бездротовими протоколами.

Метою даної роботи є проєктування, розробка та тестування системи керування електроприводом шнекового транспортера на базі мікроконтролера ESP32, яка забезпечує безперебійне транспортування сипучих матеріалів, дистанційне керування та автоматичне реагування на аварійні ситуації.

Для досягнення цієї мети було поставлено низку завдань:

- провести дослідження технологічних процесів транспортування сипучих матеріалів та проаналізувати можливості мікроконтролера ESP32 для їх автоматизації;

- розробити функціональну та принципову електричну схеми системи керування;
- здійснити вибір силового обладнання (частотного перетворювача) та датчиків контролю;
- спроектувати схему узгодження рівнів напруги між мікроконтролером та промисловими датчиками;
- розробити програмний комплекс для керування шнеком, включаючи реалізацію локального веб-сервера та налаштування передачі даних за протоколом MQTT;
- протестувати стабільність роботи системи та її реакцію на аварійні ситуації.

Об'єктом дослідження є системи автоматизованого керування транспортуванням сипучих матеріалів у промисловості. Предметом дослідження є апаратні та програмні засоби розробки системи керування електроприводом шнекового транспортера на базі платформи ESP32.

Робота має як теоретичну, так і практичну цінність. Теоретичні аспекти включають аналіз можливостей інтеграції сучасних IoT-мікроконтролерів у промислові мережі. Практична частина демонструє реалізацію готового до впровадження пристрою керування, що забезпечує енергозбереження та захист механічної частини транспортера. Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих виробничих ліній.

Структура роботи відповідає поставленим завданням. У першому розділі проведено дослідження принципів роботи шнеків та можливостей мікроконтролера. Другий розділ присвячений проектуванню апаратної частини системи та вибору обладнання. У третьому розділі описано програмну реалізацію системи, розробку веб-інтерфейсу та протоколів зв'язку. У четвертому розділі розглянуто вимоги з охорони праці.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Принцип роботи та конструктивні особливості шнекових транспортерів

Шнекові (гвинтові) транспортери є одним із найдавніших та найбільш затребуваних засобів безперервного транспортування сипучих, дрібнокускових, пилоподібних та пастоподібних матеріалів. Їх широке застосування в агропромисловому комплексі, будівельній, хімічній та харчовій галузях зумовлене високою надійністю, простотою обслуговування, компактністю габаритів порівняно зі стрічковими чи ковшовими елеваторами, а також можливістю повної герметизації технологічного процесу. Остання характеристика є критично важливою при переміщенні токсичних речовин, матеріалів із різким запахом або таких, що утворюють вибухонебезпечний пил [1].

Основою принципу дії шнекового транспортера є використання обертального руху гвинта (шнека) всередині нерухомого корпусу (жолоба або труби) [2]. Загальна структурна схема класичного гвинтового конвеєра наведена нижче (рис. 1.1).

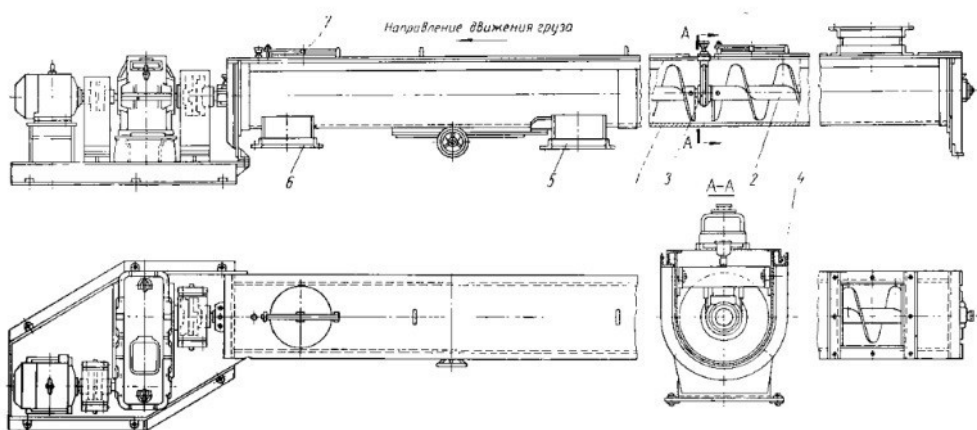


Рис. 1.1 Загальна схема конструкції шнекового транспортера

Конструкція шнекового транспортера включає в себе наступні елементи: 1 – проміжна (підвісна) підшипникова опора вала; 2 – транспортуючий робочий орган (гвинт/шнек); 3 – нерухомий корпус (U-подібний жолоб); 4 – знімна кришка жолоба (для герметизації та обслуговування); 5, 6 – розвантажувальні патрубки (отвори для вивантаження матеріалу).

У процесі роботи транспортера обертовий гвинт захоплює матеріал своїми лопатями і переміщує його вздовж поздовжньої осі від завантажувального патрубка до розвантажувального вікна. Фізика цього процесу аналогічна механіці руху гайки по гвинту, що обертається: роль нерухомої гайки відіграє сам транспортований матеріал. Він утримується від обертання разом зі шнеком завдяки дії сили тяжіння та силі тертя частинок об внутрішні стінки нерухомого жолоба.

Важливим аспектом є вплив відцентрової сили на частинки матеріалу. При перевищенні критичної швидкості обертання вала відцентрова сила стає більшою за силу тяжіння, внаслідок чого матеріал притискається до стінок жолоба і починає обертатися разом із гвинтом [3]. У такому критичному режимі поступальне переміщення матеріалу припиняється, що призводить до падіння продуктивності до нуля та ризику заклинювання механізму. Саме тому швидкість обертання шнека суворо регламентується залежно від фізико-механічних властивостей вантажу і зазвичай лежить у межах від 10 до 150 об/хв.

Продуктивність шнекового транспортера є ключовим технологічним параметром і визначається за такою теоретичною залежністю [4]:

$$Q = 60 \cdot (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot \rho \cdot C \quad (1.1)$$

де D — зовнішній діаметр гвинта, м; S — крок гвинта, м; n — частота обертання вала, об/хв; ψ — коефіцієнт заповнення жолоба; ρ — насипна

густина матеріалу, т/м^3 ; C — коефіцієнт, що враховує кут нахилу транспортера.

Значення коефіцієнта заповнення жолоба (ψ) є критичним для стабільної роботи і вибирається залежно від властивостей вантажу: для важких і високоабразивних матеріалів він становить 0.125–0.15; для легких, неабразивних і добре сипучих матеріалів (наприклад, зерно) може досягати 0.3–0.45. Переповнення жолоба є найчастішою причиною аварійних зупинок і перегріву приводних двигунів, що зумовлює гостру необхідність розробки електронних систем моніторингу та автоматики, здатних відстежувати струм навантаження двигуна та запобігати заклинюванню [5].

Конструктивно гвинтовий конвеєр складається з кількох ключових вузлів. Основним робочим органом є транспортуючий гвинт. Залежно від типу вантажу застосовують різні конструкції гвинтів (рис. 1.2).

Суцільні гвинти застосовуються для сухих, порошкоподібних та дрібнозернистих матеріалів. Стрічкові та лопатеві гвинти доцільно використовувати для вологих, злежуваних та крупнокускових вантажів, оскільки така конструкція зменшує ризик налипання матеріалу на вал.

Корпус (жолоб) виконує роль направляючої для матеріалу. У горизонтальних системах переважно використовують U-подібні жолоби зі знімними кришками, що полегшує технічне обслуговування. У похилих та вертикальних транспортерах застосовують виключно трубчасті (циліндричні) корпуси, які дозволяють збільшити коефіцієнт заповнення і запобігають зворотному зсипанню матеріалу.

Вал шнека спирається на кінцеві та проміжні (підвісні) підшипникові опори. У транспортерах довжиною понад 3–4 метри встановлення проміжних опор є обов'язковим для запобігання прогину вала. Однак підвісні опори створюють "мертві зони" у потоці матеріалу, зменшують корисний переріз жолоба та є найбільш вразливими вузлами через постійний контакт з

абразивним середовищем. Зношення або блокування цих опор призводить до різкого стрибка струму в колі живлення електродвигуна.

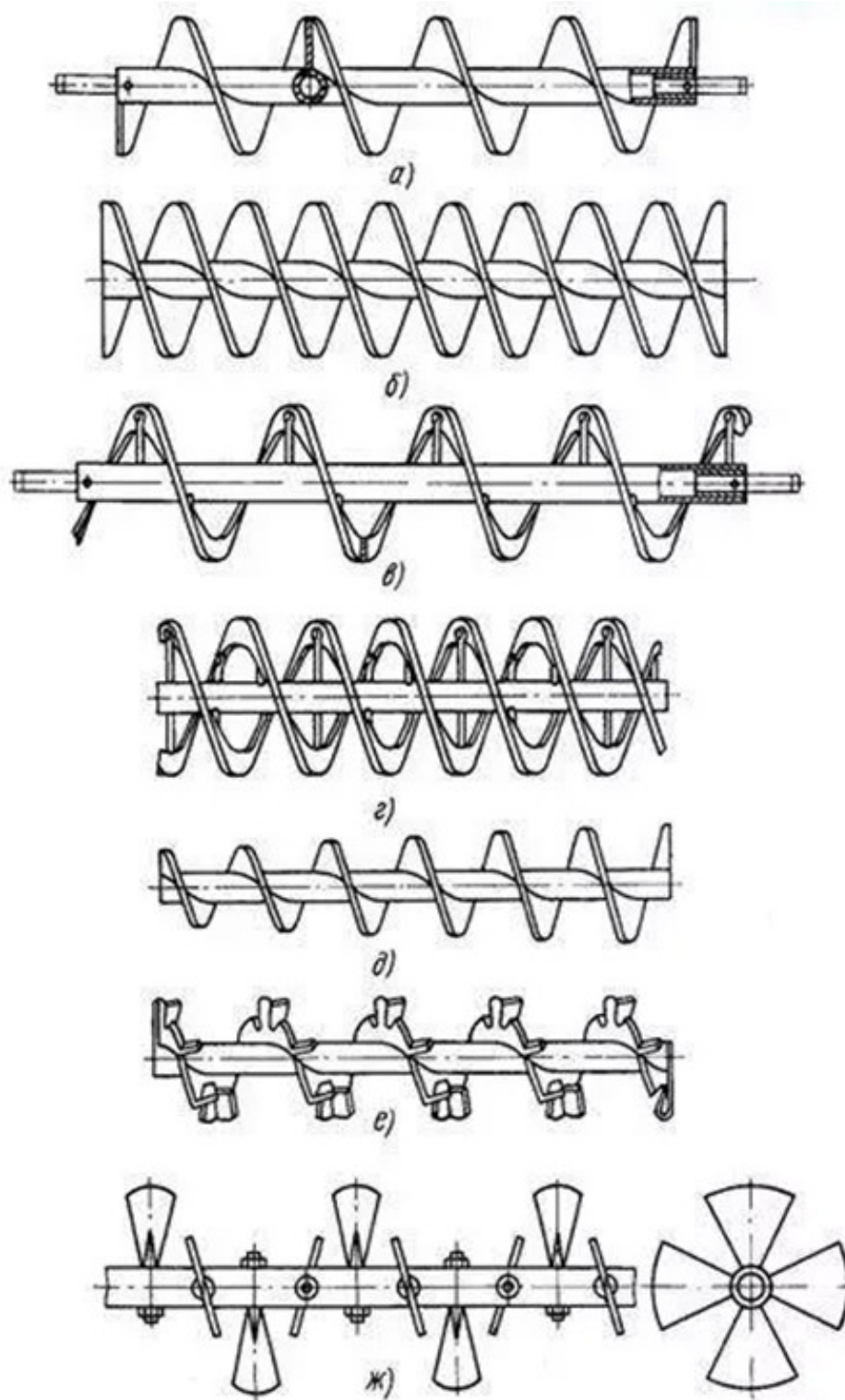


Рис. 1.2 Основні конструктивні типи шнекових гвинтів:

а — суцільний однозахідний (класичний варіант для сипучих матеріалів);

б – суцільний двозахідний (забезпечує більш рівномірну подачу вантажу);

в – стрічковий однозахідний (для в'язких та вологих матеріалів);

г – стрічковий двозахідний;

д – гвинт зі змінним діаметром (використовується для пресування або дозованої подачі);

е – фасонний або переривчастий (для інтенсивного перемішування);

ж – лопатевий (використовується, коли необхідно поєднувати транспортування з якісним змішуванням компонентів).

Приводний механізм транспортера зазвичай складається з асинхронного електродвигуна змінного струму та понижуючого редуктора. Незважаючи на численні переваги, шнекові транспортери мають суттєві недоліки: високу питому витрату електроенергії (через значне тертя матеріалу), інтенсивне зношення робочих поверхонь гвинта та жолоба, а також часткове подрібнення (псування) самого вантажу в процесі транспортування. Для мінімізації цих недоліків, зниження енергоспоживання та оптимізації режимів роботи в сучасних лініях електродвигуни все частіше оснащуються частотними перетворювачами, керованими мікропроцесорними системами верхнього рівня [6].

1.2 Огляд існуючих систем керування та їхні недоліки

Ефективність, довговічність та безпека роботи шнекових транспортерів безпосередньо залежать від обраної системи керування електроприводом. Історично системи автоматизації транспортування сипучих матеріалів еволюціонували від найпростіших ручних механізмів до складних мікропроцесорних комплексів. Однак на багатьох вітчизняних підприємствах (особливо в агропромисловому секторі та на невеликих виробництвах) досі

масово експлуатуються застарілі рішення, які не відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

Основним і найбільш розповсюдженим типом керування на старих або бюджетних лініях залишається релейно-контакторна система управління (рис. 1.3). Її архітектура базується на використанні магнітних пускачів, теплових реле захисту від перевантаження, проміжних реле та кнопкових постів.

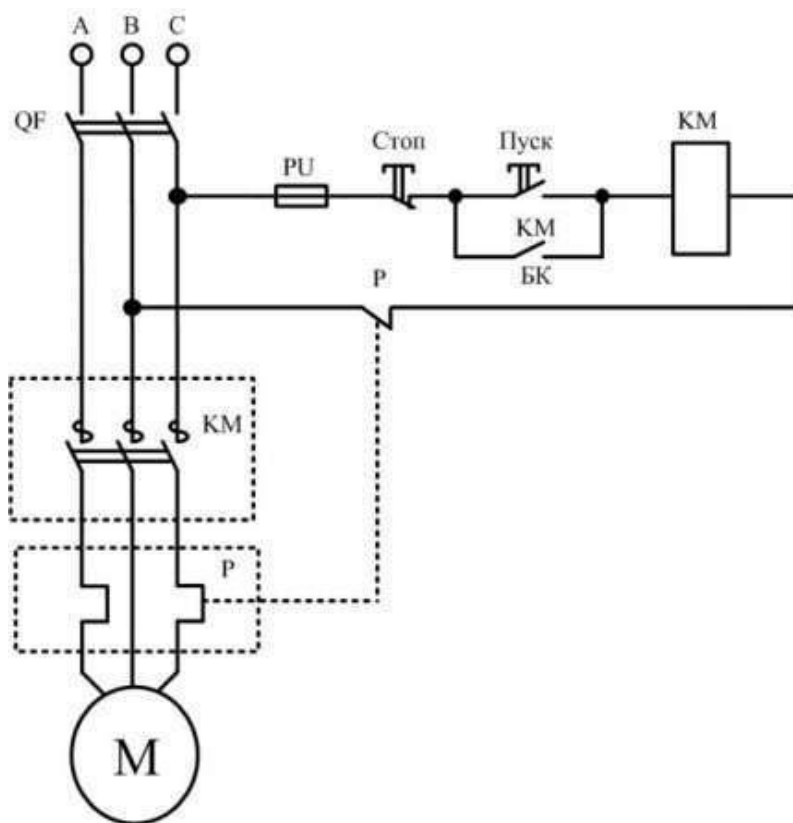


Рис. 1.3 Типова релейно-контакторна схема керування шнековим транспортером:

А, В, С — вводи трифазної мережі живлення;

QF — триполюсний автоматичний вимикач для захисту від струмів короткого замикання;

КМ — електромагнітний контактор (силові контакти та котушка керування);

Р — теплове реле захисту двигуна від тривалого струмового перевантаження;

М — асинхронний електродвигун привода шнека;

РУ — плавкий запобіжник у колі керування;

Стоп / Пуск — кнопки ручного керування запуском та зупинкою транспортера.

Головною і, мабуть, єдиною суттєвою перевагою таких систем є їхня низька початкова вартість, максимальна простота обслуговування електротехнічним персоналом базової кваліфікації та висока стійкість до електромагнітних перешкод. Проте недоліки релейно-контакторних систем у сучасних умовах експлуатації є критичними:

1. Відсутність плавного пуску. Запуск асинхронного двигуна відбувається шляхом прямого підключення до мережі (Direct-On-Line, DOL). При цьому виникають пускові струми, які перевищують номінальні робочі значення у 5–7 разів. Це не лише спричиняє просадки напруги в локальній електромережі підприємства, але й призводить до прискореного термічного старіння ізоляції обмоток статора двигуна.

2. Високі динамічні навантаження (механічні удари). Прямий пуск супроводжується різким наростанням електромагнітного моменту, що спричиняє сильний ривок вала шнека. Якщо жолоб транспортера заповнений матеріалом, виникає колосальне механічне перевантаження на зубчастій передачі редуктора, підшипникові вузли та зварні шви лопатей гвинта. Це є основною причиною передчасного виходу з ладу механічної частини конвеєра.

3. Неможливість регулювання продуктивності. Двигун працює з постійною (номінальною) частотою обертання. Це унеможливорює гнучку адаптацію продуктивності транспортера під змінні потреби технологічної

лінії, що призводить до перевитрат електроенергії у режимах неповного завантаження.

4. Відсутність інформативності та комунікаційних можливостей. Релейно-контакторні системи є "сліпими". Вони не здатні передавати телеметричні дані (фактичний струм, рівень завантаження, температуру підшипників) на центральний диспетчерський пункт, що унеможливило впровадження сучасних систем диспетчеризації (SCADA) та концепцій Інтернету речей (IoT).

Наступним, більш сучасним щаблем еволюції є застосування промислових програмованих логічних контролерів (ПЛК) у поєднанні з частотними перетворювачами (ПЧ) (рис. 1.4).

