

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Автоматизація процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної
машини з розробкою системи візуалізації процесу»***

Виконав студент гр. АКІТ-22

_____ Киловатий М.С.

Керівник

_____ Рубан С. А.

Нормоконтроль

_____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри

_____ Рубан С. А.

Кривий Ріг - 2026

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 26 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 Кіловатому Микиті Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини з розробкою системи візуалізації процесу»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 80с., презентація у Microsoft PowerPoint (13 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2 доц.

Рубан С.А.

Нормоконтроль доц.

Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.05.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>17.05.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>30.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>01.06.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>03.06.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>05.06.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>07.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Рубан С.А./

7. **Запевнення:** Я, Киловатий Микита Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Киловатий М.С./

АНОТАЦІЯ

Киловатий М. С. Автоматизація процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини з розробкою системи візуалізації процесу: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 76 с.

Об'єктом дослідження є технологічний процес завантаження агломераційної шихти на рухому стрічку агломашини, а предметом дослідження - методи, алгоритми та технічні засоби автоматичного керування та візуалізації процесу завантаження.

Метою роботи є розробка комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування та візуалізації процесу завантаження агломераційної шихти на базі сучасної мікропроцесорної техніки для забезпечення стабільності формування шару.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу завантаження шихти як об'єкта автоматизації та виявлено його динамічні особливості, зокрема наявність значного транспортного запізнення. Здійснено огляд та критичний аналіз існуючих застарілих рішень автоматизації, обґрунтовано необхідність децентралізації контурів регулювання та використання вебвізуалізації.

У другому розділі розроблено математичну та імітаційну моделі САК у MATLAB/Simulink, виконано оптимізацію параметрів ПІ-регулятора. Спроектовано функціональну та принципову схеми в EPLAN на базі ПЛК Modicon M241 та приводів Altivar. Створено прикладне програмне забезпечення на ST, імітаційний емулятор та триекранну систему візуалізації в Operator Terminal Expert, а також проведено їх успішну апробацію.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, АГЛОМЕРАЦІЙНА ШИХТА, ТРАНСПОРТНЕ ЗАПІЗНЕННЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВЕБВІЗУАЛІЗАЦІЯ.

					КНУ КРБ.151.26.06.00.ПЗ							
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Киловатий М.			АНОТАЦІЯ				Літера	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Рубан С.А.									4	1
									АКНТ АКІТ-22			
Н. контр.		Маринич І.А.										
Затверд.		Маринич І.А.										

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ НА СТРІЧКУ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

1.1 Аналіз технологічного процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

1.2 Аналіз існуючих способів керування процесом завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

1.3 Аналіз існуючих систем керування та візуалізації технологічного процесу в завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

1.4 Постановка задачі дослідження

Висновки до розділу

РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ НА СТРІЧКУ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

2.1 Розробка математичної моделі процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

2.2 Вибір та обґрунтування апаратних засобів реалізації системи керування завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

2.3 Проектування системи керування завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини (функціональна схема автоматизації, принципова схема)

2.4 Алгоритмічне забезпечення (опис логіки роботи, блок-схеми алгоритмів)

2.5 Комп'ютерне моделювання САК завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

2.6 Розробка програмного забезпечення системи автоматичного керування завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

					КНУ КРБ.151.26.06.00.ПЗ							
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.	Киловатий М.				ЗМІСТ				Літера	Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Рубан С.А.										5	2
									АКНТ АКІТ-22			
Н. контр.	Маринич І.А.											
Затверд.	Маринич І.А.											

2.7 Реалізація програмного забезпечення системи візуалізації процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

2.8 Апробація програмного забезпечення системи візуалізації процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

Висновки до розділу

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

					КНУ КРБ.151.26.06.00.ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

ВСТУП

Металургійний комплекс України, і зокрема гірничо-збагачувальні підприємства Криворізького басейну, є однією з найважливіших складових національної економіки. Ефективність роботи металургійних агрегатів, таких як доменні печі, безпосередньо залежить від якості підготовленої сировини - агломерату. Процес агломерації є енергоємним і складним технологічним комплексом, в якому критично важливим етапом виступає правильне дозування та завантаження шихти на стрічку агломераційної машини.

Рівномірність завантаження, дотримання заданої товщини шару та точних пропорцій компонентів шихти визначають газопроникність шару під час спікання. Будь-які відхилення у процесі завантаження (провали, бугри, нерівномірна щільність) призводять до перевитрат газу на запалювання, погіршення механічної міцності агломерату та зниження загальної продуктивності конвеєрної випалювальної машини. В умовах сучасного виробництва ручне або застаріле релейно-контакторне керування конвеєрними лініями та бункерними живильниками не здатне забезпечити необхідну точність та швидкість реакції на збурення. Тому розробка та впровадження сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації на базі промислових програмованих логічних контролерів (ПЛК), сучасних частотно-регульованих приводів та ергономічних систем візуалізації (HMI/SCADA) є вкрай актуальним науково-практичним завданням. [1, 2]

Метою кваліфікаційної роботи є розробка проекту автоматизації процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини з розробкою системи візуалізації процесу на базі сучасної мікропроцесорної техніки Schneider Electric для забезпечення стабільності технологічного процесу, підвищення енергоефективності та якості готового агломерату.

					КНУ КРБ.151.26.06.00.ПЗ									
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.	Киловатий М.				ВСТУП					Літера	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Рубан С.А.											7	2	
										АКНТ АКІТ-22				
Н. контр.	Маринич І.А.													
Затверд.	Маринич І.А.													

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Здійснити аналіз процесу завантаження шихти як об'єкта керування, визначити основні вхідні, вихідні параметри та збурюючі впливи.
- Провести огляд існуючих систем керування та обґрунтувати вибір оптимальної структури автоматизованої системи.
- Розробити функціональну та принципову схеми автоматизації.
- Здійснити вибір комплексу технічних засобів автоматизації (датчиків, виконавчих механізмів) з урахуванням важких умов експлуатації та обрати програмований логічний контролер і апаратуру керування приводами (екосистема Schneider Electric).
- Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для контролера.
- Розробити людино-машинний інтерфейс (НМІ) для візуалізації процесу, ведення трендів та обробки тривог.

Об'єктом дослідження є технологічний процес завантаження шихти на рухому стрічку конвеєрної випалювальної (агломераційної) машини.

Предметом дослідження є автоматизована система керування процесом дозування та транспортування матеріалів із застосуванням сучасних засобів автоматизації та візуалізації.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ НА СТРІЧКУ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

1.1 Аналіз технологічного процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

Технологічний процес завантаження шихти на рухому стрічку конвеєрної випалювальної (агломераційної) машини є одним із найбільш критичних етапів підготовки залізорудної сировини до металургійного переділу. Від якості та рівномірності виконання цієї операції безпосередньо залежить хід процесу спікання, газопроникність шару, витрата дефіцитного твердого палива та, як наслідок, механічна міцність і відновлюваність готового агломерату в доменній печі.

Агломераційна шихта являє собою складну багатокомпонентну, полідисперсну суміш. До її складу входять дрібнозернисті залізорудні матеріали (магнітний концентрат, агломераційна руда, колошниковий пил та шлами), тверде паливо (коксова дрібниця або антрацитовий штиб крупністю 0-3 мм), флюсуючі добавки (подрібнений вапняк, доломіт) та повернення (дрібний відсів готового агломерату, який не підходить для доменного плавлення). Перед подачею на агломашину ця суміш проходить стадію первинного змішування, зволоження (зазвичай до рівня 7-9 % вологості) та огрудкування у спеціальних барабанних грануляторах. Волога відіграє роль сполучного матеріалу, завдяки капілярним силам якої найтонші пилоподібні частинки налипають на крупніші ядра, утворюючи міцні гранули. Це є критично важливим для забезпечення необхідної аеродинаміки майбутнього шару

					КНУ КРБ.151.26.06.01.ПЗ		
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Киловатий М.				РОЗДІЛ 1	Літера	Аркуш
Перевір.	Рубан С.А.						9
							18
Н. контр.	Маринич І.А.					АКНТ АКІТ-22	
Затверд.	Маринич І.А.						

Завантаження шихти на стрічкову агломераційну машину здійснюється у два етапи. Спочатку на колосникові решітки палет укладається шар постелі заввишки 30-50 мм. Постіль складається з крупного повернення (фракція 10-25 мм) і виконує захисну функцію: запобігає просипанню дрібної шихти через щілини решітки, захищає колосники від перегріву та забезпечує рівномірний розподіл розрідження по висоті шару.

Після укладання постелі відбувається завантаження основного шару шихти заввишки 250-350 мм (залежно від типу машини та газопроникності шихти). Процес завантаження реалізується за допомогою комбінованої системи живильників:

- Барабанний живильник (або дисковий) забезпечує постійну витрату шихти з проміжного бункера.
- Човниковий (шатловий) розподільник здійснює зворотно-поступальний рух поперек осі машини і рівномірно розподіляє шихту по ширині стрічки (до 4-5 м).
- Похилий відбивний лоток або завантажувальна воронка направляє потік шихти на рухомі палети, забезпечуючи мінімальну сегрегацію фракцій.



Рисунок 1.1 - Детальний вид завантажувального вузла

Явище сегрегації матеріалу під час його скочування по похилому відбивному лотку відіграє вирішальну роль у формуванні правильної структури шару. Суть так званої «позитивної сегрегації» полягає в тому, що більші та важчі гранули шихти (діаметром 5-8 мм), маючи вищу кінетичну енергію, скочуються по лотку швидше і падають на найнижчий рівень - безпосередньо на шар постелі. Водночас дрібніші частинки (0-3 мм), включаючи легкі частинки твердого палива (коксової дрібниці), затримуються на нерівностях лотка і лягають у верхню частину шару.

Такий розподіл є вкрай бажаним з двох причин. По-перше, зосередження крупних гранул у нижній частині шару (де розрідження створюване екстаустерами є найбільшим) запобігає забиванню щілин колосникових решіток і різко підвищує загальну газопроникність (аеродинаміку) всього масиву. Газопроникність шихти W можна охарактеризувати емпіричною залежністю, яка прямо пропорційна еквівалентному діаметру гранул та порозності шару. По-друге, підвищена концентрація вуглецю у верхньому шарі забезпечує швидке та стабільне запалювання шихти при її проходженні під запальним горном (де температура сягає 1200-1300 °C), а також компенсує втрати тепла на випромінювання у навколишнє середовище в процесі подальшого спікання.

Проте, недотримання швидкості подачі (через відсутність автоматичного регулювання барабанного живильника) може призвести до "зворотної сегрегації" або утворення завалів, коли дрібна фракція просипається вниз, блокуючи рух повітря. Це призводить до неповного спікання матеріалу (утворення "незпеку") і прямого браку виробництва. [2, 7]

Після завантаження шихта потрапляє під запальний горн, де поверхневий шар нагрівається до 1200-1300 °C, і починається процес спікання. Палети рухаються зі швидкістю 1,5-3,5 м/хв над вакуум-камерами, де створюється розрідження 7-12 кПа, що забезпечує просмоктування повітря крізь шар шихти. Основні параметри процесу завантаження наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Параметри процесу завантаження шихти

Параметр	Значення (типове)	Одиниця вимірювання
Висота шару постелі	30-50	мм
Висота основного шару шихти	250-350	мм
Ширина стрічки	2,5-5,0	м
Швидкість руху палет	1,5-3,5	м/хв
Вологість шихти	7-9	%
Крупність шихти після огрудкування	0-10 (переважно 2-6)	мм

Рівномірність і стабільність завантаження безпосередньо визначають продуктивність агломераційної машини (1,0-1,5 т/м²·год), витрату твердого палива та механічну міцність агломерату. Відхилення в товщині шару або нерівномірний розподіл компонентів призводять до локального перепалу, зниження газопроникності, збільшення повернення та погіршення якості продукту.

Для забезпечення безперервності процесу використовується комбінована система живильників. Матеріал зі збірного конвеєра надходить у проміжний (буферний) бункер. Цей бункер виконує роль демпфера, що згладжує пульсації масового потоку, які неминуче виникають при транспортуванні сипучих вантажів конвеєрними стрічками великої довжини. Стабільний рівень шихти у бункері є обов'язковою умовою для рівномірного її витікання.

Під бункером встановлено барабанний живильник. Він являє собою порожнистий металевий циліндр, що обертається навколо горизонтальної осі. Змінюючи частоту обертання привода цього барабана, можна плавно і в широкому діапазоні регулювати масову витрату шихти (т/год), яка подається на укладання.

З барабана матеріал потрапляє на човниковий (шатловий) розподільник - механізм, який безперервно рухається по напрямних поперек поздовжньої осі агломашины (здійснює зворотно-поступальний рух). Швидкість цього руху розраховується таким чином, щоб забезпечити ідеально рівну висоту шару матеріалу по всій ширині рухомих палет (яка може складати від 2,5 до 5 метрів). Завершальним елементом виступає похилий відбивний лоток, кут нахилу якого оператор може коригувати механічним шляхом залежно від поточної вологості шихти. [1]



Рисунок 1.2 - Робоча зона агломераційної машини

1.2 Аналіз існуючих способів керування процесом завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

З точки зору теорії автоматичного керування, процес завантаження шихти на стрічку агломашины являє собою надзвичайно складну, багатовимірну, нелінійну динамічну систему з розподіленими параметрами. Основне призначення системи

автоматичного керування (САК) полягає в підтримці суворого балансу між швидкістю надходження матеріалу та швидкістю його вивантаження на рухомі палети, при забезпеченні ідеально рівної поверхні шару заданої товщини.

Комплекс технологічного обладнання утворює об'єкт керування, що складається з послідовно з'єднаних ланок: бункерної ємності, живильника, системи транспортування та зони укладання. Як об'єкт автоматизації, цей процес має низку специфічних математичних та фізичних особливостей, які роблять його класичне регулювання складним завданням.