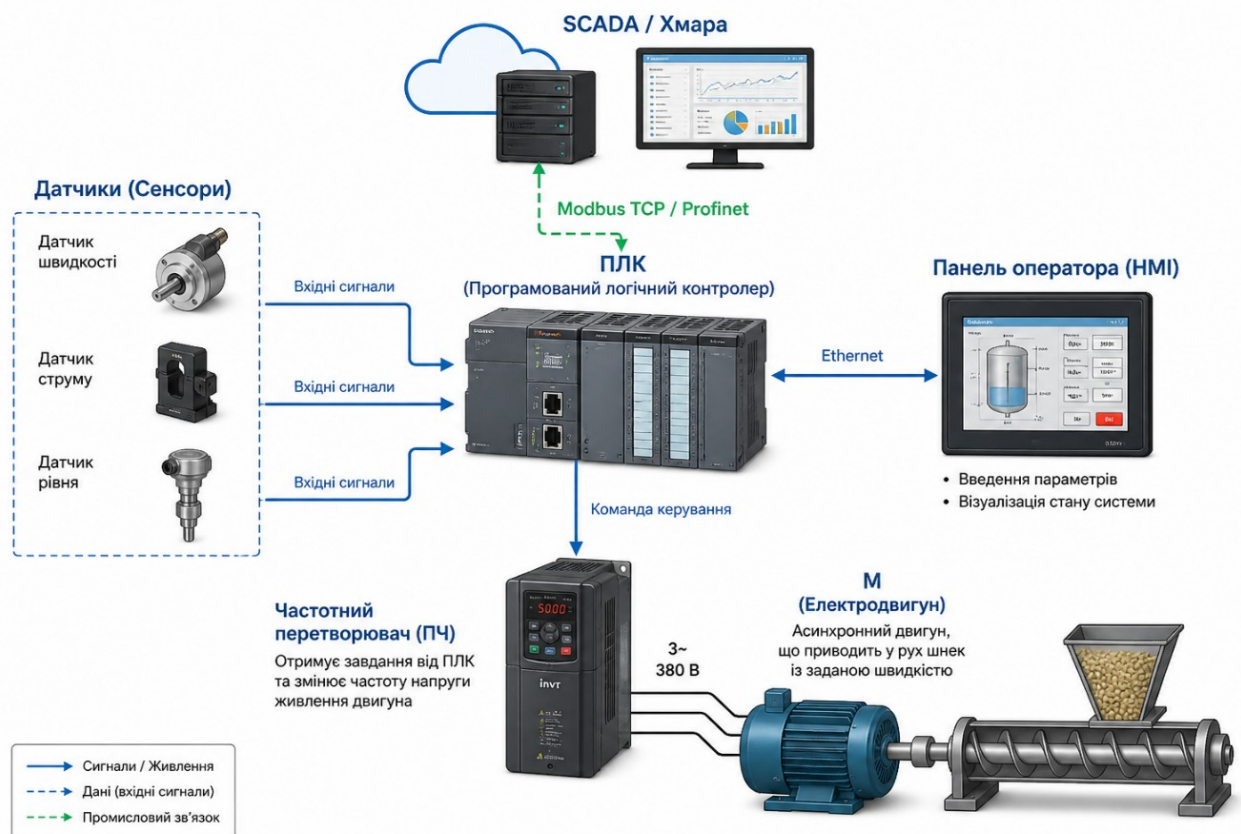


Рис. 1.4 Структурна схема керування на базі промислового ПЛК та частотного перетворювача:

- Датчики (Сенсори) — пристрої зворотного зв'язку (датчики швидкості, струму, рівня заповнення), що передають інформацію про стан об'єкта на входи ПЛК;
- ПЛК (Програмований логічний контролер) — центральний інтелектуальний вузол, який обробляє сигнали від датчиків та згідно з алгоритмом формує команди керування;
- Панель оператора (НМІ) — інтерфейс для введення параметрів та візуалізації стану системи;
- Частотний перетворювач (ПЧ) — виконавчий пристрій, який отримує завдання від ПЛК і змінює частоту напруги живлення двигуна для регулювання швидкості;
- М (Електродвигун) — асинхронний двигун, що приводить у рух шнек із заданою швидкістю;
- SCADA / Хмара — верхній рівень керування, куди ПЛК передає дані через промислові протоколи зв'язку.

Впровадження частотного перетворювача кардинально вирішує проблеми механічної частини: він забезпечує плавний розгін та гальмування двигуна (Soft Start/Stop), обмежуючи пускові струми та усуваючи механічні удари [7]. Крім того, з'являється можливість плавного регулювання швидкості обертання шнека (а отже, і продуктивності) шляхом зміни частоти напруги живлення. ПЛК (наприклад, рішень від Siemens, Schneider Electric, Allen-Bradley) збирає сигнали з датчиків, керує частотним перетворювачем за заданим алгоритмом і здатен інтегруватися в загальнозаводську мережу через промислові протоколи (Modbus RTU, Profibus, Profinet) [8].

Незважаючи на високу надійність та розширений функціонал, класичні ПЛК-системи також мають вагомі недоліки в контексті локальної (точкової) автоматизації окремих механізмів:

1. Висока капітальна вартість. Використання промислового ПЛК відомих брендів виключно для керування одним або двома транспортерами є економічно невиправданим кроком через високу вартість базового модуля контролера, модулів розширення вводу/виводу та ліцензійного програмного забезпечення.

2. Складність і вартість прокладання кабельних ліній. Більшість класичних ПЛК використовують дротові інтерфейси передачі даних (RS-485, Industrial Ethernet). На великих промислових об'єктах або агрокомплексах (елеваторах) прокладання сотень метрів екранованого інформаційного кабелю від кожного локального транспортера до центральної операторської кімнати часто коштує значно дорожче за саме обладнання керування.

3. Закриті екосистеми та складність модернізації. Розробка програмного забезпечення для промислових ПЛК вимагає залучення вузькопрофільних інженерів-програмістів АСУ ТП, що здорожує пусконаладжувальні роботи.

Вирішенням комплексу вищезазначених проблем є впровадження інноваційних систем керування на базі доступних і високопродуктивних IoT-мікроконтролерів. Використання платформ типу ESP32 дозволяє створити гібридну систему: зберегти надійність силового керування через частотний перетворювач і водночас реалізувати гнучкий, економічно вигідний вузол збору даних із вбудованими модулями бездротового зв'язку (Wi-Fi/Bluetooth). Це дозволяє відмовитися від дорогих кабельних трас та легко інтегрувати шнековий транспортер у хмарні системи моніторингу або локальні веб-інтерфейси підприємства [9].

1.3 Аналіз можливостей мікроконтролера ESP32 для промислової автоматизації

Стрімкий розвиток концепції Інтернету речей (IoT) та перехід до стандартів Індустрії 4.0 призвели до появи нового класу обчислювальних пристроїв — високопродуктивних мікроконтролерів (SoC — System on a Chip) із вбудованими модулями бездротового зв'язку. Одним із найуспішніших та найбільш перспективних рішень у цьому сегменті є мікроконтролер ESP32, розроблений компанією Espressif Systems. Завдяки унікальному поєднанню низької вартості, високої обчислювальної потужності та багатого набору периферійних інтерфейсів, ESP32 сьогодні розглядається як повноцінна та економічно вигідна альтернатива класичним програмованим логічним контролерам (ПЛК) для автоматизації локальних технологічних вузлів, зокрема шнекових транспортерів [10].

Основою обчислювальної потужності модуля ESP32 є двоядерний 32-бітний мікропроцесор Xtensa Dual-Core 32-bit LX6. Процесор здатний працювати на тактовій частоті від 80 до 240 МГц і забезпечує загальну продуктивність до 600 MIPS (мільйонів інструкцій за секунду) [10]. Для промислових систем автоматизації наявність саме двох незалежних обчислювальних ядер є критичною апаратною перевагою. Завдяки підтримці операційної системи реального часу (найчастіше використовується FreeRTOS, яка апаратно підтримується архітектурою ESP-IDF), розробник має змогу чітко розділити апаратні та програмні задачі між ядрами, уникаючи конфліктів та затримок:

- Core 0 (Протокольне або мережеве ядро): традиційно виділяється для обслуговування стека бездротових мереж (Wi-Fi, Bluetooth), підтримки роботи локального веб-сервера та обробки пакетів даних за протоколом MQTT [11]. Мережеві процеси є асинхронними і вимагають значних ресурсів процесора, проте вони не повинні впливати на безпеку механізмів.

– Core 1 (Технологічне ядро): повністю присвячується безперервному опитуванню промислових датчиків (наприклад, датчиків струму, швидкості обертання вала, рівня заповнення бункера), виконанню математичних алгоритмів (ПД-регулювання, алгоритми плавного пуску) та генерації керуючих сигналів для частотного перетворювача.

Такий суворий поділ гарантує, що будь-які можливі затримки в мережі Wi-Fi або довготривала генерація веб-сторінки ніяк не вплинуть на швидкість реакції системи. У разі критичного перевантаження або заклинювання шнека, технологічне ядро миттєво згенерує команду на аварійну зупинку приводу.

Окрім потужного процесора, критично важливим аспектом для побудови системи керування є наявність широкого спектра апаратних інтерфейсів. На рис. 1.5 наведена структурна схема архітектури мікроконтролера ESP32, де відображено взаємодію обчислювального ядра з вбудованими модулями пам'яті, бездротовими трансиверами та багатфункціональними периферійними блоками (GPIO, ADC, PWM).

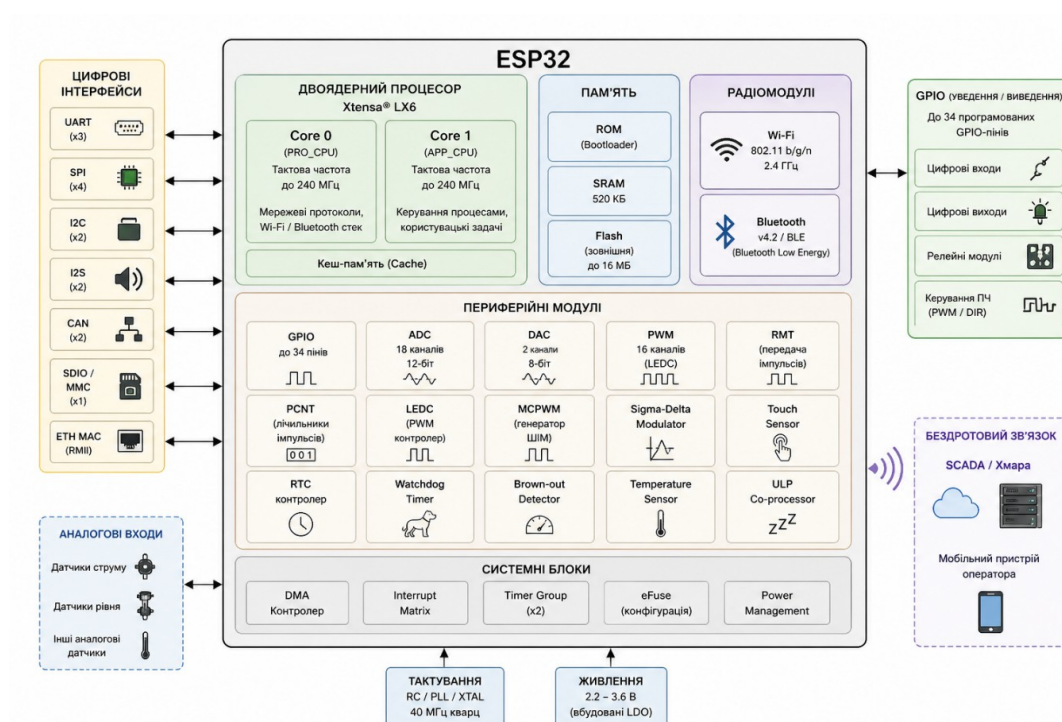


Рис. 1.5 Структурна схема архітектури мікроконтролера ESP32 та його периферійних модулів:

- Двоядерний процесор Xtensa® LX6: основний обчислювальний центр, де Core 0 (PRO_CPU) зазвичай виділяється під роботу з мережевими стеками (Wi-Fi/Bluetooth), а Core 1 (APP_CPU) — для виконання алгоритмів керування та користувацьких завдань.

- Пам'ять: містить блоки ROM для завантажувача, SRAM для оперативних даних та зовнішню Flash-пам'ять (до 16 МБ) для зберігання коду програми та файлової системи.

- Радіомодулі: вбудований трансивер для підтримки стандартів Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth v4.2 / BLE, що забезпечує бездротову передачу телеметрії.

- Цифрові інтерфейси: розширений набір протоколів (UART, SPI, I2C, I2S, CAN, Ethernet MAC) для зв'язку з периферією та промисловим обладнанням.

- Периферійні модулі: включають 12-бітний АЦП (ADC) для зчитування аналогових датчиків струму та рівня, ЦАП (DAC), канали PWM (для керування частотним перетворювачем), а також сенсорні та температурні датчики.

- Системні блоки: контролер DMA для швидкого обміну даними, таймери та система керування живленням (Power Management).

Важливою складовою є пам'ять пристрою. Мікроконтролер має 520 КБ внутрішньої статичної оперативної пам'яті (SRAM) та зазвичай оснащується зовнішньою Flash-пам'яттю об'ємом від 4 до 16 МБ (наприклад, у популярному модулі ESP-WROOM-32). Цього обсягу цілком достатньо для зберігання не лише скомпільованого коду складної програми керування, але й для розміщення файлової системи (SPIFFS або LittleFS), у якій зберігаються HTML-сторінки, каскадні таблиці стилів (CSS) та JavaScript-скрипти для повноцінного локального веб-інтерфейсу.

Бездротові комунікаційні можливості ESP32 представлені вбудованими радіомодулями Wi-Fi (стандарт 802.11 b/g/n, діапазон 2.4 ГГц) та Bluetooth (підтримка як класичного Bluetooth v4.2 BR/EDR, так і Bluetooth Low Energy — BLE) [10].

- Інтерфейс Wi-Fi дозволяє підключити модуль керування шнеком безпосередньо до загальнозаводської бездротової мережі, перетворивши транспортер на "розумний" IoT-вузол. Це дає можливість віддалено керувати механізмом з диспетчерської та інтегрувати його у SCADA-системи.

- Інтерфейс Bluetooth (BLE) може бути ефективно використаний для зручного локального конфігурування системи. Наприклад, сервісний інженер або оператор, перебуваючи безпосередньо біля конвеєра, може за допомогою планшета або смартфона виконати калібрування датчиків, зчитати коди помилок або налаштувати параметри підключення до локальної мережі Wi-Fi, не відкриваючи силовий щит керування.

Для безпосередньої взаємодії з апаратною частиною керування електроприводом ESP32 має багату і гнучку периферію. Доступно до 34 контактів вводу/виводу загального призначення (GPIO). Мікроконтролер оснащений двома багатоканальними 12-бітними аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП), які використовуються для точного зчитування аналогових сигналів (наприклад, рівня струму від датчиків Холла). Також наявні два 8-бітних цифрово-аналогових перетворювачі (ЦАП) та потужний апаратний генератор широтно-імпульсної модуляції (MCPWM — Motor Control PWM), який ідеально підходить для формування аналогового сигналу завдання швидкості (зазвичай стандарту 0–10 В або 4–20 мА після відповідного перетворення) для частотного перетворювача двигуна шнека. Для підключення цифрових датчиків та дисплеїв передбачена апаратна підтримка популярних промислових інтерфейсів I2C, SPI та UART [12].

Незважаючи на потужні характеристики, застосування мікроконтролера ESP32 у жорстких промислових умовах має певні обмеження, які будуть враховувані на етапі проєктування апаратної частини:

1. **Рівні логічних напруг.** Внутрішня логіка мікроконтролера працює від напруги 3.3 В, тоді як абсолютна більшість промислових датчиків, кнопок керування, реле та входів частотних перетворювачів оперують стандартом 24 В постійного струму. Пряме підключення таких пристроїв до портів ESP32 миттєво виведе його з ладу [10].

2. **Електромагнітна сумісність.** Робота потужних асинхронних двигунів, частотних перетворювачів та контакторів створює значні електромагнітні завади [13].

Вирішенням цих проблем є проєктування спеціалізованої крос-плати, яка повинна забезпечувати надійну гальванічну розв'язку (на базі оптопар або цифрових ізоляторів) усіх вхідних та вихідних сигналів мікроконтролера від промислової периферії, а також містити стабільне джерело живлення із захистом від перенапруг. Детальний розрахунок та проєктування таких схем узгодження є одним із головних завдань розробки апаратної частини системи керування.

Висновки за розділом

У першому розділі було проведено комплексне дослідження технологічних процесів транспортування сипучих матеріалів та аналіз сучасного стану систем керування шнековими транспортерами. Встановлено, що гвинтові конвеєри є незамінним елементом сучасних виробничих ліній завдяки їхній компактності та можливості повної герметизації процесу. Проте ефективність їхньої роботи критично залежить від точності дотримання швидкісних режимів та контролю рівня заповнення жолоба, оскільки

порушення цих параметрів призводить до заклинювання механізмів та аварійних зупинок.

Аналіз існуючих систем керування показав, що традиційні релейно-контакторні схеми є морально застарілими, оскільки не забезпечують плавного пуску двигуна, що спричиняє значні пускові струми та руйнівні динамічні навантаження на механічну частину. Водночас класичні рішення на базі промислових ПЛК, хоча й вирішують проблеми регулювання, мають високу капітальну вартість та складність у побудові розгалужених мереж моніторингу на великих об'єктах.

Обґрунтовано доцільність використання мікроконтролера ESP32 як інноваційної та економічно вигідної альтернативи промисловим ПЛК для автоматизації локальних вузлів. Завдяки двоядерній архітектурі Xtensa LX6 з'являється можливість апаратно розділити критичні задачі керування приводом від мережевих процесів передачі даних, що гарантує високу надійність та швидкість реакції системи на аварійні ситуації. Вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth дозволяють інтегрувати транспортер у концепцію Індустрії 4.0 без значних витрат на кабельну інфраструктуру.

Водночас виявлено необхідність проектування спеціалізованих схем узгодження через різницю логічних рівнів мікроконтролера та промислового обладнання, а також потребу у надійній гальванічній розв'язці для стабільної роботи в умовах сильних електромагнітних завад. Результати проведеного аналізу стали фундаментом для подальшої розробки апаратної частини системи керування, яка розглядається у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1. Розробка структурно-функціональної схеми автоматизації

Структурно-функціональна схема автоматизації є основним технічним документом, що визначає структуру та функціональні зв'язки між об'єктом керування, вимірювальними приладами та контролером [14]. На основі аналізу технологічного процесу, проведеного в першому розділі, розроблена схема, що передбачає трирівневу структуру моніторингу та керування (рис. 2.1).

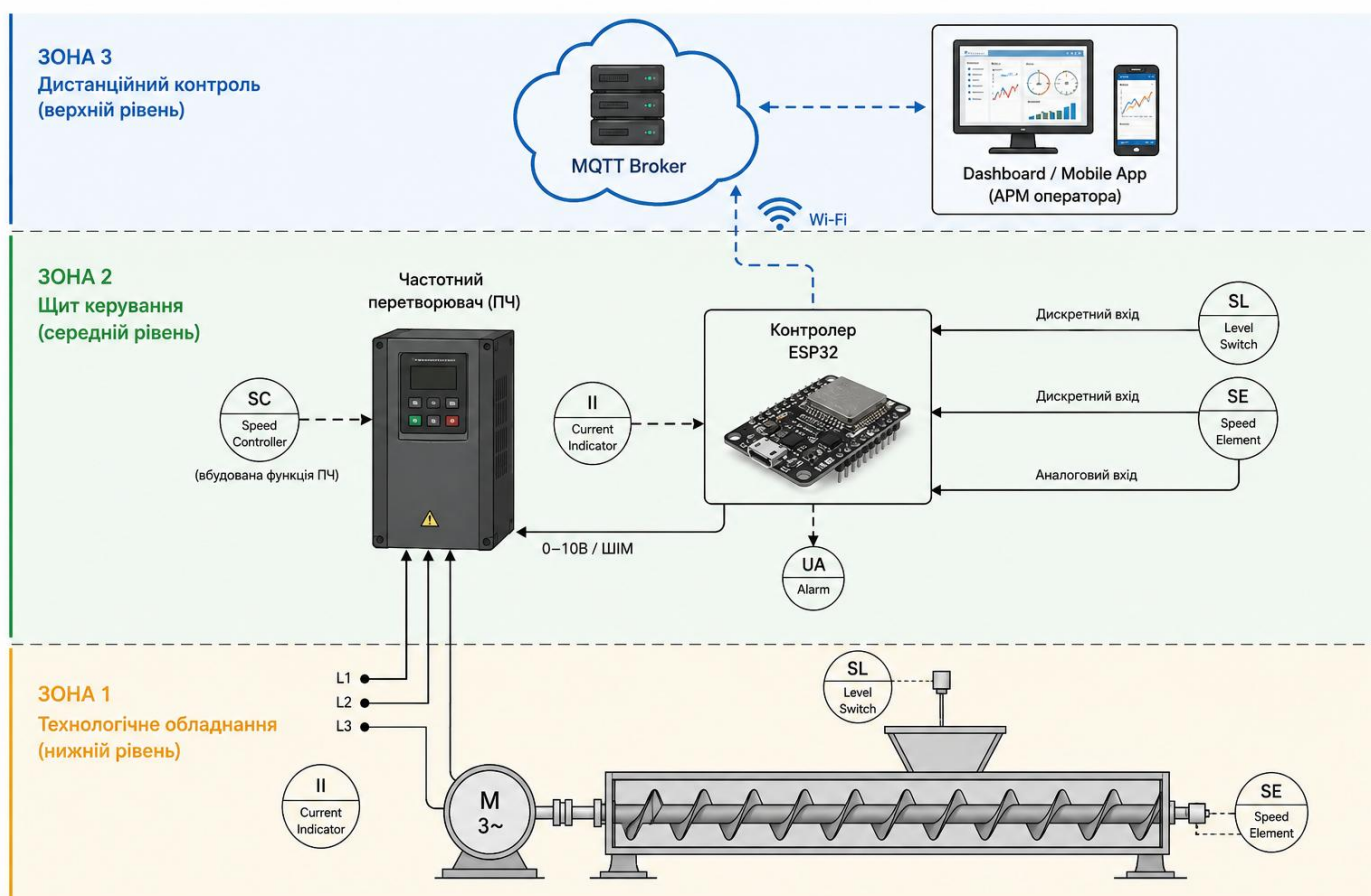


Рис.2.1 Структурно-функціональна схема автоматизації модернізованої системи керування шнековим транспортером

Центральний елемент керування системою автоматизації шнекового транспортера представлений мікроконтролером ESP32. Він забезпечує можливість бездротового підключення до мережі підприємства через Wi-Fi за протоколом MQTT, що дозволяє інтегрувати локальний вузол у загальну систему диспетчеризації цеху. Контролер координує роботу всіх підсистем: зчитує стан датчиків рівня та швидкості через цифрові порти, обробляє аналоговий сигнал від вузла контролю струму та формує керуючі команди для частотного перетворювача (ПЧ) [15].

Для керування виконавчим механізмом використовується частотний перетворювач, підключений до контролера через модуль узгодження сигналів. ESP32 генерує сигнал завдання швидкості (через ШІМ або ЦАП), який ПЧ перетворює у силову напругу змінної частоти для обмоток асинхронного електродвигуна. Це забезпечує плавне регулювання продуктивності шнека та захист механічних вузлів від пускових ударів.

Збір даних про стан заповнення бункера реалізований за допомогою датчика рівня (SL), підключеного до шини GPIO. Сигнал від датчика дозволяє контролеру вчасно зупинити подачу матеріалу, запобігаючи переповненню та заклинюванню гвинта. Контроль фактичної швидкості обертання вала здійснюється датчиком швидкості (SE). Обробка імпульсів від цього датчика через переривання мікроконтролера дозволяє системі миттєво реагувати на обрив приводних пасів або механічну поломку, ініціюючи аварійну зупинку.

Безпека експлуатації та захист двигуна від перевантажень реалізовані через моніторинг споживаного струму (II). Аналоговий сигнал, пропорційний навантаженню на валу, подається на вхід АЦП (ADC) мікроконтролера ESP32. У разі виявлення аномального зростання струму, що свідчить про потрапляння стороннього предмета у жолоб шнека, контролер активує блок аварійної сигналізації (Alarm) та блокує роботу частотного перетворювача.

Система орієнтована на дистанційне керування через хмарний сервер. Завдяки передачі даних у форматі JSON на MQTT-брокер, оператор має можливість не лише спостерігати за статистикою роботи (енергоспоживання, години напрацювання), а й віддалено коригувати швидкість транспортування відповідно до поточних потреб цеху рекуперації.

2.2. Розрахунок та вибір приводного електродвигуна

Вибір електродвигуна для шнекового транспортера системи рекуперації базується на розрахунку необхідної потужності для переміщення заданого об'єму сипучого матеріалу з урахуванням втрат на тертя в опорах та опору переміщенню матеріалу вздовж жолоба [16].

2.2.1. Розрахунок необхідної потужності електропривода

Метою даного розрахунку є визначення оптимальної потужності асинхронного двигуна, який забезпечить стабільне транспортування зернових культур без перевантаження при пускових режимах. Розрахунок проводиться для горизонтального шнекового транспортера за методикою визначення енергетичних витрат на переміщення маси та подолання внутрішнього тертя механізму.

Вихідні дані для проєктування

Для обґрунтування вибору електрообладнання та забезпечення виробничих потреб цеху за основу прийнято технічні характеристики процесу транспортування зерна пшениці, яке за своїми фізико-механічними властивостями є дрібнодисперсним сипучим матеріалом. Розрахунок базується на необхідній продуктивності транспортера Q , що становить 20 т/год, при робочій довжині горизонтальної ділянки переміщення $L = 10$ м.

Враховуючи специфіку вантажу, його насипна щільність ρ приймається на рівні $0,75 \text{ т/м}^3$, а питомий коефіцієнт опору переміщенню ω_0 , характерний для зернових культур, складає 1,2. Окрім цього, згідно з технічними рекомендаціями щодо експлуатації шнекових механізмів у аграрному секторі, де оптимальний діапазон наповнення становить $0,3 \dots 0,4$, коефіцієнт заповнення жолоба φ для даного проєкту встановлено на рівні 0,33 [16].

Визначення основних геометричних параметрів шнека

Для перевірки можливості пропускання заданої кількості зерна визначимо необхідний діаметр гвинта (D):

$$D = \sqrt{\frac{Q}{47 \cdot \rho \cdot \psi \cdot k_v \cdot S}} \quad (2.1)$$

де S — крок гвинта (приймаємо $S = 0,8 \cdot D$), k_v — коефіцієнт зниження продуктивності при нахилі (для горизонтального шнека $k_v = 1,0$). Після підстановки стандартних значень для заданої продуктивності, обираємо стандартний діаметр шнека $D = 250 \text{ мм}$ (0,25 м).

Розрахунок потужності на валу шнека

Загальна потужність на валу шнека ($P_{\text{вал}}$) складається з трьох компонентів: потужності на переміщення вантажу, потужності на підйом (у нашому випадку дорівнює нулю) та потужності на подолання тертя в підшипникових вузлах.

Потужність на горизонтальне переміщення вантажу (P_{hor}):

$$P_{\text{hor}} = \frac{Q \cdot L \cdot \omega_0}{367} = \frac{20 \cdot 10 \cdot 1,2}{367} \approx 0,65 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

Потужність на подолання тертя у підшипниках та внутрішнього тертя гвинта ($P_{\text{тер}}$): для врахування маси самого гвинта та опору в опорах використовується емпірична залежність від діаметра та довжини:

$$P_{fric} = \frac{D \cdot L}{20} = \frac{0,25 \cdot 10}{20} = 0,125 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Загальна споживана потужність на валу:

$$P_{\Sigma} = P_{hor} + P_{fric} = 0,65 + 0,125 = 0,775 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

Визначення необхідної номінальної потужності двигуна

Для остаточного вибору двигуна необхідно врахувати втрати в редукторі (ККД передачі) та забезпечити запас потужності для надійного пуску системи, коли жолоб може бути заповнений зерном [17].

Потужність двигуна ($P_{дв}$) визначається за формулою:

$$P_{дв} = \frac{P_{\Sigma}}{\eta_{ред}} \cdot k_z \quad (2.5)$$

де:

- $\eta_{ред}$ — коефіцієнт корисної дії редуктора. Приймаємо для циліндричного двоступеневого редуктора $\eta_{ред} = 0,9$.
- k_z — коефіцієнт запасу. Для зернових шнеків довжиною понад 5 м рекомендується $k_z = 1,2 \dots 1,25$. Приймаємо $k_z = 1,2$.

$$P_{дв} = \frac{0,775}{0,9} \cdot 1,2 \approx 1,03 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

Отримане розрахункове значення 1,03 кВт вказує на те, що найближчий стандартний двигун потужністю 1,1 кВт буде працювати на межі своїх можливостей без достатнього запасу для пікових навантажень. Враховуючи специфіку роботи з зерном (можлива підвищена вологість, що збільшує опір), доцільно обрати електродвигун наступного номіналу в ряду потужностей.

2.2.2. Обґрунтування вибору та технічні характеристики електродвигуна

На основі розрахунків, проведених у підрозділі 2.2.1, було встановлено, що для забезпечення заданої продуктивності шнекового транспортера (20 т/год) необхідна потужність на валу двигуна становить приблизно 1,03 кВт. При виборі конкретної моделі електропривода враховувалися такі критичні фактори:

1. Запас потужності: Оскільки зернові культури можуть мати підвищену вологість або містити домішки, що збільшує опір переміщенню, обрано двигун із номінальною потужністю 1,5 кВт. Це забезпечує необхідний експлуатаційний запас (близько 45%), що гарантує надійний пуск заповненого шнека та стабільну роботу системи при пікових навантаженнях.

2. Частота обертання: Обрано чотириполюсний двигун із частотою 1500 об/хв. Така швидкість є стандартною для промислових приводів і дозволяє ефективно використовувати частотний перетворювач для точного регулювання обертів у діапазоні 0...50 Гц без критичного зниження крутного моменту [17].

3. Експлуатаційні умови: Робота в цеху рекуперації пов'язана з підвищеним рівнем запиленості. Обрана модель має ступінь захисту IP54/IP55, що унеможливорює потрапляння пилу всередину корпусу та захищає обмотки статора.

Для реалізації проєкту обрано трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором серії АИР 80 В4 який зображений на рисунку 2.2. Дана серія є широко розповсюдженою, має високу ремонтпридатність та відповідає державним стандартам якості. Технічні характеристики обраного двигуна наведені в таблиці 2.1 [18].



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд електродвигуна АІР 80 В4

Таблиця 2.1 Технічні характеристики двигуна

Параметр	Значення
Марка	АІР 80 В4
Потужність	1,5 кВт
Синхронна частота обертання	1500 об/хв
Номінальний струм (I_n)	3,7 А
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	78,5 %
Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$)	0,79
Ступінь захисту	ІР54

Вибір саме цієї моделі дозволяє в наступних етапах проектування точно підібрати частотний перетворювач, орієнтуючись на номінальний струм двигуна (3,7 А).

2.3 Вибір силового обладнання та засобів вимірювання

Після визначення параметрів приводного електродвигуна ключовим етапом проєктування є підбір комплексу обладнання, що забезпечить його енергоефективну роботу та інтеграцію в єдину цифрову мережу керування. Вибір компонентів силової частини базується на необхідності переходу від прямого пуску до регульованого електропривода. Це дозволяє не лише узгодити швидкість транспортування зерна з потребами технологічної лінії, а й суттєво зменшити динамічні навантаження на механічні вузли шнека. Головним критерієм при виборі є здатність обладнання витримувати тривалі навантаження в умовах промислового середовища та наявність інтерфейсів для зв'язку з мікроконтролером.

Окрім силового регулювання, важливу роль відіграє створення системи зворотного зв'язку. Засоби вимірювання та контролю в даному проєкті розглядаються як джерела первинної інформації для мікроконтролера ESP32. Їхня доцільність обумовлена необхідністю реалізації превентивної діагностики: моніторинг струму, швидкості та рівня заповнення дозволяє системі самостійно приймати рішення про зміну режиму роботи або аварійну зупинку. Такий комплексний підхід до вибору засобів автоматизації забезпечує високу живучість механізму та створює базу для віддаленого збору даних у форматі Індустрії 4.0.

2.3.1. Вибір та обґрунтування частотного перетворювача

Для забезпечення гнучкого керування продуктивністю шнекового транспортера, реалізації плавного пуску та надійного захисту електродвигуна в складі апаратної частини системи передбачено використання частотного перетворювача (ПЧ) [19].

З огляду на результати розрахунку потужності привода (1,5 кВт) та параметри обраного двигуна АИР 80 В4 (номінальний струм 3,7 А), до перетворювача частоти висуваються такі вимоги:

- Відповідність за потужністю: номінальна потужність ПЧ повинна бути не меншою за потужність двигуна ($P_{\text{ПЧ}} \geq 1,5 \text{ кВт}$).
- Запас за струмом: вихідний струм повинен забезпечувати роботу двигуна без перегріву ПЧ ($I_{\text{ПЧ}} \geq 3,7 \text{ А}$).
- Сумісність із ESP32: наявність аналогових та дискретних входів для прийому керуючих сигналів від мікроконтролера.
- Промисловий захист: наявність вбудованих фільтрів та захисту від короткого замикання, перевантаження та обриву фаз.

Для реалізації поставленої задачі обрано компактний промисловий перетворювач частоти серії VFD-EL від компанії Delta Electronics, модель VFD015EL43A представлений на рисунку 2.3 [20].

Даний перетворювач частоти є оптимальним рішенням для автоматизації невеликих об'єктів (вентиляторів, насосів, конвеєрів) завдяки своїм функціональним можливостям:

- Компактність: конструкція передбачає монтаж на DIN-рейку пліч-о-пліч, що економить місце в щиті керування.
- Вбудований ЕМІ-фільтр: критично важливий для роботи мікроконтролерних систем, оскільки мінімізує електромагнітні завади, які можуть впливати на стабільність роботи ESP32.
- Гнучкість керування: підтримка протоколу Modbus (через інтерфейс RS-485) та наявність аналогового входу дозволяють реалізувати як просте керування швидкістю через ШІМ-сигнал (PWM), так і повноцінну цифрову інтеграцію з ESP32.



Рис. 2.3. Частотний перетворювач Delta VFD015EL43A

Технічні характеристики Delta VFD015EL43A наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Технічні характеристики Delta VFD015EL43A

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Номінальна потужність двигуна	кВт	1,5
Напруга живлення	В	3-фази, 380...480
Номінальний вихідний струм	А	4,2
Вихідна частота	Гц	0,1 ... 600
Перевантажувальна здатність	%	150 (протягом 60 с)
Метод керування	-	Скалярне (V/f)
Аналоговий вхід	В	0 ... +10
Інтерфейс зв'язку	-	RS-485 (Modbus)
Ступінь захисту	-	IP20

Використання моделі VFD015EL43A з вихідним струмом 4,2 А забезпечує стабільну роботу двигуна зі струмом 3,7 А, створюючи необхідний технічний запас для компенсації коливань навантаження при транспортуванні зерна. ПЧ забезпечує не лише регулювання швидкості, а й повний електричний захист двигуна, що виключає необхідність встановлення додаткових теплових реле.

2.3.2. Обґрунтування та вибір датчиків контролю

Для забезпечення стабільної роботи автоматизованого шнекового транспортера та реалізації алгоритмів захисту, система повинна отримувати безперервний потік даних про стан технологічного процесу. Вибір засобів вимірювання здійснювався з урахуванням специфіки роботи з зерновими культурами: висока запиленість, можливість вібрацій та необхідність гальванічної розв'язки з контролером.

Сигналізатор рівня заповнення бункера (SL). Для запобігання переповненню завантажувального бункера та заклинюванню шнека обрано ротаційний датчик рівня серії SR-10, що зображений на рисунку 2.4.



Рис. 2.4 Ротаційний датчик рівня SR-10

Обґрунтування вибору ротаційного датчика серії SR-10 базується на його високій надійності при роботі з сипучими продуктами, зокрема зерновими культурами. На відміну від ультразвукових або ємнісних аналогів, цей тип сенсорів демонструє стабільність характеристик незалежно від концентрації зернового пилу, коливань вологості або змін діелектричної проникності матеріалу. Принцип дії пристрою полягає у механічній зупинці лопаті, що обертається зі швидкістю 1 об/хв, під час її контакту з зерном, що призводить до спрацювання вбудованого мікроперемикача [21].

З технічного погляду датчик оснащений релейним перекидним контактом типу SPDT, що дозволяє гнучко інтегрувати його в схеми автоматизації. Напруга живлення пристрою складає 24 В постійного струму (DC), що забезпечує повне узгодження з промисловим стандартом частотних перетворювачів та систем керування. Додатковою перевагою обраної моделі є високий ступінь захисту корпусу IP65, який гарантує повну герметичність та стабільну роботу в специфічних умовах цеху рекуперації, де спостерігається підвищена запиленість та вологість середовища.

Датчик швидкості обертання вала (SE). Для здійснення безперервного моніторингу фактичного обертання шнека та оперативного виявлення можливих аварійних ситуацій, таких як обрив приводних пасів, у системі передбачено використання індуктивного безконтактного датчика моделі **LJ12A3-4-Z/BX**. Зовнішній вигляд датчика представлений на рисунку 2.5. Обґрунтування вибору даного сенсора базується на його здатності працювати в агресивному промисловому середовищі протягом тривалого терміну завдяки безконтактному методу вимірювання. Датчик монтується безпосередньо на корпусі транспортера навпроти спеціального металевого виступу, закріпленого на валу шнека. Принцип роботи полягає у фіксації проходження металевого елемента через зону чутливості, що дозволяє мікроконтролеру ESP32 зчитувати частоту імпульсів. У випадку, коли двигун перебуває в увімкненому стані, а імпульси від вала не надходять,

інтелектуальна система автоматично фіксує аварію привода та ініціює захисний протокол [22].

Технічна реалізація даного вузла базується на використанні датчика з типом виходу NPN (нормально відкритий), що забезпечує чітке формування сигналів для вхідних ланцюгів системи керування. Дистанція спрацювання пристрою становить 4 мм, що є достатнім для надійної детекції без ризику механічного пошкодження сенсора рухомими частинами. Універсальність живлення датчика в широкому діапазоні від 6 до 36 В постійного струму дозволяє легко інтегрувати його в загальну промислову мережу напругою 24 В, а максимальний струм навантаження у 300 мА гарантує стабільну роботу комутаційних ланцюгів без ризику перегріву чи виходу пристрою з ладу.