Перш за все, об'єкт є багатоканальним (МІМО-системою - Multiple Input Multiple Output). У ньому існують сильні перехресні зв'язки між регульованими параметрами. Наприклад, зміна частоти обертання барабанного живильника (керуючий вплив) одночасно впливає на швидкість спорожнення проміжного бункера (рівень матеріалу), на масову витрату шихти, що падає на розподільник, і на кінцеву висоту шару на стрічці. Одночасно з цим, швидкість самої стрічки агломації також впливає на товщину шару при незмінній подачі матеріалу.

Другою особливістю є виражена нелінійність процесу, яка обумовлена нестабільною реологією сипучих матеріалів. Витратна характеристика бункера та барабанного живильника не є лінійною функцією від швидкості привода. Вона значною мірою залежить від поточної вологості шихти, її гранулометричного складу та кута внутрішнього тертя. Наприклад, при збільшенні вологості вище 9 % різко зростає когезія (злипання) матеріалу, що може призводити до утворення склепінь у бункері і раптового припинення подачі шихти навіть при обертовому живильнику.

Третьою, і найбільш критичною проблемою для налаштування систем автоматики, є наявність значного транспортного (чистого) запізнення. Від моменту зміни швидкості барабанного живильника до моменту, коли ця зміна відобразиться на показаннях конвеєрних ваг або радарного датчика висоти шару, встановленого над стрічкою, проходить від 10 до 30 секунд. Така затримка обумовлена часом падіння шихти, проходженням через розподільник та рухом самої стрічки. У теорії

автоматичного керування наявність ланки чистого запізнення суттєво обмежує можливість використання високих коефіцієнтів підсилення в ПД-регуляторах, роблячи систему схильною до автоколивань.

Основними керуючими впливами на систему є зміна частоти обертання двигуна барабанного живильника (головний канал керування витратою) та коригування швидкості руху стрічки палет. Контрольованими (вихідними) параметрами, за якими здійснюється зворотний зв'язок, виступають поточна масова витрата шихти (тонн/годину), фактична висота шару на стрічці (міліметри) та рівень матеріалу в проміжному бункері (відсотки від номінальної ємності). Основними збурюючими впливами, що носять випадковий характер, є коливання насипної густини матеріалу, нестабільність надходження шихти по збірному конвеєру та механічне налипання вологої маси на відбивний лоток, що спотворює траєкторію падіння. [3]

Як об'єкт автоматизації ТОК має низку характерних особливостей. Він є багатоканальним, оскільки одночасно регулює кілька взаємопов'язаних параметрів - витрату шихти, рівень у бункері, висоту шару та рівномірність розподілу по ширині стрічки. Процес нелінійний через залежність витрати від вологості, гранулометричного складу та рівня заповнення бункера. Крім того, присутнє транспортне запізнення (10-30 с), яке виникає під час переміщення шихти від живильника до точки вимірювання висоти шару. Об'єкт також інерційний - його постійні часу становлять 5-20 с через інерцію механічних приводів і сипучих матеріалів. Характеристики технологічного об'єкта керування зведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Характеристика ТОК

Параметр	Тип параметра	Номінальне значення	Одиниця вимірювання	Допустиме відхилення
Висота шару шихти	Вихідний (контрольований)	250-350	мм	±10-15 мм
Масова витрата шихти	Вихідний	300-600	т/год	±5 %

Продовження табл. 1.2

Параметр	Тип параметра	Номинальне значення	Одиниця вимірювання	Допустиме відхилення
Швидкість стрічки	Вхідний	1,5-3,5	м/хв	$\pm 0,2$ м/хв
Вологість шихти	Збурення	7-9	%	± 1 %

Керуючі впливи на ТОК здійснюються зміною частоти обертання барабанного живильника, амплітуди та частоти руху човникового розподільника, кута нахилу відбивного лотка, а також швидкості руху стрічки палет. Контрольованими параметрами є висота шару шихти (основний показник якості завантаження), масова витрата шихти, рівномірність розподілу по ширині стрічки та рівень шихти в проміжному бункері. Основними збуреннями, що порушують стабільність процесу, виступають коливання вологості шихти, зміни гранулометричного складу та густини матеріалу, налипання на лотках і живильниках, а також нестабільність рівня в основних бункерах живлення та механічний знос обладнання.

Історично склалося так, що на багатьох ділянках вітчизняних підприємств досі експлуатуються системи керування першого покоління, побудовані на базі жорсткої релейно-контакторної логіки. Логічний апарат таких систем фізично реалізований за допомогою сотень електромагнітних реле, пускачів та таймерів, з'єднаних кілометрами контрольних кабелів. До критичних недоліків таких застарілих систем відносяться:

- Катастрофічно низька експлуатаційна надійність. Механічні контакти реле в умовах агресивного пилу та корозійних газів піддаються окисленню, дуговому ерозійному зносу та явищу "залипання".

- Повна відсутність адаптивності. Будь-яка зміна в технологічному алгоритмі (наприклад, зміна логіки блокування або додавання нового датчика) вимагає тривалої зупинки лінії, створення нового проєкту та фізичного ремонту шаф керування.
- Інформаційна ізолюваність. Релейні системи не мають обчислювальних потужностей для архівації даних масової витрати, ведення трендів чи передачі інформації на верхній рівень диспетчеризації (MES-системи підприємства). Це унеможливорює проведення аналізу ефективності роботи обладнання.

Еволюція способів керування процесом завантаження шихти пройшла кілька ключових етапів, кожен з яких намагався вирішити головну проблему - наявність значного чистого (транспортного) запізнення в системі.

При ручному способі керування машиніст агломераційної машини візуально, або за допомогою примітивних механічних щупів, оцінює висоту шару шихти на стрічці. У разі виявлення відхилень оператор вручну коригує швидкість барабанного живильника (за допомогою реостатів або кнопок керування приводом). Головним недоліком такого способу є вплив людського фактора та неможливість миттєвої реакції на зміну густини чи вологості шихти. Реакція оператора завжди запізнюється, що призводить до хвилеподібного завантаження стрічки. У результаті виникає явище "кінцевого перепалу" - нерівномірного завершення процесу спікання по довжині машини, що різко знижує якість агломерату.

З появою перших аналогових регуляторів та ранніх моделей ПЛК, керування намагалися автоматизувати за допомогою класичного пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону. У такій схемі датчик ваги (конвеєрні ваги) або радарний рівнемір передає сигнал на центральний контролер, який порівнює фактичну витрату із заданою, і видає сигнал керування на частотний перетворювач.