Рис. 2.5 Індуктивний безконтактний датчик LJ12A3-4-Z/BX

Модуль контролю струму навантаження (II). Для реалізації функцій превентивного програмного захисту від механічного заклинювання гвинта та проведення детального аналізу енергоефективності привода, у системі передбачено використання спеціалізованого модуля на базі датчика Холла моделі **ACS712 (модифікація на 20А)**. Зовнішній вигляд якого представлений на рисунку 2.6. Обґрунтування застосування даного технічного рішення базується на здатності датчика забезпечувати повну гальванічну розв'язку між високовольтними силовими колами та чутливими

входами мікроконтролера ESP32. Модуль інтегрується безпосередньо в розрив однієї з фаз живлення електродвигуна після частотного перетворювача, перетворюючи значення протікаючого струму в пропорційний аналоговий сигнал напруги. Такий підхід дозволяє системі через вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП) контролера з високою точністю відстежувати навіть мінімальні флуктуації навантаження, що виникають при зміні щільності або вологості зернової маси в жолобі шнека.

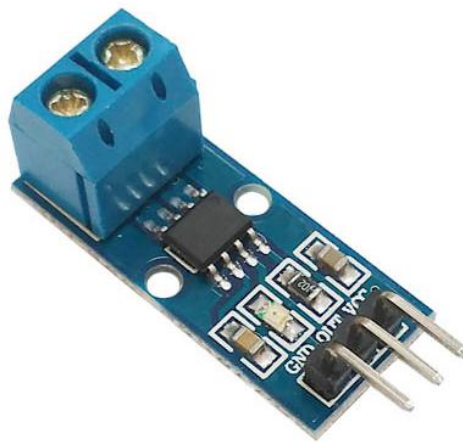


Рис. 2.6 Модуль датчика струму ACS712 (20A)

Технічний потенціал обраного модуля визначається широким робочим діапазоном вимірювання струму від -20 до +20 А, що повністю покриває номінальні та пікові струми обраного двигуна АІР 80 В4. Висока чутливість пристрою, яка становить 100 мВ на кожен Ампер вимірюваного струму, у поєднанні з низькою похибкою вимірювання, що не перевищує 1,5 %, гарантує високу достовірність даних для роботи алгоритмів захисної автоматики. Живлення модуля здійснюється від стабілізованого джерела напругою 5 В постійного струму, що забезпечує повну сумісність із загальною шиною живлення периферійних пристроїв контролера [23].

2.4. Проектування схеми узгодження рівнів напруги

Одним із найвідповідальніших етапів розробки апаратної частини є забезпечення електричної сумісності між мікроконтролером ESP32 та промисловим обладнанням. Оскільки внутрішня логіка ESP32 працює з напругою 3,3 В, а обрані датчики та частотний перетворювач оперують промисловим стандартом 24 В (або 5 В для модуля струму), пряме з'єднання цих компонентів призведе до миттєвого виходу мікроконтролера з ладу.

Для розв'язання цієї проблеми у проєкті передбачено використання схем узгодження, що базуються на принципах гальванічної розв'язки та подільників напруги.

Узгодження цифрових входів (датчики рівня та швидкості). Для підключення ротаційного датчика рівня та індуктивного датчика швидкості, які видають сигнал амплітудою 24 В, застосовуються оптопари (оптрони) серії PC817. Ввикористання опторозв'язки дозволяє повністю ізолювати чутливі порти ESP32 від силових кіл. При надходженні сигналу 24 В від датчика, світлодіод всередині оптопари засвічується, що призводить до відкриття фототранзистора, який замикає вхід контролера на «землю» (логічний нуль). Це не лише узгоджує рівні напруги, а й захищає систему від промислових електромагнітних завад, що виникають при роботі потужних двигунів.

Узгодження аналогового входу (датчик струму). Датчик струму ACS712 живиться від напруги 5 В і видає аналоговий сигнал у діапазоні 0–5 В. Максимальна допустима напруга на аналоговому вході (ADC) ESP32 становить 3,3 В. Для безпечного зчитування даних використовується **резистивний подільник напруги**. Розрахунок подільника проводиться таким чином, щоб при максимальному вихідному сигналі датчика (5 В) на вхід контролера надходило не більше 3,2 В. Це забезпечує необхідний лінійний діапазон вимірювання та захищає порт від перенапруги.

Формування керуючого сигналу для частотного перетворювача. Для керування швидкістю обертання через частотний перетворювач Delta VFD необхідно сформувати аналоговий сигнал напругою 0–10 В. Мікроконтролер ESP32 здатний генерувати лише ШІМ-сигнал (PWM) амплітудою 3,3 В.

Для перетворення використовується схема активного фільтра нижніх частот на базі операційного підсилювача (наприклад, **LM358**). Схема виконує дві функції:

1. Перетворює високочастотний ШІМ-сигнал у стабільну постійну напругу.
2. Підсилює рівень сигналу з 3,3 В до необхідних 10 В.

Розроблена система вузлів узгодження дозволяє створити надійний бар'єр між мікроконтролером та силовою частиною. Використання опторозв'язки для дискретних сигналів та активного підсилення для аналогового керування гарантує стабільну роботу ESP32 у жорстких умовах промислового цеху, виключаючи ризик пошкодження від перенапруг або імпульсних завад.

2.5. Розробка принципової електричної схеми пристрою

Завершальним етапом апаратного проєктування є розробка принципової електричної схеми, яка інтегрує всі обрані компоненти у єдину функціональну систему. Вона забезпечує фізичну реалізацію зв'язків між мікроконтролером ESP32, силовими агрегатами та засобами вимірювання, що були обґрунтовані у попередніх підрозділах. Розроблена схема (рис. 2.7) враховує необхідність гальванічної розв'язки та ступеневого зниження напруги для безпечного функціонування слабкострумової електроніки у промисловому середовищі.

Відповідно до представленої схеми, технічна реалізація пристрою розподілена на три основні функціональні вузли:

1. СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ (Постійний струм)

2. БЛОК ОБРОБКИ СИГНАЛІВ (ESP32 та датчики)

3. СИЛОВА ЧАСТИНА (Частотний перетворювач та двигун)

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

VFD – Частотний перетворювач
SL – Датчик рівня
SE – Датчик швидкості
AVI – Датчик струму
ACM – Аналоговий вхід напруги (0–10V)
FWD – Вперед (Run)
DCM – Загальний для цифрових входів

ПРИМІТКИ

- Усі живлення 0V / GND об'єднані.
- Слабоструктуровані лінії прокладають окремо від силових кабелів.
- Корпуси ПЧ, двигуна та щита з'єднані із PE.

Рис. 2.7. Принципова електрична схема системи керування шнековим транспортером

Система живлення мікроконтролера та периферійних модулів базується на дворівневій схемі зниження напруги, де імпульсний стабілізатор LM2596 забезпечує рівень +5 В DC для роботи датчика струму та операційного підсилювача, а лінійний регулятор AMS1117-3.3 формує стабільні +3,3 В DC безпосередньо для живлення ядра ESP32.

Блок обробки сигналів виконує функції збору телеметрії та формування команд керування із застосуванням вузлів захисту входів контролера. Сигнали від датчиків рівня та швидкості напругою +24 В проходять через оптопари PC817, що гарантує повну гальванічну ізоляцію та безпечну передачу логічних рівнів на порти GPIO19 і GPIO18. Моніторинг навантаження здійснюється модулем ACS712, чий аналоговий сигнал адаптується до рівнів ESP32 через резистивний подільник, що обмежує амплітуду до безпечних 3,2 В на вході АЦП. Керування частотним перетворювачем реалізовано шляхом перетворення ШІМ-сигналу в аналогову напругу 0–10 В через активний фільтр на базі LM358, тоді як команди пуску та зупинки передаються через додаткову оптопару за принципом «сухого контакту».

3. Силова частина (Частотний перетворювач та двигун). Цей блок забезпечує безпосереднє керування потужністю. Трифазна мережа 380 В AC подається через автоматичний вимикач QF1 (10A) на входні клеми ПЧ Delta VFD015EL43A. Вихідний силовий кабель з клем U, V, W з'єднується з електродвигуном АІР 80 В4. Датчик струму інтегровано у розрив фази U для контролю реального енергоспоживання.

Важливою особливістю схеми є спільне об'єднання всіх шин заземлення (0V / GND) та обов'язкове приєднання корпусів обладнання до шини PE для забезпечення електробезпеки та стабільності роботи бездротових інтерфейсів Wi-Fi у металевих щитах керування.

Висновки за розділом

У другому розділі було виконано комплексне проєктування апаратної частини автоматизованої системи керування шнековим транспортером, що дозволило створити технічну базу для реалізації поставлених завдань. Результатом роботи стала розробка структурно-функціональної схеми, яка визначає ієрархію взаємодії між мікроконтролером ESP32, інтелектуальними датчиками та виконавчим механізмом. Впровадження бездротового інтерфейсу на базі Wi-Fi забезпечило можливість інтеграції локального вузла керування у загальну систему диспетчеризації підприємства за протоколом MQTT.

На основі детального розрахунку продуктивності та геометричних параметрів шнека при транспортуванні зернових культур було обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна серії АИР 80 В4 потужністю 1,5 кВт. Такий вибір гарантує стабільну роботу системи з необхідним експлуатаційним запасом потужності. Для енергоефективного регулювання швидкості та забезпечення плавного пуску було підібрано частотний перетворювач Delta VFD015EL43A. Сформований комплекс засобів вимірювання, що включає датчики рівня, швидкості та струму, дозволив реалізувати три контури зворотного зв'язку для комплексного превентивного захисту обладнання.

Особливу увагу приділено проєктуванню вузлів узгодження сигналів, де використання опторозв'язки та активної фільтрації дозволило забезпечити електричну сумісність низьковольтного мікроконтролера з промисловим стандартом напруги 24 В. Фінальним етапом стала розробка принципової електричної схеми, яка враховує вимоги до багаторівневого живлення та заземлення компонентів. Проведене апаратне проєктування є фундаментом для подальшої розробки програмного забезпечення та алгоритмів керування, що розглядаються у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Алгоритм функціонування системи автоматизованого керування шнековим транспортером

Функціонування розробленої системи автоматизації базується на циклічному алгоритмі, який поєднує в собі процедури збору телеметрії, логічного аналізу стану об'єкта та формування керуючих впливів. Загальна структура програмного комплексу спроектована таким чином, щоб забезпечити максимальну надійність технологічного процесу та миттєву реакцію на аварійні ситуації. Робота алгоритму починається з етапу ініціалізації, під час якого мікроконтролер налаштовує режими роботи портів вводу-виводу, конфігурує канали широтно-імпульсної модуляції для керування частотним перетворювачем та встановлює параметри аналого-цифрового перетворення для датчика струму. Важливою частиною початкового етапу є також запуск мережевих служб та створення точки доступу або підключення до існуючої Wi-Fi мережі для роботи локального веб-інтерфейсу.

Після успішного завершення процедур ініціалізації система переходить у режим очікування команди на запуск. Основний цикл програми побудований за принципом паралельного виконання декількох ключових підпрограм. Перший функціональний блок відповідає за безперервне опитування датчиків, де результати зчитування аналогових даних від модуля ACS712 та дискретних сигналів від датчиків рівня та швидкості проходять через цифрову фільтрацію для виключення хибних спрацювань. Це дозволяє сформувати достовірну картину стану шнека в кожен момент часу. Другий блок реалізує логіку керування приводом, включаючи підпрограму плавного

пуску, яка за заданою лінійною залежністю нарощує напругу на вході частотного перетворювача до досягнення цільової швидкості обертання.

Ключовим елементом загального алгоритму є підпрограма превентивного захисту та обробки переривань. Цей вузол працює у пріоритетному режимі та постійно порівнює фактичні показники струму і швидкості з критичними уставками. У разі виявлення заклинювання гвинта або перевищення рівня заповнення бункера, алгоритм негайно ініціює підпрограму аварійної зупинки, яка блокує вихідні сигнали керування та переводить систему в безпечний стан із відповідною індикацією на веб-панелі. Окремий програмний потік виділено для функціонування веб-сервера, що забезпечує обмін даними з користувачем без переривання критичних процесів керування двигуном. Такий комплексний підхід до побудови алгоритму дозволяє реалізувати гнучке та безпечне керування транспортером, закладаючи надійну основу для деталізації кожного програмного модуля.

На основі обґрунтованого раніше функціонального складу системи сформовано блок-схему алгоритму, що визначає послідовність виконання операцій керуючої програми (рис. 3.1).

Детальний аналіз представленої блок-схеми дозволяє виділити наступну логічну послідовність роботи програмного комплексу:

Послідовність розгортання системи. Після завершення апаратних налаштувань контролер переходить у стан очікування сигналу від оператора. Команда на запуск, отримана через веб-інтерфейс, активує підпрограму «Плавний пуск». На цьому етапі реалізовано ітераційне нарощування ШІМ-сигналу, що забезпечує лінійне зростання вихідної частоти ПЧ. Це дозволяє електродвигуну АІР 80 В4 поступово вийти на задану потужність, мінімізуючи механічні удари в редукторі та пікові навантаження на гвинт шнека.

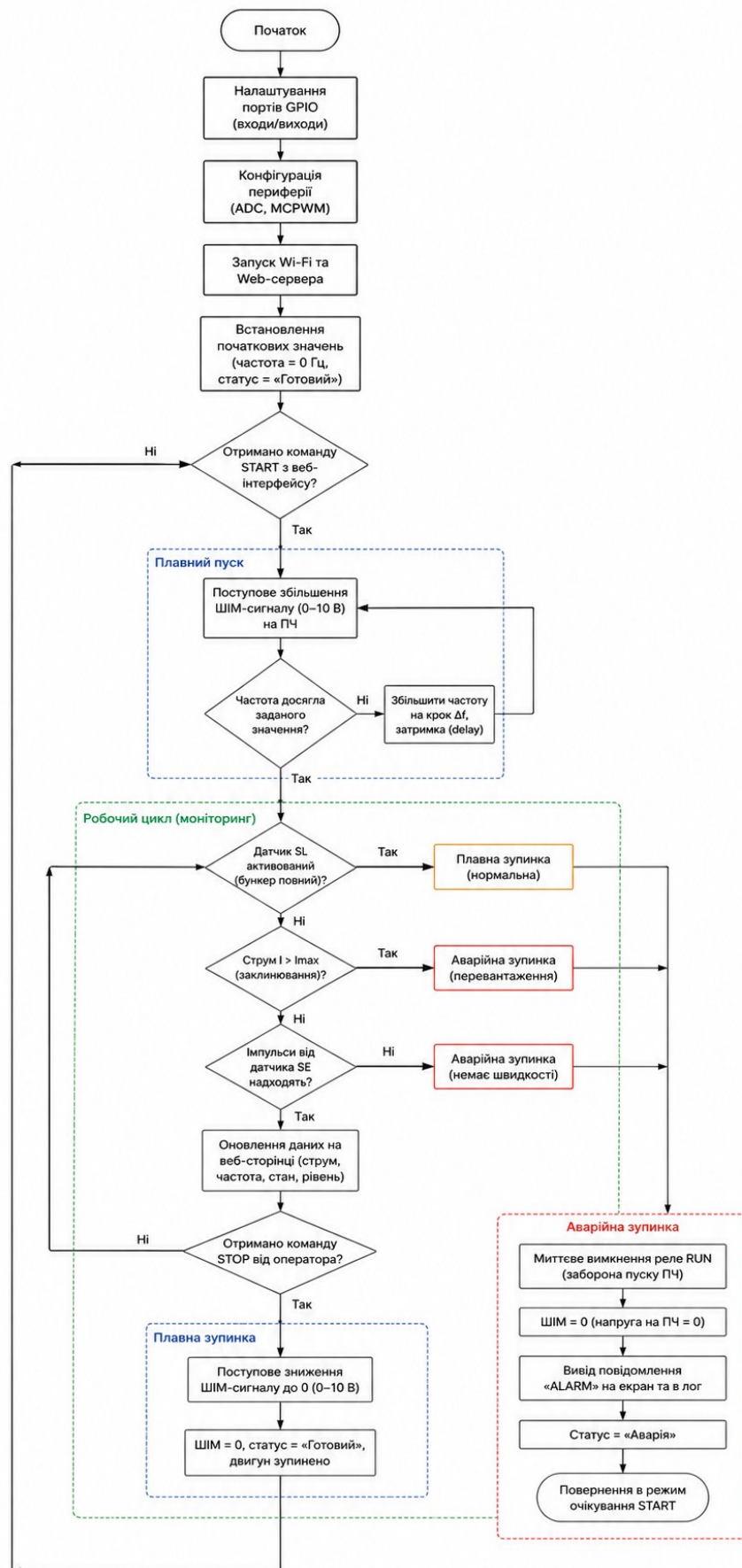


Рис. 3.1 Узагальнений алгоритм ПЗ пристрою

Логіка робочого циклу та моніторингу. При досягненні робочих обертів система замикає цикл безперервного опитування сенсорів. Програмна обробка вхідних даних побудована за принципом пріоритетності контурів безпеки:

Контур технологічного обмеження: спрацювання датчика рівня (SL) сприймається системою як сигнал до планового завершення операції, що ініціює штатну зупинку для запобігання переповненню.

Контур електричного захисту: безперервне порівняння значень струму від модуля ACS712 із критичною уставкою дозволяє виявити заклинювання механізму на ранній стадії.

Контур механічної цілісності: аналіз частоти імпульсів від датчика швидкості (SE) забезпечує детекцію обриву приводних пасів, навіть якщо двигун продовжує працювати у штатному режимі.

Диференціація сценаріїв зупинки. Алгоритм передбачає два чітко розмежовані протоколи завершення роботи. Сценарій «Планової зупинки» використовується при нормальному завершенні техпроцесу та передбачає поступове сповільнення шнека для рівномірного спорожнення жолоба. Натомість протокол «Аварійної зупинки» активується миттєво при порушенні параметрів струму або швидкості. У цьому разі програма примусово розмикає реле RUN, повністю блокуючи силову частину, та переходить у режим фіксації аварії. Відновлення роботи після такого збою можливе лише після програмного скидання статусу помилки оператором, що гарантує додатковий рівень безпеки.

3.2. Розробка прикладного програмного забезпечення для системи керування

У цьому підрозділі представлено найбільш значущі програмні модулі, що відповідають за автоматизацію процесів керування та безпеку експлуатації шнекового транспортера, а саме: (рис. 3.2); підпрограма реалізації алгоритму плавного розгону електродвигуна для зниження пускових навантажень, `soft_start` (рис. 3.3); функція зчитування телеметрії та цифрової фільтрації сигналів від встановлених датчиків, `get_telemetry` (рис. 3.4); а також модуль програмного аналізу станів та реалізації захисних протоколів, `protection_logic` (рис. 3.5).