Однак такий спосіб "централізованого" керування стикається з фундаментальною проблемою теорії керування: час від зміни швидкості живильника до фіксації цієї зміни датчиком на стрічці становить від 10 до 30 секунд. Застосування високих коефіцієнтів підсилення в ПД-регуляторі за наявності такого запізнення неминуче призводить до розгойдування системи (автоколивань). Система починає постійно розганяти і гальмувати живильник, що призводить до передчасного зносу механічного обладнання та не забезпечує стабільної товщини шару. Для уникнення автоколивань доводиться штучно занижувати швидкість реакції регулятора, що робить систему занадто інертною до раптових збурень. [3, 4]

Аналіз сучасних тенденцій промислової автоматизації показує, що найбільш ефективним способом керування для таких об'єктів є децентралізація локальних контурів регулювання. Замість того, щоб навантажувати центральний ПЛК обчисленням ПД-закону для живильника, це завдання делегується безпосередньо "розумному" виконавчому механізму - інтелектуальному частотно-регульованому приводу (наприклад, класу Altivar Process від Schneider Electric). [4]

У даному проекті прийнято раціональну розподілену структуру керування. Первинні датчики (тензометрична система ваг конвеєра та датчик швидкості) підключаються безпосередньо до входних модулів ПЛК Modicon M241. ПЛК виконує високошвидкісний розрахунок миттєвої витрати шихти і передає розраховане значення зворотного зв'язку та задану уставку по завадостійкій промисловій мережі Modbus TCP на інтелектуальний частотний перетворювач Altivar Process ATV930. Математичний апарат ПД-регулювання виконується автономно на рівні процесора ПЧ, що мінімізує обчислювальне навантаження на центральний контролер і забезпечує високу динамічну точність стабілізації витрати.

Саме такий, сучасний розподілений спосіб керування, що базується на інтелектуальних польових пристроях та високошвидкісних промислових мережах

(Ethernet), приймається як базовий для подальшої розробки в даній кваліфікаційній роботі.

1.3 Аналіз існуючих систем керування та візуалізації технологічного процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

Контроль та візуалізація технологічного процесу завантаження шихти є не менш важливим завданням, ніж безпосереднє автоматичне регулювання. Історично на металургійних підприємствах України, зокрема у Криворізькому басейні, контроль за процесом здійснювався оператором візуально або за допомогою стрілочних приладів на громіздких мозаїчних щитах. Такі щити займали величезні площі в операторських кімнатах і вимагали прокладання сотень кілометрів контрольних кабелів від кожного датчика до відповідної лампочки чи індикатора на панелі.



Рисунок 1.3 - Традиційний мозаїчний щит керування технологічним процесом

Відсутність інформативності таких застарілих систем є критичною: вони не дають можливості архівації даних, ведення трендів масової витрати шихти та не

мають функцій самодіагностики пристроїв, що значно ускладнює пошук несправностей. Крім того, оператор фізично не здатний одночасно відслідковувати десятки взаємопов'язаних параметрів (струми приводів, температури, рівні в бункерах), що призводить до інформаційного перевантаження та підвищує ризик аварій через людський фактор.

Сучасний етап розвитку автоматизації передбачає повну відмову від апаратних мозаїчних щитів на користь багаторівневих диспетчерських систем (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition) та локальних людино-машинних інтерфейсів (HMI - Human-Machine Interface). Верхній рівень таких систем являє собою автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора-агломератника з графічним інтерфейсом, де технологічний процес відображається у вигляді динамічних мнемосхем, інтерактивних графіків (трендів) та спеціалізованих журналів тривоги.



Рисунок 1.4 - Сучасний інтерфейс HMI/SCADA системи

На сучасному ринку засобів промислової автоматизації представлено безліч програмних продуктів для створення систем HMI/SCADA. Вибір конкретної платформи для вузла завантаження шихти безпосередньо впливає на надійність,

швидкість відгуку інтерфейсу та легкість інтеграції з обладнанням нижнього рівня. Серед найпоширеніших систем у гірничо-металургійному комплексі можна виділити наступні:

1. Системи на базі технологій Siemens (SIMATIC WinCC / TIA Portal). Це одні з найпоширеніших систем у Європі. Вони пропонують потужний інструментарій для створення SCADA-систем будь-якого масштабу. Однак, для локальних вузлів (таких як окрема лінія завантаження шихти) використання повноцінної WinCC часто є економічно та технічно надлишковим через високу вартість ліцензій та вимоги до апаратного забезпечення комп'ютерів. Крім того, класичні панельні рішення цього виробника мають жорстку прив'язку до власного апаратного забезпечення.

2. Програмні комплекси AVEVA. Класична SCADA-система, яка стала галузевим стандартом у багатьох сферах. Відрізняється гнучкістю та апаратною незалежністю. Проте її архітектура більше підходить для рівня управління всім цехом або фабрикою, а не для керування локальним агрегатом на польовому рівні.

3. Екосистема Schneider Electric (EcoStruxure Operator Terminal Expert). Саме цей клас систем візуалізації є оптимальним для реалізації сучасного підходу "Edge Control" (керування на периферії). Програмне забезпечення EcoStruxure Operator Terminal Expert дозволяє створювати HMI-проекти з високою роздільною здатністю, використовуючи векторну графіку та сучасні принципи навігації. Головною перевагою є безшовна інтеграція з програмованими логічними контролерами лінійки Modicon та частотними приводами Altivar. Це дозволяє імпортувати базу змінних в один клік, уникаючи помилок адресації пам'яті.

Під час аналізу існуючих систем візуалізації на металургійних підприємствах виявлено поширену проблему: перенасиченість мнемосхем яскравими кольорами, тривимірними зображеннями труб та бункерів, а також анімацією, яка не несе корисного навантаження. Це призводить до так званої "кольорової сліпоти" оператора.

Сучасна світова практика проєктування систем візуалізації базується на стандарті ISA-101 (High-Performance HMI). Згідно з цим стандартом, мнемосхема процесу завантаження шихти має будуватися за принципами ситуаційної обізнаності (Situational Awareness). Це означає:

- Використання сірого фону та монохромних елементів обладнання.
- Відмова від реалістичних 3D-моделей конвеєрів на користь спрощених плоских 2D-символів.
- Яскраві кольори (червоний, жовтий, помаранчевий) використовуються виключно для привернення уваги до аномальних станів (аварій, виходу параметрів за допустимі межі).
- Замість простого виведення цифр (наприклад, витрата "350 т/год") використовуються аналогові шкали з індикацією оптимальної робочої зони. Оператору не потрібно вчитуватись у цифру - він периферійним зором бачить, чи знаходиться показник у "зеленій" зоні.

Впровадження принципів ISA-101 у розроблювану систему дозволить зменшити час реакції оператора на аварійні збурення в процесі шихтозавантаження на 30-40%. [5]

Важливою складовою існуючих систем візуалізації є підсистема обробки тривог. У традиційних системах оператор часто стикається з "лавиною тривог" (Alarm Flood), коли одна технічна несправність (наприклад, зупинка головного конвеєра) викликає каскад з десятків повідомлень від суміжних пристроїв.

Сучасна система візуалізації має будуватися за стандартом ISA-18.2. Налаштування вікон аварійних повідомлень (Alarms) повинно фіксувати вихід параметрів за допустимі межі (наприклад, перевантаження барабанного живильника по струму, заклинювання човникового розподільника або критично низький рівень шихти у бункері). Усі тривоги повинні мати чітку пріоритезацію (Критичні, Важливі, Попереджувальні) та можливість тимчасового маскування (Shelving), щоб не відвертати увагу машиніста від вирішення головної проблеми.