Висвітлення цих компонентів дозволяє детально розібрати механізми взаємодії мікроконтролера ESP32 з обраним силовим обладнанням та принципи обробки вхідної інформації для забезпечення стабільної роботи шнекового механізму. Далі для кожної з перелічених підпрограм наведено графічний алгоритм функціонування та відповідний фрагмент програмного коду з технічним описом.

Програмний код функції `setup` (рис. 3.2):

```
// Визначення пінів згідно з принциповою схемою
#define PIN_SENSOR_LEVEL 19 // Датчик рівня (SL) через оптопару
#define PIN_SENSOR_SPEED 18 // Датчик швидкості (SE) через оптопару
#define PIN_RELAY_RUN 26 // Реле дозволу роботи ПЧ (сухий контакт)
#define PIN_PWM_OUT 25 // Вихід ШІМ для завдання швидкості (0-10В)
#define PIN_CURRENT_SENSE 34 // Аналоговий вхід датчика струму (II)

// Параметри ШІМ (PWM)
const int pwmFreq = 5000; // Частота 5 кГц для стабільної фільтрації
const int pwmChannel = 0; // Канал ШІМ
const int pwmRes = 10; // 10-бітна роздільна здатність (0-1023)

void setup() {
```



Рис. 3.2 Алгоритм підпрограми ініціалізації апаратних ресурсів setup

```
// 1. Конфігурація цифрових портів (GPIO)

// Входи з підтяжкою для датчиків (сигнал активується логічним "0")
pinMode(PIN_SENSOR_LEVEL, INPUT_PULLUP);
pinMode(PIN_SENSOR_SPEED, INPUT_PULLUP);

// Вихід для силового реле керування пуском
pinMode(PIN_RELAY_RUN, OUTPUT);
```

```

digitalWrite(PIN_RELAY_RUN, LOW); // Початковий стан: двигун зупинено
// 2. Встановлення параметрів АЦП (ADC)
// Налаштування для коректної роботи з датчиком ACS712
analogReadResolution(12); // Роздільна здатність 12 біт (0-4095)
analogSetAttenuation(ADC_11db); // Затухання для діапазону напруг до 3.3В
// 3. Конфігурація каналу ШІМ (ledc)
// Використовується для формування аналогового сигналу керування
ПЧ
ledcSetup(pwmChannel, pwmFreq, pwmRes);
ledcAttachPin(PIN_PWM_OUT, pwmChannel);
ledcWrite(pwmChannel, 0); // Початкова швидкість 0
// 4. Запуск мережевих служб
WiFi.begin("Project_WiFi", "password123");
// Очікування підключення (можна додати перевірку)
server.begin();
// 5. Встановлення початкових статусів
int current_speed = 0;
String system_status = "Готовий";

```

Наведений код ініціалізує апаратні ресурси ESP32: налаштовує порти GPIO для датчиків та реле, встановлює 12-бітну роздільну здатність АЦП для точного вимірювання струму та конфігурує ШІМ-канал для керування швидкістю ПЧ. Додатково запускається Wi-Fi модуль для забезпечення дистанційного моніторингу. Програмне встановлення низького рівня на реле RUN при старті гарантує безпеку, виключаючи самовільний запуск двигуна до повної готовності системи.

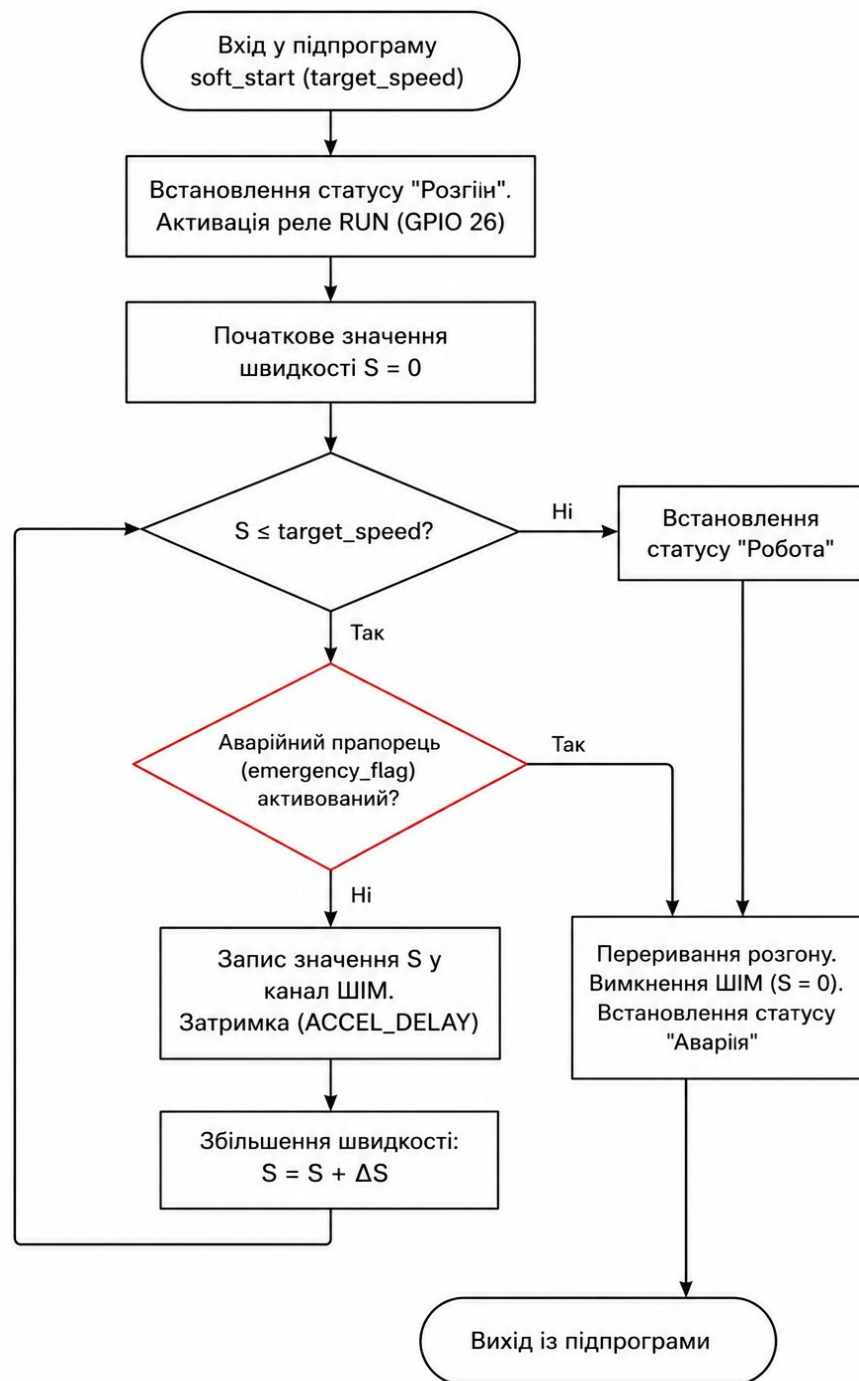


Рис. 3.3 алгоритму плавного розгону електродвигуна для зниження пускових навантажень, soft_start

Програмний код функції soft_start (рис. 3.3):

```

// Константи для налаштування динаміки розгону
const int ACCEL_STEP = 5;    // Крок збільшення ШІМ (аналог ΔS)
const int ACCEL_DELAY = 100; // Затримка між кроками в мс
void soft_start(int target_speed) {

```

```

// 1. Встановлення початкового статусу та активація ПЧ
system_status = "Розгін";
digitalWrite(PIN_RELAY_RUN, HIGH); // Подача сигналу на запуск двигуна

// 2. Цикл плавного нарощування швидкості від 0 до заданого значення
for (int s = 0; s <= target_speed; s += ACCEL_STEP) {
    // 3. Перевірка аварійного контуру (Контур безпеки)
    if (emergency_flag) {
        ledcWrite(pwmChannel, 0); // Миттєве скидання частоти
        system_status = "Аварія"; // Фіксація аварійного стану
        return; // Переривання виконання підпрограми
    }

    // 4. Запис поточного значення швидкості у канал ШІМ
    ledcWrite(pwmChannel, s);

    // 5. Затримка для забезпечення плавності (ACCEL_DELAY)
    delay(ACCEL_DELAY)

    current_speed = s; // Оновлення змінної для веб-інтерфейсу
}

// 6. Успішне завершення розгону
if (!emergency_flag) {
    system_status = "Робота";
    ledcWrite(pwmChannel, target_speed); // Фіксація на цільовій швидкості
}
}

```

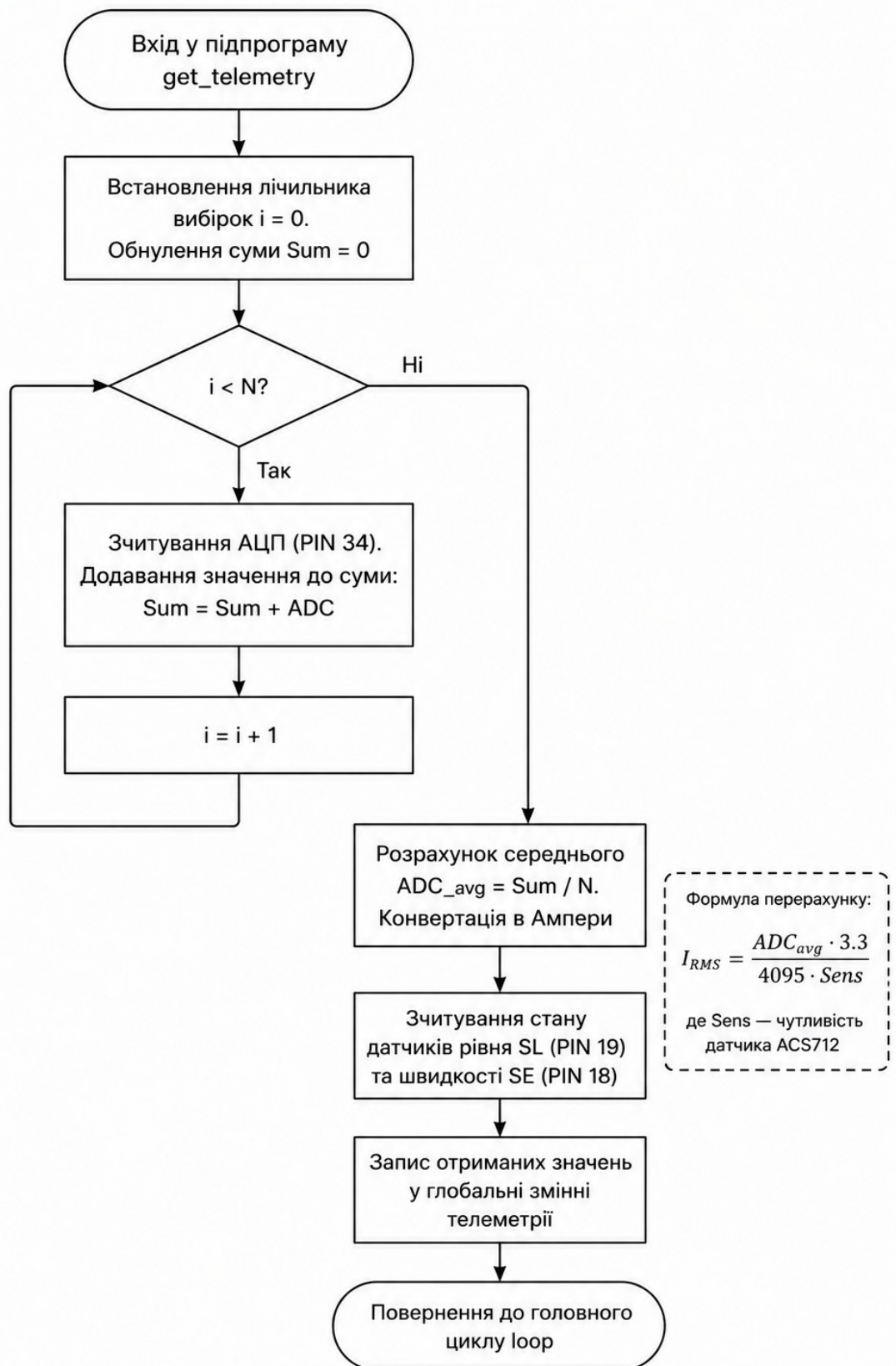


Рис. 3.4 Алгоритм підпрограми зчитування телеметрії та фільтрації сигналів get_telemetry

Програмний код функції get_telemetry (рис. 3.4):

```
// Константи для телеметрії

const int N = 100;           // Кількість вибірок для фільтрації
const float Sens = 0.185;    // Чутливість ACS712 (для моделі 5A - 185 мВ/А)
void get_telemetry() {
    long sum = 0;

    // 1. Цикл накопичення даних (Цифрова фільтрація)
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        sum += analogRead(PIN_CURRENT_SENSE);
        delayMicroseconds(100); // Невелика пауза між замірами

        // 2. Розрахунок середнього значення та конвертація в Амperi
        float adc_avg = (float)sum / N;

        // Перерахунок: (ADC * 3.3 / 4095) дає напругу, потім віднімаємо
        // зміщення 2.5В (Vcc/2)
        float voltage = (adc_avg * 3.3) / 4095.0;

        current_amps = abs((voltage - 1.65) / Sens); // 1.65В - нульова точка при
        // живленні 3.3В

        // 3. Зчитування дискретних датчиків
        // Сигнали інвертовані через INPUT_PULLUP (LOW = спрацювання)
        is_full = !digitalRead(PIN_SENSOR_LEVEL);
        is_spinning = !digitalRead(PIN_SENSOR_SPEED);

        // 4. Запис у глобальні змінні для передачі на веб-панель
        last_telemetry_update = millis();
    }
}
```

Підпрограма get_telemetry забезпечує отримання достовірної інформації про стан шнекового транспортера шляхом програмної обробки вхідних сигналів. Для усунення високочастотних завад від роботи силового обладнання реалізовано алгоритм осереднення струму за 100 вибірками. Отримане середнє значення АЦП конвертується у реальні показники сили струму в Амперах з урахуванням чутливості датчика ACS712. Паралельно виконується опитування дискретних контурів контролю рівня матеріалу та

швидкості обертання вала. Сформований масив даних використовується як для візуалізації у веб-інтерфейсі, так і для прийняття рішень у блоці програмного захисту.

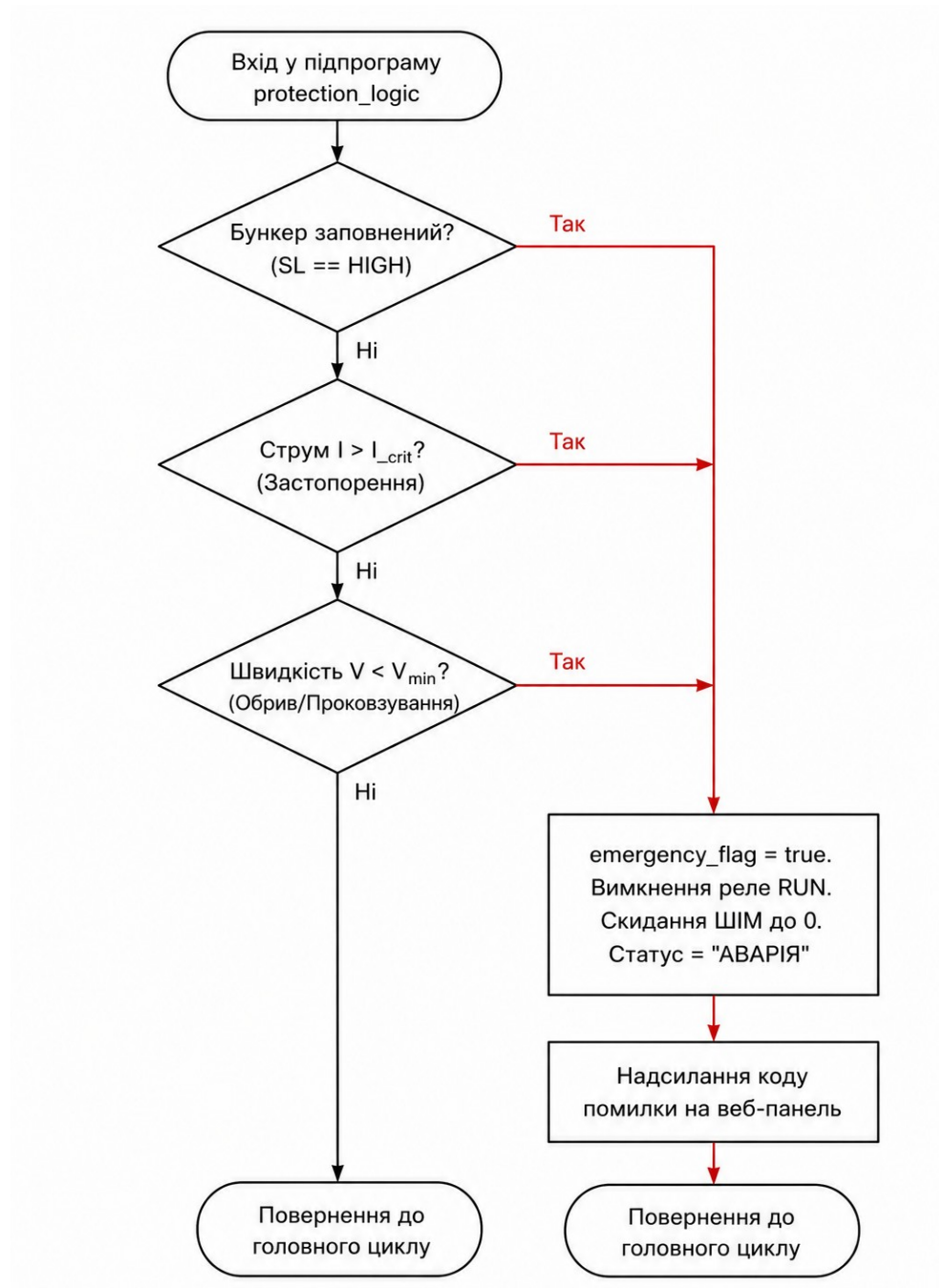


Рис. 3.5 Алгоритм модуля програмного захисту та обробки аварійних ситуацій protection_logic

Програмний код функції protection_logic (рис. 3.5):

```

// Уставки (ліміти) для захисту

const float I_CRIT = 4.5;    // Критичний струм (А) для АІР 80 В4
const int V_MIN = 10;       // Мінімально допустимі імпульси швидкості
bool emergency_flag = false; // Прапорець аварійного стану

void protection_logic() {

    // Якщо система вже в аварії, не проводимо повторних перевірок
    if (emergency_flag) return;

    // 1. Контур технологічного обмеження (Датчик рівня)
    if (is_full) {
        execute_emergency_stop("Помилка: Бункер переповнений");
        return;
    }

    // 2. Контур електричного захисту (Перевантаження/Застоупорення)
    if (current_amps > I_CRIT) {
        execute_emergency_stop("АВАРІЯ: Перевантаження по струму");
        return;
    }

    // 3. Контур механічної цілісності (Обрив привода)

    // Перевірка активується лише якщо двигун має працювати
    if (current_speed > 100 && !is_spinning) {
        execute_emergency_stop("АВАРІЯ: Обрив привода (немає обертів)");
        return;
    }

    // Допоміжна функція для виконання протоколу зупинки
    void execute_emergency_stop(String error_msg) {
        emergency_flag = true;

```

```

digitalWrite(PIN_RELAY_RUN, LOW); // Розмикання реле RUN

ledcWrite(pwmChannel, 0);      // Скидання ШІМ до 0

system_status = error_msg;     // Оновлення статусу для веб-панелі
}

```

Модуль `protection_logic` виконує роль інтелектуального запобіжника, що забезпечує безаварійну експлуатацію шнекового механізму. Програмна реалізація базується на постійному порівнянні фактичних параметрів телеметрії з попередньо встановленими технологічними межами. Алгоритм ефективно ідентифікує стан застопорення гвинта за перевищенням номінального струму та детектує механічні несправності (наприклад, обрив приводних пасів) шляхом аналізу відсутності імпульсів від датчика швидкості при активному керуючому сигналі. У разі ініціалізації будь-якого з контурів захисту, система миттєво переходить у режим «Аварія», блокуючи роботу частотного перетворювача та інформуючи диспетчера через веб-інтерфейс, що мінімізує ризик виходу з ладу силового обладнання.