Кожна подія записується у незалежний журнал із точною міткою часу для подальшого ретроспективного аналізу інженерним персоналом. [6]

Класична архітектура SCADA-систем передбачала наявність виділеного комп'ютера-сервера, на якому встановлювалося спеціалізоване програмне забезпечення (Runtime). Це обмежувало доступ до візуалізації технологічного процесу виключно операторською кімнатою.

Сучасним трендом, який буде застосовано у даному дипломному проєкті, є вебвізуалізація. Використання мікропроцесорної техніки нового покоління, такої як контролери Modicon M241 від Schneider Electric, дозволяє перенести графічний сервер безпосередньо в сам ПЛК. Контролер має вбудований Web-сервер на базі технологій HTML5 та розширених можливостей кібербезпеки. Такий підхід докорінно змінює існуючі способи взаємодії з системою:

- Апаратна незалежність: Мнемосхеми завантаження шихти, графіки та журнали тривоги можна переглядати з будь-якого пристрою, що має стандартний веббраузер, будь то промисловий планшет, смартфон керівника цеху чи комп'ютер інженера з АСУ ТП у сусідній будівлі.
- Масштабованість: Відсутня необхідність купувати дорогі клієнтські ліцензії для встановлення додаткових робочих місць.
- Швидкість розгортання: Будь-які зміни, внесені інженером у графічний інтерфейс HMI, автоматично оновлюються у всіх клієнтів при наступному оновленні сторінки у браузері.

Вебвізуалізація ідеально підходить для умов агломераційного виробництва, оскільки дозволяє обслуговуючому персоналу здійснювати діагностику частотних перетворювачів та реле захисту двигунів (перевіряти струми витоку, тепловий стан) перебуваючи безпосередньо біля обладнання за допомогою мобільних пристроїв, що підключені до захищеної внутрішньої мережі (Intranet).

Концепція людино-машинного інтерфейсу, що базується на програмному забезпеченні EcoStruxure Operator Terminal Expert та вебтехнологіях, повністю покриває вимоги до збору даних та диспетчеризації процесу завантаження шихти.

Головна технологічна мнемосхема повинна надавати оператору цілісну картину роботи завантажувального вузла, де чітко візуалізовано локальний контур ПД-регулювання масової витрати та поточний стан усіх приводів (частотних перетворювачів Altivar).

Оскільки ПЛК використовується як центральний агрегатор даних, інтерфейс має містити спеціальні екрани діагностики та енергоменеджменту. На них виводяться графіки споживання електроенергії кожним приводом, ведеться автоматизований облік напрацювання обладнання у мотогодинах та детально контролюється внутрішній стан регуляторів і інтелектуальних модулів мотор-менеджменту (TeSys T).

Таким чином, аналіз існуючих систем показує, що відмова від класичних "важких" SCADA на користь вебвізуалізації та "розумних" панелей НМІ на базі екосистеми Schneider Electric є найбільш раціональним, відмовостійким та економічно вигідним рішенням для автоматизації процесу завантаження шихти на стрічку агломашины.

1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз технологічного процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини, а також огляд існуючих систем керування та візуалізації дозволив виявити низку критичних проблем, що потребують сучасного інженерного вирішення:

- Технологічні недоліки ручного керування: Відсутність автоматичної стабілізації масової витрати шихти та рівня в проміжному бункері призводить до нерівномірного профілю завантаження, погіршення газопроникності шару та зниження якості готового агломерату через "кінцевий перепад".
- Складність об'єкта керування: Наявність значного транспортного (чистого) запізнення в системі (від барабанного живильника до конвеєрних ваг)

робить неможливим використання класичних централізованих ПД-регуляторів через ризик виникнення автоколивань.

- Застаріла апаратна база: Існуючі релейно-контакторні схеми керування характеризуються низькою надійністю в умовах агресивного середовища (пил, вібрації, високі температури) та не мають функцій самодіагностики.
- Інформаційна перевантаженість інтерфейсів: Традиційні HMI/SCADA системи часто не відповідають сучасним ергономічним стандартам, перевантажуючи оператора "лавинами тривог" та відвертаючи увагу анімацією, що підвищує ризик помилок людського фактора.

З огляду на виявлені проблеми, задачею є розробка сучасної, надійної та ергономічної автоматизованої системи керування процесом завантаження шихти. Для досягнення цієї мети у практичній частині роботи необхідно вирішити наступні конкретні завдання:

- Розробити математичну модель процесу завантаження, що враховуватиме транспортне запізнення та динаміку витрати шихти.
- Спроекувати апаратну структуру (САК) на базі концепції розподіленого керування, обравши як центральне ядро ПЛК Modicon, а як локальні регулятори - інтелектуальні частотні перетворювачі Altivar Process.
- Розробити функціональну та принципову схеми автоматизації, що забезпечать надійний збір даних з польових датчиків та керування приводами по промисловій мережі Ethernet.
- Створити алгоритмічне та програмне забезпечення ПЛК для обробки сигналів, контролю аварійних блокувань та синхронізації роботи обладнання.
- Реалізувати систему вебвізуалізації у середовищі EcoStruxure Operator Terminal Expert з використанням стандартів вискоефективного інтерфейсу (ISA-101) та управління тривогами (ISA-18.2).

Висновки за розділом:

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз технологічного процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини як об'єкта автоматизації. Встановлено, що ключовим технологічним показником є рівномірність висоти шару та правильна позитивна сегрегація фракцій, оскільки розподіл крупних гранул вниз, а дрібних зверху безпосередньо впливає на газопроникність та загальну енергоефективність процесу спікання. Аналіз динамічних характеристик об'єкта довів, що даний процес є багатоканальним і нелінійним, з яскраво вираженим чистим транспортним запізненням від 10 до 30 секунд. Така специфіка робить неефективним використання класичного централізованого регулювання та вимагає впровадження розподілених систем, де обробка ПІД-закону відбувається безпосередньо на периферії - на рівні інтелектуальних частотних приводів.

Огляд існуючих систем керування підтвердив технічну та економічну недоцільність подальшої експлуатації застарілих релейних схем. В умовах агресивного середовища агломераційного виробництва, що характеризується високою запиленістю та температурними навантаженнями, необхідний перехід на сучасні відмовостійкі мікропроцесорні комплекси.

Окрім апаратного керування, детально розглянуто сучасні підходи до побудови систем візуалізації та диспетчеризації. Обґрунтовано необхідність застосування технологій вебвізуалізації, що забезпечить кросплатформність та мобільність інженерного персоналу. Відзначено, що проектування інтерфейсів має спиратися на сучасні ергономічні стандарти високоефективного HMI (ISA-101) та раціонального управління тривогами (ISA-18.2), що дозволить суттєво знизити ризик помилок, пов'язаних із людським фактором. На основі проведеного аналізу сформульовано постановку задачі дослідження для практичної реалізації у наступному розділі, обрано апаратну базу екосистеми Schneider Electric та визначено вимоги до розробки програмного й алгоритмічного забезпечення. [5, 6]

РОЗДІЛ 2

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ АВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ НА СТРІЧКУ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

2.1 Розробка математичної моделі процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини

Розробка адекватної математичної моделі є фундаментальним етапом синтезу будь-якої системи автоматичного керування. Математичний опис технологічного об'єкта дозволяє аналітично визначити його динамічні властивості, розрахувати оптимальні налаштування регуляторів та дослідити поведінку системи при впливі збурень без ризику виникнення аварійних ситуацій на реальному обладнанні [2].

Процес завантаження шихти на стрічку агломераційної машини, як об'єкт керування, являє собою послідовне з'єднання кількох технологічних ланок: проміжного бункера, барабанного живильника (з електроприводом) та безпосередньо стрічки конвеєра. Для побудови математичної моделі приймемо наступні допущення, які є загальноприйнятими при моделюванні дозувально-вагових комплексів:

- Матеріал (шихта) вважається неперервним середовищем;
- Втрати матеріалу (просипанням повз стрічку) під час транспортування нехтуємо;
- Насипна густина матеріалу в межах одного короткого циклу розрахунку вважається сталою величиною [1].

Модель проміжного бункера. Проміжний бункер з точки зору теорії керування є ємністю, що накопичує матеріал. Його стан описується диференціальним рівнянням матеріального балансу.

					КНУ КРБ.151.26.06.02.ПЗ		
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Киловатий М.				РОЗДІЛ 2	Літера	Аркуш
Перевір.	Рубан С.А.						27
							44
Н. контр.	Маринич І.А.					АКНТ АКІТ-22	
Затверд.	Маринич І.А.						

Зміна маси шихти в бункері дорівнює різниці між вхідним та вихідним масовими потоками [1, 8]:

$$\frac{dM_b(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (2.1)$$

де: $M_b(t)$ - маса шихти в бункері в момент часу t , кг;

$Q_{in}(t)$ - масова витрата шихти, що надходить у бункер зі збірного конвеєра, кг/с;

$Q_{out}(t)$ - масова витрата шихти, яку вивантажує барабанний живильник, кг/с.

Переходячи до операторної форми за допомогою перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, передавальна функція бункера набуває вигляду ідеальної інтегруючої ланки [8]:

$$W_b(p) = \frac{M_b(p)}{Q_{in}(p) - Q_{out}(p)} = \frac{1}{p} \quad (2.2)$$

Модель барабанного живильника та його електропривода. Масова витрата матеріалу з бункера прямо пропорційна кутовій швидкості обертання барабанного живильника. Ця залежність має лінійний характер у робочому діапазоні швидкостей [2]:

$$Q_{out}(t) = k_f \cdot \omega(t) \quad (2.3)$$

де k_f - конструктивний коефіцієнт живильника, що залежить від його радіуса, ступеня відкриття шиберу та поточних реологічних властивостей шихти (кг/рад).

Сам барабан приводиться в рух асинхронним електродвигуном під керуванням частотного перетворювача. Враховуючи інерцію масивного ротора та масу шихти, що знаходиться на барабані, електропривод описується диференціальним рівнянням першого порядку (аперіодична ланка) [4, 8]:

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt + \omega}(t) = k_m \cdot U_{ref}(t) \quad (2.4)$$

де: T_m - електромеханічна постійна часу привода, що характеризує час розгону барабана;

$U_{ref}(t)$ - керуючий сигнал від ПЛК;

k_m - коефіцієнт передачі привода від керуючого сигналу до швидкості.

Виконавши перетворення Лапласа для рівнянь живильника та привода, отримаємо загальну передавальну функцію виконавчого механізму [4]:

$$W_f(p) = \frac{Q_{out}(p)}{U_{ref}(p)} = \frac{k_m \cdot k_f}{T_m p + 1} \quad (2.5)$$

Модель стрічки агломашины та формування шару. Головною особливістю процесу є наявність чистого транспортного запізнення. Матеріал, вивантажений живильником у момент часу t , досягне конвеєрних ваг та датчика висоти (встановлених далі по ходу руху стрічки) лише через час. Це запізнення визначається відстанню від точки падіння шихти до датчика та швидкістю руху стрічки [3, 8]:

$$\tau = \frac{L}{V_{belt}}$$

Погонне навантаження на стрічці $q(t)$, яке безпосередньо вимірюється конвеєрними вагами (кг/м), розраховується з урахуванням цього запізнення:

$$q(t) = \frac{Q_{out}(t - \tau)}{V_{belt}} \quad (2.6)$$

Тоді головний технологічний параметр - фактична висота шару шихти на стрічці $H(t)$ (метри), визначається за формулою об'ємно-масового балансу [3]:

$$H(t) = \frac{q(t)}{B \cdot \rho} = \frac{Q_{out}(t - \tau)}{V_{belt} \cdot B \cdot \rho} \quad (2.7)$$

де: B - ширина стрічки агломашины, м;

ρ - поточна насипна густина шихти, кг/м³.

У термінах перетворення Лапласа ланка чистого запізнення описується експоненційною функцією $e^{-p\tau}$ [8]. Таким чином, передавальна функція від сигналу керування приводом $U_{ref}(p)$ до висоти шару шихти $H(p)$ матиме вигляд:

$$W_{obj}(p) = \frac{H(p)}{U_{ref}(p)} = \frac{k_m \cdot k_f}{V_{belt} \cdot B \cdot \rho} \cdot \frac{e^{-p\tau}}{T_m p + 1}$$

Для спрощення запису введемо загальний коефіцієнт передачі об'єкта:

$$K_{obj} = \frac{k_m \cdot k_f}{V_{belt} \cdot B \cdot \rho}$$

Оскільки контури регулювання висоти шару $H(t)$ та масової витрати $Q(t)$ є динамічно еквівалентними та пов'язаними через статичний коефіцієнт об'ємно-масового перерахунку (рівняння 2.9), для спрощення синтезу регулятора в Simulink здійснюється перехід до передавальної функції об'єкта за каналом витрати $W_{obj}(p)$ з еквівалентним коефіцієнтом передачі $K_{obj} = 1.2$.

Тоді фінальна математична модель технологічного об'єкта керування набуває канонічного вигляду аперіодичної ланки першого порядку з чистим запізненням [3, 8]:

$$W_{obj}(p) = \frac{K_{obj} \cdot e^{-p\tau}}{T_m p + 1} \quad (2.8)$$

Отримана передавальна функція математично підтверджує складність об'єкта керування. Наявність множника $e^{-p\tau}$ є критичним дестабілізуючим фактором для класичних ПІД-регуляторів. Крім того, коефіцієнт передачі K_{obj} не є постійним, він обернено пропорційний насипній густині шихти, яка постійно змінюється залежно від вологості матеріалу.

Звідси випливає фундаментальний для даної кваліфікаційної роботи висновок: надійна система автоматизації повинна базуватися не лише на контролі висоти шару, а й на жорсткій стабілізації масової витрати $Q_{out}(t)$ безпосередньо в контурі частотного перетворювача барабанного живильника. Це дозволить

миттєво реагувати на збурення, мінімізуючи негативний вплив транспортного запізнення [2, 4].