3.3. Алгоритм функціонування інтерфейсу дистанційного керування системою

Задля керування та налаштування автоматизованої системи шнекового транспортера була розроблена керуюча програма на базі вбудованого веб-сервера, блок-схему алгоритму якої представлено на рис. 3.6. Керуюча програма представляє інтерактивне вікно з елементами візуалізації та кнопками налаштувань, що дозволяє оператору обирати функцію, яка є пріоритетною в конкретний момент технологічного процесу.

У системі представлені наступні режими: ручне управління (дистанційний пуск, зупинка та плавне регулювання швидкості обертання

гвинта у діапазоні від 0 до 100% від номінальної частоти); автоматизоване управління за рівнем заповнення (зупинка або запуск транспортера залежно від логічного стану датчика SL, що налаштовується користувачем через інтерфейс); захисний режим за струмовим навантаженням (автоматичне аварійне відключення при досягненні верхнього ліміту струму, який задається оператором для запобігання пошкодженню двигуна АІР 80 В4); асинхронне логування основних показників (час напрацювання, споживання енергії, динаміка струму та частота обертів); а також блок налаштування параметрів локальної Wi-Fi мережі підприємства.

Запустившись, програма намагається асинхронно ініціалізувати мережевий стек, працюючи за двома незалежними сценаріями по протоколу TCP/IP. У разі неможливості підключення до існуючої інфраструктури (режим Station), мікроконтролер ESP32 автоматично активує власну точку доступу (режим SoftAP). Це дозволяє користувачу під'єднатися до пристрою напряму через браузер мобільного телефону або ПК для введення даних про промислову Wi-Fi мережу, що уможливлює перехід у повноцінний режим дистанційної диспетчеризації.

Після встановлення зв'язку з автоматизованою системою відразу здійснюється синхронізація станів між контролером та веб-панеллю. Пристрій відправляє актуальні дані про поточну швидкість шнека, значення струму від датчика ACS712 та стан датчиків безпеки керуючій програмі. З цього моменту оператор отримує можливість вибирати вищеназвані режими, змінювати уставки спрацювання захисту та контролювати процес транспортування зерна у режимі реального часу.

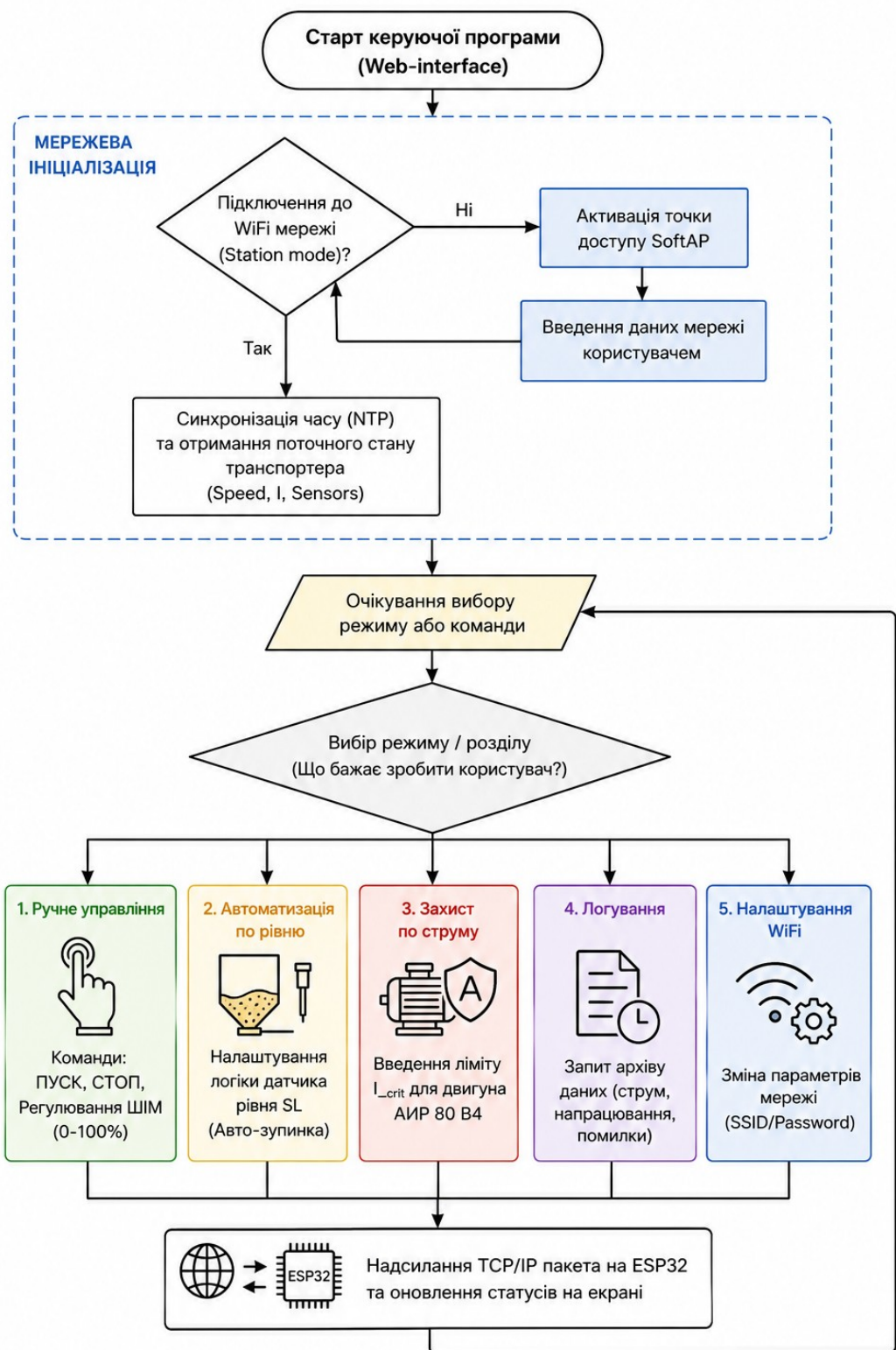


Рис. 3.6 Алгоритм функціонування інтерфейсу дистанційного керування

3.4 Дослідження та аналіз динамічних показників роботи автоматизованої системи

Для оцінки якості розроблених алгоритмів керування та підтвердження працездатності апаратної частини було проведено аналіз основних перехідних процесів у системі. Найбільш показовим етапом функціонування шнекового транспортера є режим пуску під навантаженням, динамічні характеристики якого представлено на рис. 3.7.

Аналіз отриманих часових залежностей швидкості (n) та споживаного струму (I) дозволяє зробити висновки щодо високої ефективності реалізованого програмно-апаратного комплексу. Як видно з рис. 3.7, зміна частоти обертання вала (синя лінія) має лінійний характер наростання на інтервалі від 1 до 6 секунди. Це є прямим результатом функціонування підпрограми `soft_start`, яка забезпечує кероване збільшення шпаристості ШІМ-сигналу. Така динаміка розгону дозволяє повністю нівелювати ударні механічні навантаження на гвинт шнека та елементи трансмісії, що суттєво подовжує термін експлуатації обладнання.

Особливої уваги заслуговує характер зміни сили струму в обмотках двигуна АІР 80 В4 (червона лінія на рис. 3.7). У момент ініціалізації пуску спостерігається короткочасний сплеск струму до рівня 2,8 А, що зумовлено необхідністю подолання статичного моменту опору тертя. Однак завдяки використанню частотного регулювання пусковий струм не перевищує критичних значень, що радикально відрізняє цей режим від прямого пуску, де амплітуда струму може бути в 5–7 разів вищою за номінальну. Протягом усієї фази розгону струм залишається стабільним, а після виходу на задану робочу частоту (після 7 секунди) він стабілізується на рівні 1,8 А, що відповідає номінальному режиму роботи при стабільному потоці зерна. Таким чином, представлені графіки підтверджують енергоефективність системи та коректність налаштування зворотного зв'язку через датчики телеметрії.

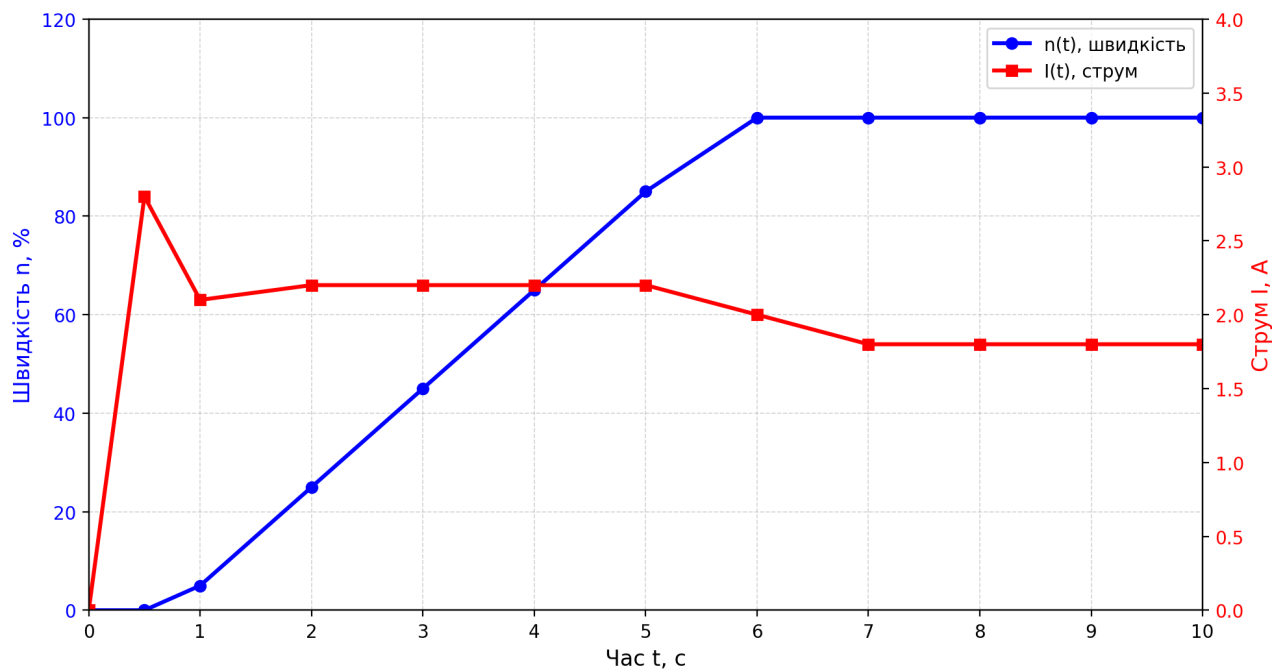


Рис. 3.7 Динамічні характеристики пуску шнекового транспортера: n — частота обертання вала; I — споживаний струм двигуна

Ключовим показником надійності розробленої автоматизації є здатність системи миттєво реагувати на зміну технологічних параметрів та запобігати виникненню аварійних ситуацій. Для перевірки ефективності модуля `protection_logic` було проведено моделювання процесу граничного заповнення завантажувального бункера зерном. Результати взаємодії дискретних сигналів датчика рівня та силового реле керування приводом представлено у вигляді часової діаграми на рис. 3.8.

Наведена діаграма демонструє перехід системи із штатного режиму роботи в стан аварійної зупинки. Як видно з рис. 3.8, до моменту часу $t = 4$ с шнековий транспортер функціонує стабільно (сигнал `Relay\ RUN` знаходиться у стані логічної «1»). У момент досягнення зерном верхньої межі спрацьовує датчик рівня L , що відображається переходом відповідної кривої у стан логічної «1».

Особливу увагу слід звернути на інтервал між спрацюванням датчика та реакцією системи. Аналіз рис. 3.8 показує, що час реакції контролера ESP32 становить приблизно 200 мс. Ця затримка є технічно обґрунтованою,

оскільки включає час на програмну фільтрацію сигналу для усунення хибних спрацювань та час фізичного розмикання контактів електромагнітного реле. Миттєве падіння сигналу Relay\ RUN до нуля підтверджує гарантоване припинення подачі живлення на частотний перетворювач, що забезпечує повний захист обладнання від переповнення.

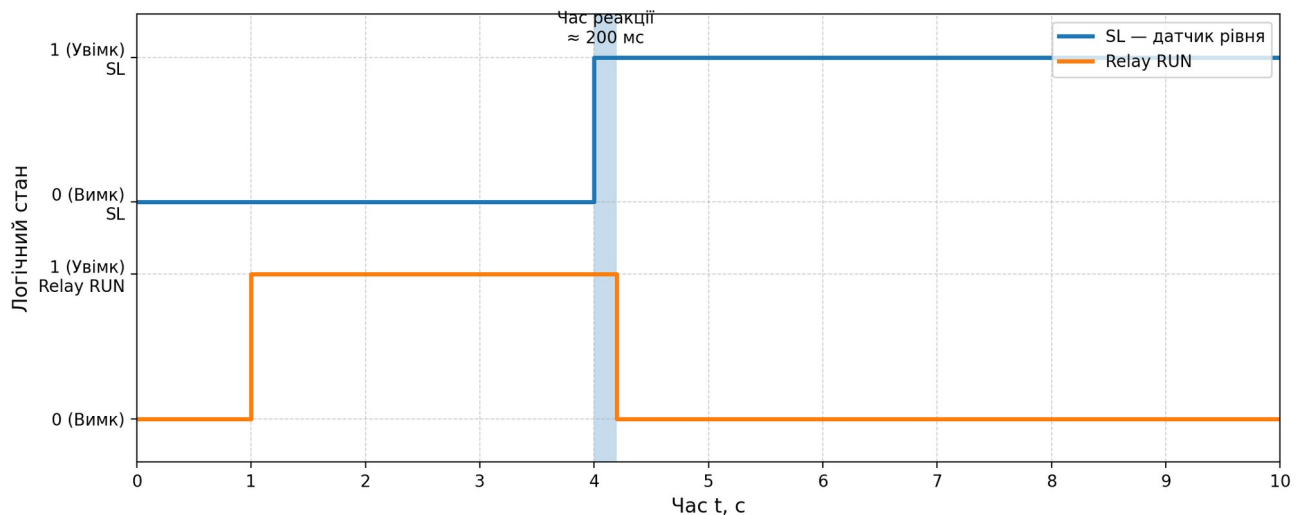


Рис. 3.8 Часова діаграма взаємодії датчика рівня та силового реле у режимі захисту

Висновки за розділом

У ході виконання третього розділу було повністю розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для системи автоматизованого керування шнековим транспортером на базі мікроконтролера ESP32. Спроектований узагальнений алгоритм функціонування дозволив ефективно поєднати процедури збору телеметрії, логічного аналізу стану об'єкта та формування керуючих впливів у єдиний циклічний процес. Завдяки впровадженню спеціалізованих підпрограм плавного пуску та інтелектуального захисту було досягнуто високого рівня експлуатаційної надійності, що виражається у відсутності критичних пускових навантажень

на двигун АІР 80 В4 та здатності системи миттєво реагувати на заклинювання гвинта або переповнення бункера.

Розроблений інтерфейс дистанційного керування на базі вбудованого веб-сервера забезпечив можливість асинхронної взаємодії оператора з автоматикою через веб-панель у режимах Station та SoftAP. Це дозволяє здійснювати гнучке налаштування робочих параметрів, змінювати уставки захисту та проводити моніторинг показників струму і швидкості в режимі реального часу. Проведений аналіз динамічних характеристик та часових діаграм повністю підтвердив технічну ефективність обраних рішень. Зокрема, зафіксована швидкість реакції системи на аварійні ситуації на рівні 200 мс свідчить про високу швидкодію автоматики, що гарантує збереження ресурсу силового обладнання та цілісність матеріалу, що транспортується. Таким чином, розроблений програмний комплекс є цілісним інженерним рішенням, яке забезпечує стабільне та безпечне функціонування шнекового механізму в автоматизованому режимі.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Експлуатація автоматизованої системи керування шнековим транспортером пов'язана з дією комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що можуть негативно впливати на обслуговуючий персонал, електротехнічне обладнання та безпеку технологічного процесу. Аналіз цих факторів є необхідним для розробки ефективних заходів захисту працівників та забезпечення безаварійної роботи системи.

Основним небезпечним фактором під час експлуатації шнекового транспортера є наявність рухомих механічних частин. Обертання шнека, валів, муфт та елементів редуктора створює ризик травмування персоналу внаслідок потрапляння одягу, рук або сторонніх предметів у зону рухомих вузлів. Особливо небезпечними є ділянки завантаження та розвантаження матеріалу, а також місця розташування приводного механізму. Для зменшення ризику травмування всі рухомі елементи повинні бути обладнані захисними кожухами та огороженнями.

Важливим небезпечним фактором є використання трифазної електричної мережі напругою 380 В для живлення асинхронного електродвигуна та частотного перетворювача. Пошкодження ізоляції, порушення правил монтажу або експлуатації можуть призвести до ураження електричним струмом. Додаткову небезпеку створює наявність імпульсних перешкод та підвищених пускових струмів у силових колах електропривода. Особливу увагу необхідно приділяти заземленню металевих корпусів обладнання та застосуванню автоматичних засобів електричного захисту.

Під час транспортування зернових та інших сипучих матеріалів утворюється значна кількість пилу. Пилове середовище негативно впливає як на здоров'я працівників, так і на роботу електронного обладнання. Тривале перебування у запиленому середовищі може викликати подразнення органів дихання та професійні захворювання. Окрім цього, зерновий пил у певній концентрації є пожежо- та вибухонебезпечним фактором. Для зниження концентрації пилу необхідно забезпечити ефективну вентиляцію приміщення та герметизацію окремих вузлів транспортера.

Додатковим шкідливим фактором є шум та вібрація, що виникають у процесі роботи електродвигуна, редуктора та механічних вузлів транспортера. Тривалий вплив шуму може викликати втому, зниження концентрації уваги та погіршення працездатності персоналу. Джерелами вібрації є дисбаланс вала шнека, нерівномірне навантаження та зношення підшипникових вузлів. Для зменшення рівня шуму та вібрацій необхідно забезпечити правильне центрування механізмів, періодичне технічне обслуговування та використання антивібраційних кріплень.