2.2 Вибір та обґрунтування апаратних засобів реалізації системи керування завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

Синтез сучасної системи автоматизації починається з вибору базової програмно-апаратної платформи. Ураховуючи екстремальні умови експлуатації агломераційного виробництва, апаратні засоби повинні мати високий клас захисту (не нижче IP65 для польового обладнання) та підтримувати сучасні протоколи зв'язку для мінімізації кількості аналогових ліній [2, 3].

Спираючись на досвід, отриманий під час переддипломної практики, та враховуючи наявну лабораторну базу для подальшого тестування алгоритмів, для реалізації даного дипломного проєкту обрано концепцію розподіленого керування "Edge Control" на базі екосистеми Schneider Electric. Обрана гетерогенна структура системи автоматизації фізично та логічно розділяється на кілька взаємопов'язаних рівнів. Нижній, польовий рівень, формується з високоточних первинних перетворювачів (радарних рівнемірів, тензометричних ваг, енкoderів) від компанії Siemens, що довели свою надійність у важкій промисловості. Середній рівень керування будується на базі програмованого логічного контролера та інтелектуальних частотних перетворювачів Schneider Electric, які об'єднуються по промисловій мережі Industrial Ethernet (протокол Modbus TCP/IP). Верхній рівень диспетчеризації представлений вебсерверною панеллю оператора, що забезпечує візуалізацію даних у режимі реального часу та архівування тривог [4, 9].

Як головний обчислювальний центр системи автоматичного регулювання обрано високопродуктивний логічний контролер Modicon M241 від Schneider Electric. Цей вибір є оптимальним як з точки зору технічних характеристик, так і з огляду на можливість практичної апробації алгоритмів на лабораторному обладнанні.



Рисунок 2.1 - Програмований логічний контролер Modicon M241

Застосування даного контролера обґрунтовано наступними ключовими перевагами:

- Двоядерна архітектура процесора: Одне ядро виділено виключно для виконання логічних завдань технологічної програми , а друге - для обробки комунікаційних запитів. Це гарантує, що інтенсивний обмін даними з частотними приводами чи SCADA-системою не сповільнить час реакції контролера (час виконання однієї булевої інструкції становить лише 22 наносекунди).
- Широкі комунікаційні можливості: Наявність вбудованого порту Ethernet дозволяє легко інтегрувати контролер у цехову мережу. Крім того, наявність вбудованого Web-сервера дозволяє зберігати HTML5-сторінки візуалізації безпосередньо в пам'яті ПЛК, забезпечуючи віддалений доступ до керування через стандартні веббраузери без необхідності встановлення додаткового серверного обладнання.
- Вбудовані канали вводу/виводу та швидкісні лічильники: Контролер оснащений інтегрованими транзисторними та релейними виходами, а також дискретними входами, частина з яких апаратно підтримує функцію

високошвидкісних лічильників (HSC). Це дозволяє обробляти імпульси високої частоти (до 100 кГц) без завантаження основного циклу програми.

Хоча контролер Modicon M241 має на борту інтегровані дискретні входи та виходи, що частково перекриває потреби системи, для повноцінного керування лінією завантаження шихти їхньої кількості недостатньо. Крім того, виникає об'єктивна необхідність в обробці аналогових сигналів. Тому для масштабування системи застосовуються модулі розширення серії Modicon TM3, які підключаються безпосередньо до контролера по внутрішній високошвидкісній шині, що забезпечує швидкість обміну даними до 10 разів вищу за традиційні рішення. Для обробки стандартних струмових сигналів 4-20 мА від радарного рівнеміра проміжного бункера та тензометричних конвеєрних ваг передбачено використання аналогового комбінованого модуля TM3AM6, що забезпечує необхідну 12-бітну роздільну здатність. Збір додаткових дискретних сигналів, таких як стан аварійних тросових вимикачів, датчиків сходу стрічки, а також подача керівних сигналів на попереджувальну світлозвукову сигналізацію, реалізується за допомогою модулів дискретного вводу-виводу. Важливою інженерною перевагою є те, що обробка високочастотних імпульсів від енкодера (для визначення швидкості руху стрічки) здійснюється безпосередньо апаратними високошвидкісними лічильниками, вбудованими у сам процесорний модуль M241, що позбавляє необхідності додавати в систему окремий дорогий модуль швидкісного лічення [9].

Для забезпечення заданої продуктивності та безперервності технологічного процесу критично важливим є точне керування швидкістю руху стрічкових конвеєрів та барабанного живильника. З цією метою як виконавчі пристрої обрано інтелектуальні частотні перетворювачі серії Altivar Process виробництва Schneider Electric. Вибір саме цієї лінійки обґрунтований її оптимізацією для важких промислових процесів із переміщенням сипучих матеріалів та рідин. Важливою апаратною особливістю приводів ATV930 є наявність конформного покриття

друкованих плат за класом 3С3, що забезпечує надійний захист електроніки від агресивних сірчистих газів, характерних для зони запального горна аглофабрики.



Рисунок 2.2 - Частотний перетворювач Altivar Process сімейства ATV

Крім того, ці перетворювачі мають знижений рівень генерації вищих гармонік завдяки вбудованим дроселям, що мінімізує негативний вплив на загальну цехову електромережу. Завдяки нативній підтримці протоколу Modbus TCP, частотні перетворювачі підключаються до контролера M241 єдиним кабелем Ethernet. Це дозволяє ПЛК не лише передавати керуючі команди (завдання швидкості, пуск, зупинка), але й зчитувати глибоку аналітику в режимі реального часу, таку як споживана потужність, дійсний струм навантаження, температурний стан статора двигуна та коди помилок, що є основою для побудови системи предиктивного обслуговування [4].

Для керування асинхронними електродвигунами механізмів, які працюють у режимі прямого пуску без зміни частоти обертання, передбачено застосування інтелектуальних систем керування двигунами TeSys T (модуль LTMR). Традиційні теплові реле не здатні забезпечити комплексний моніторинг у складних умовах експлуатації. Натомість система TeSys T здійснює прецизійний тепловий захист електродвигуна, базуючись на математичній моделі його нагріву. Пристрій

дозволяє фіксувати асиметрію або обрив фаз, струми витоку на землю, а також виявляти механічне заклинювання ротора, що є типовою проблемою для човникових розподільників при налипанні вологої шихти. Інтеграція модулів TeSys T у загальну мережу дозволяє оператору дистанційно скидати помилки та контролювати струмові навантаження безпосередньо з екрана HMI [12].

Оскільки точність дозування є вирішальним фактором якості готового агломерату, до вибору первинних вимірювальних приладів висуваються найжорсткіші вимоги щодо перешкодозахищеності та стабільності роботи в умовах сильного пилоутворення. Для безперервного вимірювання рівня шихти в проміжному бункері обрано безконтактний радарний рівнемір серії SITRANS LR560 від компанії Siemens. Його вибір зумовлений використанням технології безперервного частотно-модульованого випромінювання на надвисокій частоті 78 ГГц. Завдяки такій частоті прилад формує надзвичайно вузький мікрохвильовий промінь (з кутом розходження лише 4 градуси), що дозволяє уникнути хибних відбиттів від металевих стінок бункера. Мікрохвилі даного діапазону легко проникають крізь щільну хмару абразивного пилу, яка утворюється під час пересипання шихти, гарантуючи міліметрову точність вимірювання незалежно від умов оптичної видимості [10].