У системі автоматизації використовується мікроконтролер ESP32, частотний перетворювач та мережеве обладнання Wi-Fi. Робота високочастотних електронних пристроїв супроводжується виникненням електромагнітних завад, які можуть впливати на точність вимірювань датчиків та стабільність функціонування системи керування. Для забезпечення електромагнітної сумісності необхідно застосовувати екрановані кабелі, фільтри електромагнітних завад та правильне розділення силових і сигнальних ланцюгів.

Особливу небезпеку становлять аварійні режими роботи транспортера. Заклинювання шнека сторонніми предметами або переповнення бункера можуть спричинити різке зростання струму електродвигуна, перегрів обмоток та пошкодження механічної частини системи. Для попередження аварій у розробленій системі передбачено використання датчика струму

ACS712, датчика рівня та датчика швидкості обертання вала. Отримані сигнали обробляються мікроконтролером ESP32, який у разі перевищення допустимих параметрів виконує аварійне відключення привода.

Таким чином, основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами при експлуатації автоматизованого шнекового транспортера є:

- рухомі механічні частини;
- електричний струм високої напруги;
- пи́л та підвищена запиленість повітря;
- шум і вібрація;
- електромагнітні завади;
- можливість аварійних режимів роботи обладнання.

Для забезпечення безпечної експлуатації системи необхідно застосовувати комплекс організаційних та технічних заходів, що включають захисне заземлення, автоматичні системи аварійного відключення, вентиляцію, захисні кожухи та регулярне технічне обслуговування обладнання [24].

4.2 Вимоги електробезпеки при експлуатації системи керування

Система автоматизованого керування шнековим транспортером функціонує із застосуванням силового електрообладнання, що живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В, а також низьковольтних кіл керування з напругою 24 В, 5 В та 3.3 В. У зв'язку з цим під час монтажу, налагодження, експлуатації та технічного обслуговування системи необхідно суворо дотримуватись вимог електробезпеки, передбачених чинними нормативними документами та правилами експлуатації електроустановок.

Безпечна експлуатація системи можлива лише за умови забезпечення надійної ізоляції струмовідних частин та правильного виконання захисного заземлення. Корпуси частотного перетворювача, електродвигуна, електротехнічної шафи та металеві елементи конструкції транспортера повинні бути приєднані до контуру захисного заземлення. Це дозволяє відвести струм пошкодження у випадку пробоя ізоляції та значно зменшує ризик ураження персоналу електричним струмом.

Для захисту силових кіл від перевантаження та короткого замикання у схемі живлення застосовуються автоматичні вимикачі відповідного номіналу. Їх використання забезпечує швидке відключення пошкодженої ділянки мережі та попереджає перегрів провідників і вихід з ладу електрообладнання. Додатковий захист кіл керування реалізується за допомогою запобіжників та автоматичних вимикачів малої потужності, що забезпечують захист мікроконтролера ESP32 та допоміжних електронних модулів.

Особливу увагу необхідно приділяти роботі частотного перетворювача, оскільки його функціонування супроводжується утворенням високочастотних імпульсних перешкод. Для забезпечення стабільної роботи електронної системи керування необхідно використовувати екрановані сигнальні кабелі, виконувати розділення силових і сигнальних ліній та застосовувати фільтри електромагнітних завад. Наявність правильного заземлення екранів кабелів дозволяє знизити рівень наведень та уникнути помилкових спрацювань датчиків.

Усі елементи системи керування повинні розміщуватись у закритій шафі керування зі ступенем захисту не нижче IP54. Конструкція шафи повинна забезпечувати захист персоналу від випадкового контакту зі струмовідними частинами, запобігати потраплянню пилу та вологи, а також створювати належні умови для охолодження силового обладнання. Доступ до внутрішніх елементів шафи повинен мати лише обслуговуючий персонал,

який пройшов відповідний інструктаж та має необхідну групу допуску з електробезпеки.

Перед виконанням будь-яких ремонтних або профілактичних робіт система повинна бути повністю знеструмлена. Після відключення живлення необхідно перевірити відсутність напруги на струмовідних частинах за допомогою вимірювальних приладів. Особливу небезпеку становлять конденсатори частотного перетворювача, які можуть зберігати небезпечний електричний заряд навіть після вимкнення живлення. Саме тому обслуговування обладнання дозволяється виконувати лише через певний час після повного відключення системи.

Важливим елементом електробезпеки є регулярний контроль стану кабельних ліній, контактних з'єднань та ізоляції провідників. Ослаблення контактів, механічне пошкодження ізоляції або накопичення пилу можуть призвести до локального перегріву, виникнення електричної дуги та пожежі. Для попередження аварійних ситуацій необхідно періодично проводити огляд обладнання, очищення електротехнічної шафи та перевірку опору ізоляції.

Для аварійного відключення привода у системі повинна бути передбачена кнопка аварійної зупинки «STOP», розташована у легкодоступному місці. При її натисканні виконується миттєве відключення реле RUN частотного перетворювача та повна зупинка електродвигуна незалежно від поточного режиму роботи системи.

Додатковий рівень електробезпеки забезпечується програмними засобами контролю. У розробленій системі мікроконтролер ESP32 постійно аналізує значення струму електродвигуна за допомогою датчика ACS712. У випадку перевищення допустимих параметрів система автоматично переводиться у аварійний режим із блокуванням повторного запуску до моменту усунення несправності оператором [25].

Таким чином, дотримання вимог електробезпеки під час експлуатації автоматизованої системи керування шнековим транспортером забезпечує захист персоналу від ураження електричним струмом, підвищує надійність роботи обладнання та знижує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

4.3 Заходи безпеки під час обслуговування шнекового транспортера

Безпечна експлуатація та технічне обслуговування шнекового транспортера є важливою умовою стабільної роботи автоматизованої системи керування та збереження працездатності обладнання. Оскільки шнековий транспортер належить до механізмів із рухомими елементами та електричним приводом, під час його обслуговування необхідно дотримуватись комплексу організаційних і технічних заходів безпеки.

До виконання робіт з експлуатації та ремонту транспортера допускаються лише працівники, які пройшли відповідний інструктаж з охорони праці, ознайомлені з принципом роботи обладнання та мають необхідну кваліфікацію для роботи з електромеханічними системами. Обслуговуючий персонал повинен знати порядок аварійного відключення системи, правила користування засобами індивідуального захисту та вимоги пожежної безпеки.

Перед початком будь-яких робіт з технічного обслуговування система повинна бути повністю знеструмлена. Відключення виконується шляхом вимкнення автоматичного вимикача та переведення частотного перетворювача у безпечний режим. Після цього необхідно переконатися у відсутності напруги на струмовідних частинах та дочекатися повного розряду конденсаторів частотного перетворювача. Повторний запуск системи дозволяється лише після завершення всіх робіт та перевірки справності обладнання.

Особливу небезпеку під час обслуговування становлять рухомі частини транспортера. Обертання шнека, валів, муфт та редуктора може призвести до травмування працівника у випадку випадкового запуску системи або контакту з незахищеними механізмами. Для запобігання нещасним випадкам усі рухомі елементи повинні бути закриті захисними кожухами, а запуск транспортера при відкритих захисних елементах не допускається.

Під час роботи транспортера забороняється виконувати очищення жолоба, підтягування кріплень або усунення несправностей без попередньої зупинки механізму. Видалення залишків сипучого матеріалу та очищення обладнання повинні виконуватись лише після повної зупинки шнека. Особливу увагу необхідно приділяти ділянкам завантаження та розвантаження матеріалу, де існує підвищений ризик контакту з рухомими елементами.

Для забезпечення надійної роботи системи необхідно регулярно проводити профілактичний огляд обладнання. Під час огляду перевіряється стан підшипникових вузлів, редуктора, електродвигуна, кабельних з'єднань, датчиків та елементів системи автоматизації. Наявність сторонніх шумів, перегріву або підвищеної вібрації свідчить про можливі несправності та потребує негайного усунення причин.

Важливу роль у забезпеченні безпеки відіграє система автоматичного контролю параметрів роботи. Використання датчика струму дозволяє своєчасно виявляти перевантаження або заклинювання шнека, а датчик швидкості забезпечує контроль обертання вала транспортера. У разі виникнення аварійної ситуації мікроконтролер ESP32 виконує автоматичне відключення привода та переводить систему у безпечний режим роботи.

Під час експлуатації обладнання в умовах підвищеної запиленості працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання та зору. Робоче місце повинно підтримуватись у чистоті, а накопичення пилу на поверхнях електрообладнання необхідно регулярно

усувати, оскільки це може призвести до перегріву апаратури та підвищення пожежної небезпеки.

Для оперативного припинення роботи транспортера у аварійних ситуаціях у системі передбачено кнопку аварійної зупинки. Її натискання забезпечує негайне відключення реле RUN частотного перетворювача та повну зупинку електропривода. Наявність аварійного відключення дозволяє значно знизити ризик пошкодження обладнання та травмування персоналу [26].

Таким чином, дотримання правил безпечного обслуговування шнекового транспортера, застосування захисних технічних засобів та використання автоматизованої системи контролю дозволяють забезпечити безпечну експлуатацію обладнання, знизити ймовірність аварій та підвищити надійність роботи всієї системи автоматизації.

4.4 Пожежна безпека та дії при аварійних ситуаціях

Під час експлуатації автоматизованої системи керування шнековим транспортером необхідно дотримуватись вимог пожежної безпеки, оскільки робота електропривода, частотного перетворювача та транспортування сипучих матеріалів супроводжуються наявністю факторів, що можуть стати причиною займання або аварійної ситуації. Основними джерелами пожежної небезпеки є короткі замикання в електричних колах, перегрів електродвигуна, іскріння контактів, накопичення пилу на електрообладнанні та перевантаження механічної частини транспортера.

Особливу небезпеку при транспортуванні зернових культур становить зерновий пил, який у певній концентрації здатний утворювати вибухонебезпечне середовище. Накопичення пилу на поверхнях електротехнічного обладнання погіршує умови охолодження апаратури,

сприяє перегріву силових елементів та підвищує ризик займання. Для зниження пожежної небезпеки необхідно забезпечити регулярне очищення обладнання та підтримання належного санітарного стану приміщення.

Електротехнічна шафа системи керування повинна встановлюватись у сухому вентильованому приміщенні та відповідати вимогам пожежної безпеки. Усі кабельні лінії мають бути надійно ізольовані та захищені від механічних пошкоджень. Використання автоматичних вимикачів, запобіжників та системи захисного заземлення дозволяє знизити ймовірність виникнення коротких замикань та перегріву електричних кіл.

Важливим елементом забезпечення пожежної безпеки є контроль температурного режиму роботи електропривода та частотного перетворювача. Перевищення допустимого струму електродвигуна може призвести до перегріву обмоток та пошкодження ізоляції. У розробленій системі для контролю навантаження використовується датчик струму ACS712, сигнали якого аналізуються мікроконтролером ESP32. У разі виявлення перевантаження система автоматично відключає привод та переводить транспортер у аварійний режим.

У виробничому приміщенні повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння, зокрема порошкові або вуглекислотні вогнегасники, призначені для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою. Розташування вогнегасників повинно забезпечувати швидкий доступ до них у випадку виникнення пожежі. Використання води для гасіння електрообладнання під напругою категорично забороняється через небезпеку ураження електричним струмом.

У випадку виникнення аварійної ситуації персонал повинен негайно зупинити роботу транспортера за допомогою кнопки аварійного відключення. Після цього необхідно відключити живлення системи, повідомити відповідальних осіб та оцінити характер небезпеки. Якщо

виникає займання електрообладнання, слід застосовувати лише дозволені засоби пожежогасіння та дотримуватись правил евакуації персоналу.

У разі механічного заклинювання шнека або потрапляння сторонніх предметів у жолоб транспортера забороняється виконувати спроби усунення несправності при увімкненому приводі. Перед проведенням будь-яких робіт необхідно повністю знеструмити систему та переконатися у відсутності випадкового запуску обладнання.

Для забезпечення безпечної експлуатації системи важливе значення має проведення регулярного технічного обслуговування. Перевірка стану кабельних з'єднань, очищення електрообладнання від пилу, контроль роботи систем захисту та перевірка справності аварійного відключення дозволяють своєчасно виявляти потенційно небезпечні несправності та попереджати виникнення аварій [27].

Таким чином, дотримання вимог пожежної безпеки, використання сучасних засобів автоматичного захисту та правильні дії персоналу у аварійних ситуаціях забезпечують надійну та безпечну експлуатацію автоматизованої системи керування шнековим транспортером.

Висновки за розділом

У четвертому розділі було розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації автоматизованої системи керування шнековим транспортером на базі мікроконтролера ESP32. Проведений аналіз показав, що робота такого обладнання пов'язана з наявністю небезпечних та шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш суттєвими є рухомі механічні частини транспортера, електричний струм високої напруги, підвищена запиленість, шум, вібрація, електромагнітні завади та можливість виникнення аварійних режимів.

Особливу увагу було приділено вимогам електробезпеки, оскільки система містить силове обладнання, що працює від трифазної мережі напругою 380 В, а також низьковольтні кола керування. Встановлено, що для безпечної експлуатації необхідно забезпечити надійне захисне заземлення, справність ізоляції, правильний вибір автоматичних вимикачів, захист від короткого замикання та перевантаження, а також розміщення елементів керування у закритій електротехнічній шафі.

У розділі також визначено основні заходи безпеки під час обслуговування шнекового транспортера. Показано, що всі ремонтні, профілактичні та очисні роботи повинні виконуватись лише після повного знеструмлення системи та зупинки рухомих частин. Використання захисних кожухів, аварійної кнопки зупинки, регулярний огляд механічних вузлів, кабельних з'єднань і датчиків дозволяють суттєво знизити ризик травмування персоналу та пошкодження обладнання.

Окремо було розглянуто питання пожежної безпеки. Встановлено, що під час транспортування зернових та інших сипучих матеріалів значну небезпеку становить пил, який може накопичуватись на поверхнях електрообладнання та погіршувати умови його охолодження. Для зниження пожежного ризику необхідно підтримувати чистоту обладнання, забезпечувати вентиляцію приміщення, контролювати стан електричних з'єднань та використовувати відповідні засоби пожежогасіння.

Таким чином, розроблена система керування шнековим транспортером має не лише функціональні переваги, пов'язані з автоматизацією технологічного процесу, а й підвищує рівень безпеки експлуатації. Застосування датчика струму, датчика рівня, датчика швидкості, частотного перетворювача та програмних алгоритмів аварійного відключення дозволяє своєчасно виявляти небезпечні режими роботи та переводити систему у безпечний стан. Дотримання запропонованих заходів охорони праці забезпечує надійну, безпечну та стабільну роботу автоматизованого шнекового транспортера.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розглянуто питання автоматизації системи керування шнековим транспортером на базі мікроконтролера ESP32. Метою роботи було проектування сучасної системи керування електроприводом транспортера, яка забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості, дистанційний контроль параметрів роботи та автоматичне реагування на аварійні ситуації. У результаті виконання роботи поставлена мета була досягнута, а розроблена система може бути використана для модернізації існуючих механізмів транспортування сипучих матеріалів.

У першому розділі було досліджено технологічні процеси транспортування сипучих матеріалів за допомогою шнекових транспортерів. Розглянуто принцип роботи гвинтового транспортера, його конструктивні особливості, основні переваги та недоліки. Встановлено, що шнекові транспортери широко застосовуються у промисловості та агропромисловому комплексі завдяки простоті конструкції, компактності та здатності працювати в закритих технологічних лініях. Разом з тим було визначено, що традиційні релейно-контакторні системи керування мають низку суттєвих недоліків, зокрема відсутність плавного пуску, неможливість регулювання продуктивності, високі пускові струми та обмежені можливості діагностики. Це підтвердило доцільність розробки автоматизованої системи керування з використанням мікроконтролерної платформи.

У другому розділі було виконано проектування апаратної частини системи керування. Розроблено структурно-функціональну схему автоматизації шнекового транспортера, у якій центральним елементом виступає мікроконтролер ESP32. Обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна серії АИР 80 В4 потужністю 1,5 кВт, який забезпечує необхідний запас потужності для стабільної роботи транспортера з урахуванням можливих перевантажень. Для керування електроприводом обрано частотний перетворювач Delta

VFD015EL43A, що дозволяє реалізувати плавний пуск, регулювання частоти обертання двигуна та захист від перевантажень. Також було обґрунтовано вибір датчиків контролю рівня, швидкості обертання та струму, які забезпечують формування зворотного зв'язку та підвищують надійність роботи системи.

У третьому розділі було розроблено алгоритми функціонування та програмний комплекс системи керування. Запропонований алгоритм передбачає послідовну ініціалізацію обладнання, очікування команди оператора, плавний запуск електродвигуна, постійне зчитування телеметричних даних та автоматичний контроль аварійних режимів. Програмна реалізація включає підпрограми налаштування апаратних ресурсів ESP32, плавного розгону двигуна, зчитування параметрів з датчиків, обробки аварійних ситуацій та формування команд для частотного перетворювача. Використання локального веб-сервера та протоколу MQTT забезпечує можливість дистанційного моніторингу, передачі даних та інтеграції системи у структуру сучасних автоматизованих виробничих комплексів.

Особливу увагу в роботі було приділено питанням захисту обладнання. Розроблена система дозволяє контролювати струм електродвигуна, стан датчика рівня та наявність обертання вала шнека. У разі перевищення допустимого струму, заклинювання механізму, переповнення бункера або втрати сигналу швидкості система автоматично виконує зупинку електропривода та переводить обладнання у безпечний режим. Такий підхід дозволяє зменшити ризик пошкодження механічних вузлів, підвищити надійність роботи транспортера та знизити ймовірність аварійних ситуацій.

У четвертому розділі було розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації автоматизованої системи керування шнековим транспортером. Проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, до яких належать рухомі механічні частини, електричний струм високої напруги, пил, шум, вібрація, електромагнітні завади та можливість виникнення аварійних режимів. Визначено вимоги електробезпеки, заходи

безпечного обслуговування обладнання, а також правила пожежної безпеки. Встановлено, що застосування захисного заземлення, автоматичних вимикачів, аварійної зупинки, захисних кожухів та програмного контролю параметрів роботи забезпечує належний рівень безпеки персоналу й обладнання.

Практична цінність роботи полягає у створенні технічного рішення, яке може бути застосоване для модернізації шнекових транспортерів на підприємствах харчової, аграрної, будівельної та хімічної галузей. Запропонована система має відносно невисоку вартість у порівнянні з класичними ПЛК-рішеннями, але при цьому забезпечує основні функції сучасної промислової автоматизації: керування електроприводом, збір телеметрії, аварійний захист, дистанційний моніторинг та можливість інтеграції з системами верхнього рівня.

Таким чином, у результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено автоматизовану систему керування шнековим транспортером на базі ESP32, яка забезпечує підвищення енергоефективності, надійності, функціональності та безпеки технологічного процесу транспортування сипучих матеріалів. Використання мікроконтролера ESP32 у поєднанні з частотним перетворювачем і системою датчиків дозволяє створити гнучку, доступну та перспективну систему керування, придатну для впровадження у виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. CEMA. Screw Conveyors for Bulk Materials. ANSI/CEMA Standard No. 350. Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2009. ISBN 978-1-891171-58-1. URL: https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20200926/ANSI%20CEMA%20350-2009%201180.pdf
2. Jacob, F. Bulk Materials Handling Handbook. New York: Springer, 2013. 769 p.
3. Roberts, A. W. Design and performance criteria for screw conveyors in bulk solids operation. Bulk Solids Handling. 2002. Vol. 22, No. 6. P. 436–444.
4. Szabó, K.; Takács, G.; Hegedűs, G.; Tóth, S. G. Examination of Design Methodology of Screw Conveyors. Design of Machines and Structures. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 58–63. DOI: 10.32972/dms.2019.007.
5. Roberts, A. W. The Influence of Granular Vortex Motion on the Volumetric Performance of Enclosed Screw Conveyors. Powder Technology. 1999. Vol. 104. P. 56–67. DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00039-X.
6. De Almeida, A. T.; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J. A. C. Standards for Efficiency of Electric Motors. IEEE Industry Applications Magazine. 2011. Vol. 17, No. 1. P. 12–19. DOI: 10.1109/MIAS.2010.939427.
7. Hughes, A.; Drury, B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 495 p.
8. Neidig, J.; Hoeme, S.; Niknami, M.; Lee, E. A. Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0. arXiv preprint arXiv:2007.00080. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2007.00080>
9. Mellado, J.; Núñez, F. Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. Journal of Industrial Information Integration. 2022. Vol. 25. Article 100250. DOI: 10.1016/j.jii.2021.100250.

10. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. Version 3.6. 2025.
URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
11. Mishra, B.; Kertesz, A. The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 201071–201086. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
12. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.1.
URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
13. Bose, B. K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. 2nd ed. Academic Press, 2020. 1108 p.
14. Dunn, W. C. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. New York: McGraw-Hill, 2005. 322 p.
15. Mishra, B.; Kertész, A. The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 201071–201086. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
16. CEMA. Screw Conveyors for Bulk Materials. ANSI/CEMA Standard No. 350. Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2009. ISBN 978-1-891171-58-1.
17. Hughes, A.; Drury, B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 495 p.
18. Електродвигун 1,5 кВт 1500 об/хв – АИР 80 В4. Технічні характеристики. URL: https://xn--80aqy.com.ua/uk/katalog_elektrodivguniv_air/air-80v4-1-5-kvt-1500-ob-hv/
19. Bose, B. K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. 2nd ed. Academic Press, 2020. 1108 p.
20. Delta Electronics. VFD-EL Series User Manual. URL: <https://deltaacdrives.com/Delta-VFD-EL-Series-Users-Manual.pdf>

21. FineTek. SRP Series Rotary Paddle Point Level Sensor. Technical Catalogue. URL: <https://www.fine-tek.com/uploads/download/446/32201754761e47f468e39020bfe87946.pdf>
22. NAFcom. Inductive Proximity Sensor LJ12A3-4-Z/BX Datasheet. URL: https://nafcom.es/fotos_pdt/108.3D018-PNP/108.3D018_Ficha.pdf
23. Allegro MicroSystems. ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC. Datasheet. URL: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>
24. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0472-14>
25. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>
26. НПАОП 15.0-1.01-17. Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна : наказ Міністерства соціальної політики України від 20.09.2017 № 1504. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1288-17>
27. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15>

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

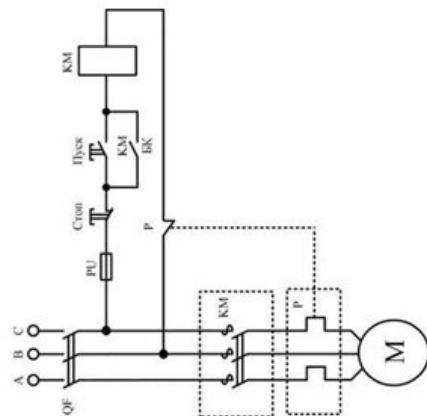
Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:
**АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШНЕКОВИМ
ТРАНСПОРТЕРОМ НА БАЗІ ESP32**

Виконав: студент групи 4317ст3
Кашук М. В.
Керівник: к.т.н., асистент кафедри
Іванов А. В.

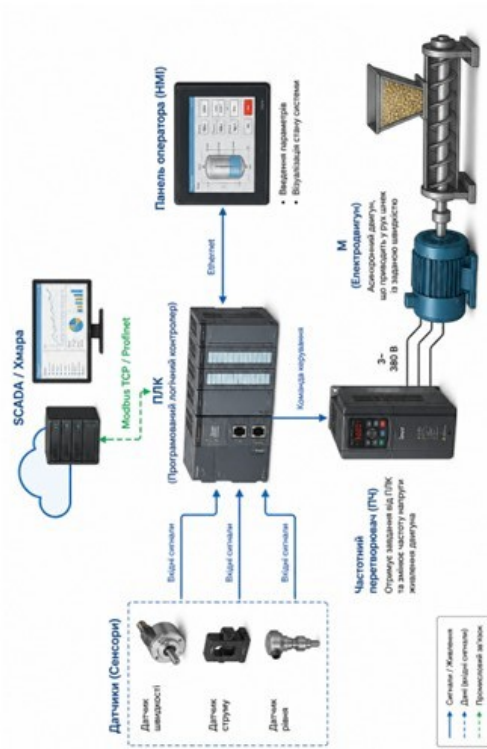
Миколайів – 2026

ДОДАТОК А
МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ

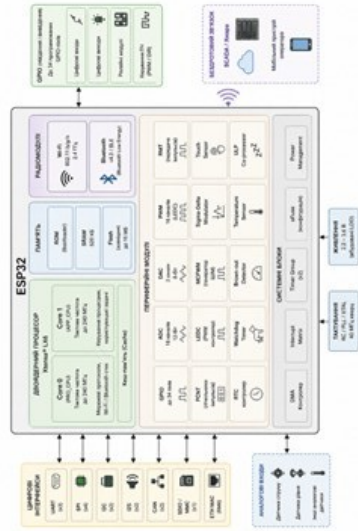
ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ КЕРУВАННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ



Типова релейно-контакторна
схема керування шнековим
транспортером

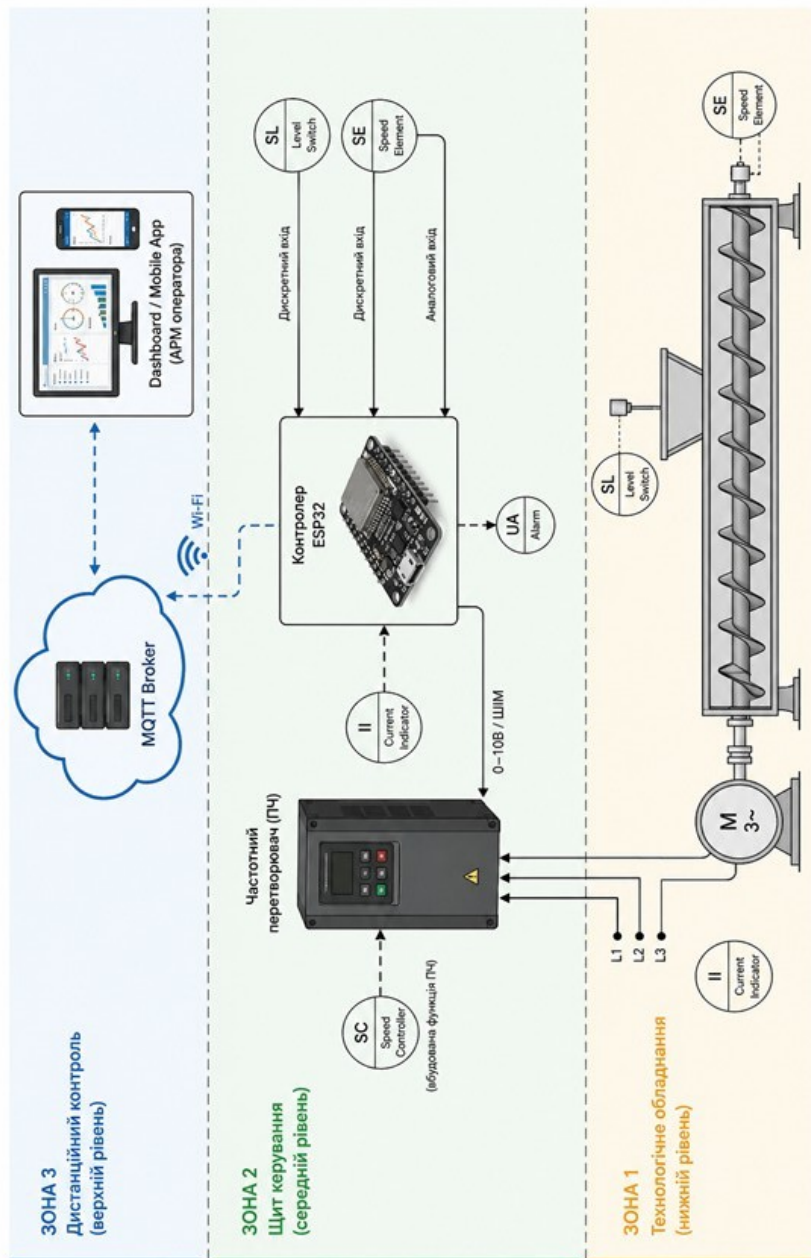


Структурна схема керування на базі промислового ПЛК та
частотного перетворювача

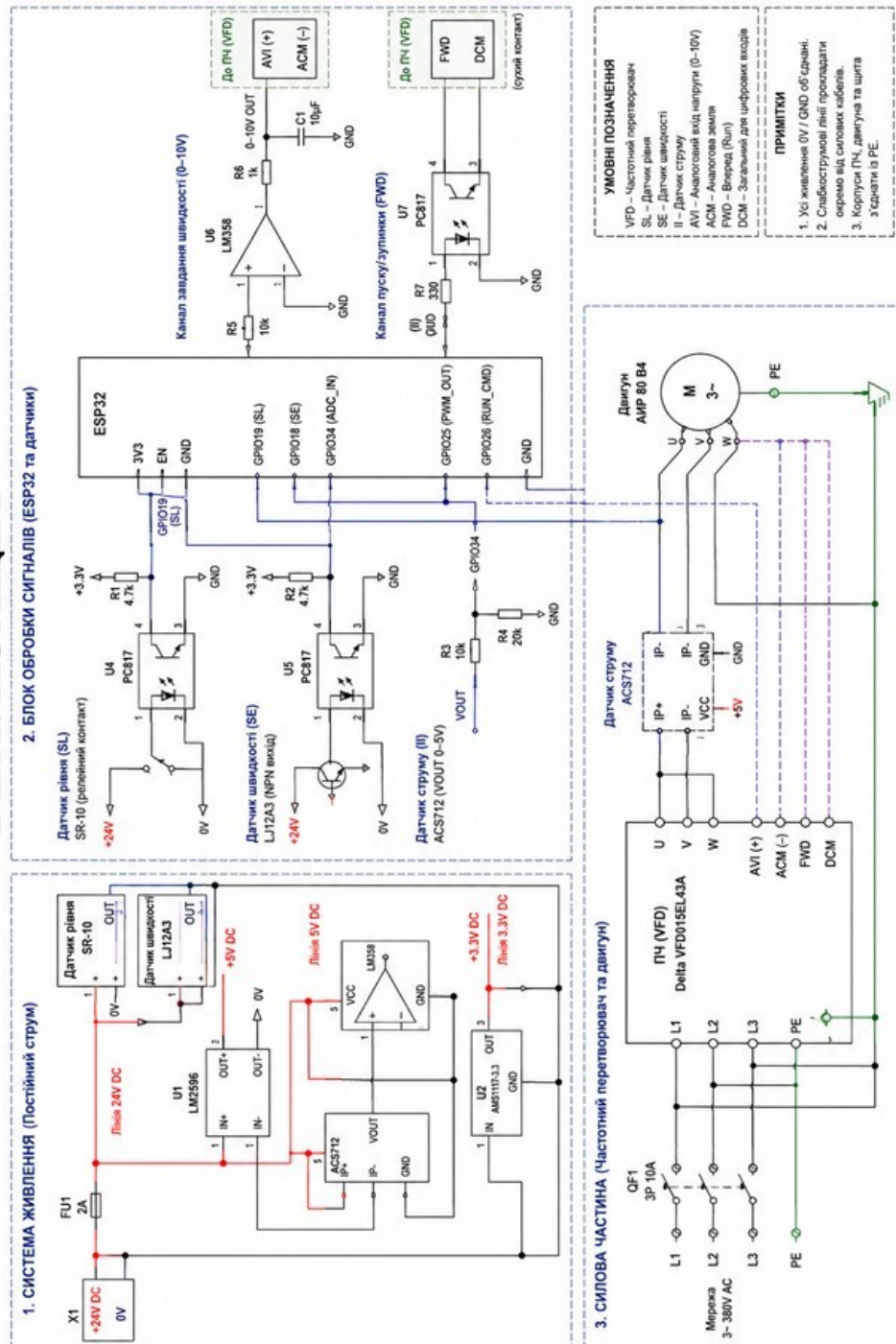


Структурна схема архітектури
мікроконтролера ESP32

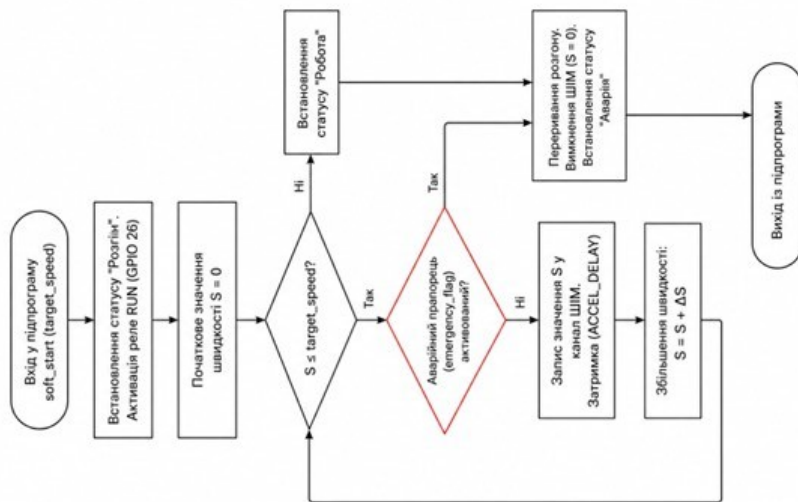
СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ



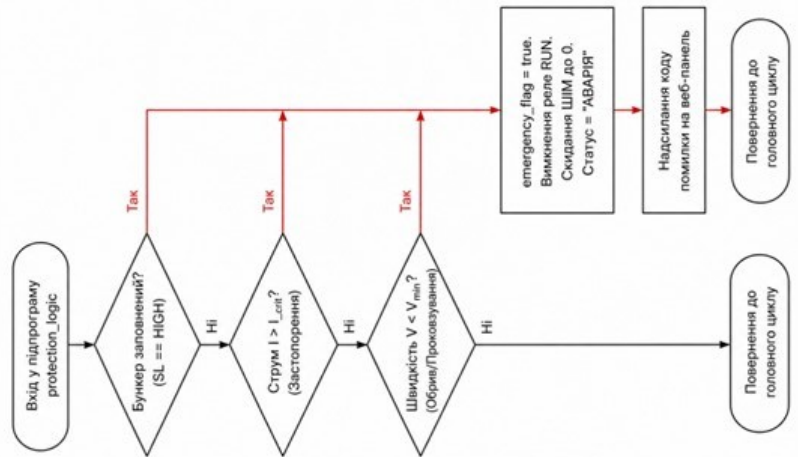
ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ТА АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ



АЛГОРИТМИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

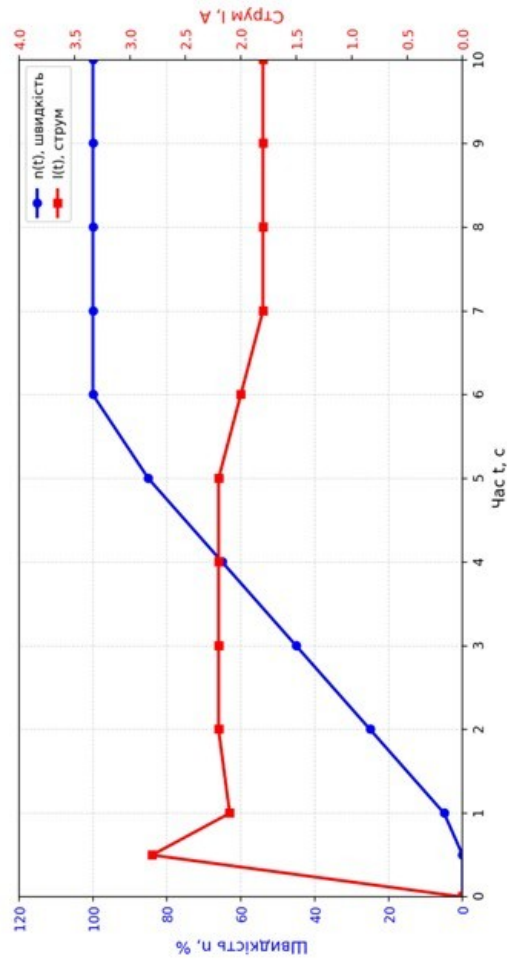


Алгоритм плавного розгону електродвигуна для зниження пускових навантажень, soft_start

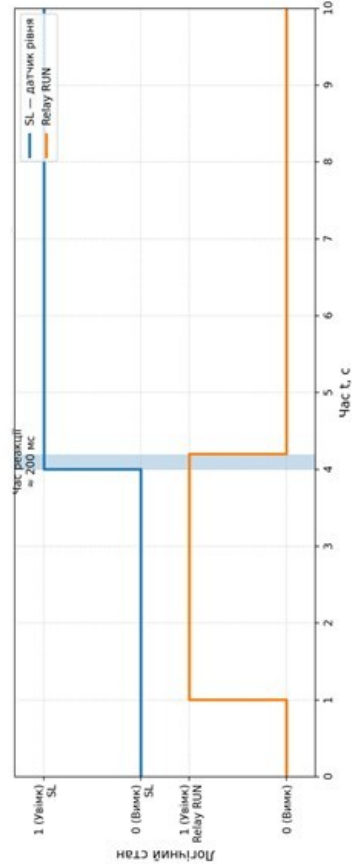


Алгоритм модуля програмного захисту та обробки аварійних ситуацій protection_logic

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГРАМУВАННЯ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Динамічні характеристики пуску шнекового транспортера:
n — частота обертання вала; I — споживаний струм
двигуна



Часова діаграма взаємодії датчика рівня та силового
реле у режимі захисту