Для організації головного зворотного зв'язку в контурі стабілізації масової витрати передбачено використання високоточних конвеєрних ваг SITRANS MSI. Ці ваги вбудовуються безпосередньо у роликоопори конвеєра і оснащені тензорезистивними датчиками з нержавіючої сталі, які мають клас захисту IP56 або IP67 та відрізняються високою стійкістю до ударних і вібраційних навантажень. Для коректного розрахунку продуктивності тензометрична система працює у парі з датчиком швидкості руху стрічки SITRANS WS300. Сигнали від ваг надходять на спеціалізований ваговий перетворювач, а імпульси від датчика швидкості обробляються вбудованими високошвидкісними лічильниками контролера M241, де програмно розраховується фактична масова витрата шихти, що подається на рухомі палети агломашини [11].

2.3 Проєктування системи керування завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

Розробка проєктної документації є невід'ємною та критично важливою складовою створення будь-якої автоматизованої системи керування технологічними процесами. Для забезпечення високої якості інженерних рішень, уникнення помилок при монтажі та відповідності сучасним міжнародним стандартам, проєктування апаратної частини системи візуалізації та керування завантаженням шихти виконувалося у спеціалізованому середовищі автоматизованого проєктування EPLAN Education. Використання даної САПР дозволило реалізувати наскрізне проєктування, починаючи від розробки базової логіки на функціональних схемах і закінчуючи генерацією принципових електричних схем. Завдяки вбудованим інструментам EPLAN було забезпечено автоматичний контроль перетинів кабельних ліній, перевірку струмових навантажень та строгу відповідність графічних умовних позначень вимогам європейських електротехнічних стандартів, а також вітчизняному стандарту щодо правил виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів [13, 14].

Основою для розуміння принципів взаємодії технологічного обладнання та засобів автоматизації є розроблена функціональна схема автоматизації. На ній графічно відображено технологічний потік переміщення шихти від проміжного бункера до рухомих палет агломераційної машини, а також місця встановлення первинних перетворювачів і виконавчих механізмів. Логіка роботи системи на функціональній схемі розділена на три основні взаємопов'язані контури керування. Головним є контур стабілізації масової витрати шихти, який реалізовано за концепцією розподіленого керування (Edge Control). Його робота базується на отриманні даних від тензOMETричних конвеєрних ваг SITRANS MSI (WT001) та датчика швидкості стрічки SITRANS WS300 (ST002), підключеного до

модуля швидкісного лічильника контролера Modicon M241. Контролер виконує роль координатора: він математично обчислює фактичну масову витрату (т/год) і по промисловій мережі Modbus TCP миттєво передає це значення (як змінну зворотного зв'язку) разом із заданою уставкою на частотний перетворювач Altivar Process ATV930. Згідно з обраною архітектурою, математичний апарат ПД-регулювання виконується автономно вбудованим мікропроцесором самого частотного перетворювача, який безпосередньо і без затримок змінює частоту обертання електродвигуна барабанного живильника для компенсації будь-яких відхилень у потоці матеріалу [4, 11].

Другим надзвичайно важливим контуром на функціональній схемі є система контролю та захисту проміжного бункера. Безконтактний радарний рівнемір SITRANS LR560 безперервно сканує поверхню шихти крізь шар пилу. Уніфікований аналоговий сигнал 4-20 мА від радара надходить на модуль розширення ПЛК. Логіка контролера налаштована таким чином, що при зниженні рівня шихти нижче критичної позначки (наприклад, 20% від номінальної ємності), система автоматично формує сигнал аварійної тривоги для оператора та ініціює програмне блокування - плавну зупинку барабанного живильника. Це технічне рішення запобігає повному спорожненню бункера, що могло б призвести до прямого удару матеріалу (при відновленні подачі) по живильнику та його механічного пошкодження [10]. Третій контур функціональної схеми охоплює керування човниковим розподільником. Оскільки цей механізм здійснює постійні зворотно-поступальні рухи, для керування його реверсивним асинхронним електродвигуном на схемі передбачено інтелектуальне реле TeSys T. Воно отримує команди напрямку руху від контролера M241 і забезпечує миттєве відключення приводу у разі виявлення струмів механічного заклинювання [12].

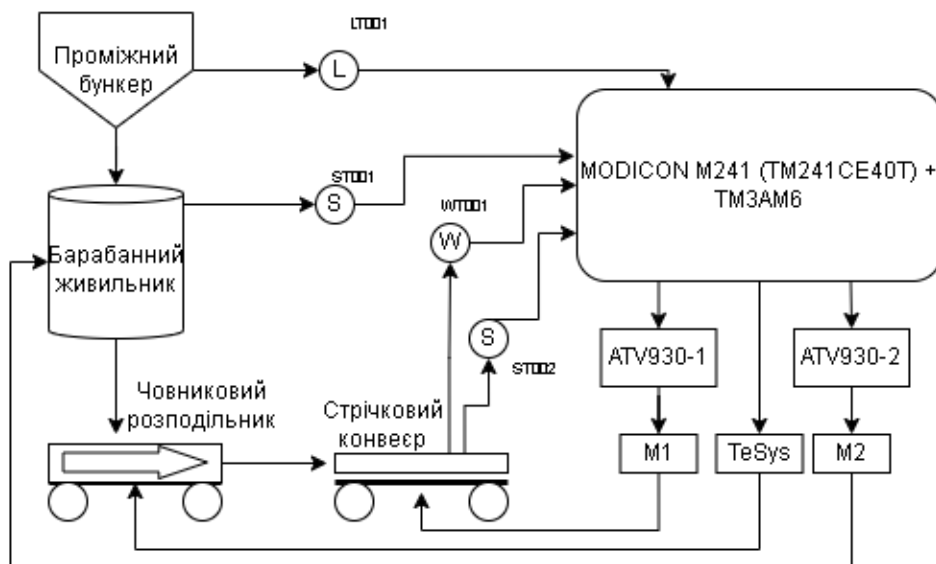


Рисунок 2.3 - Функціональна схема автоматизації процесу завантаження
ШИХТИ

Перехід від логічної концепції до фізичної реалізації відображено на розробленій схемі електричній принциповій. Силова частина схеми живиться від промислової трифазної мережі змінного струму напругою 380 В. Для кожного виконавчого механізму (двигуни конвеєрів, барабанного живильника та розподільника) передбачено індивідуальні автоматичні вимикачі з електромагнітними та тепловими розчеплювачами для захисту від струмів короткого замикання. Особливу увагу при проєктуванні силових кіл частотних перетворювачів Altivar Process було приділено питанням електромагнітної сумісності (ЕМС). Оскільки потужні інвертори є джерелом високочастотних завад, підключення електродвигунів до частотних перетворювачів на схемі виконано спеціальним екранованим кабелем з обов'язковим заземленням екрану з обох боків, що виключає наведення паразитних ЕРС на чутливі кола вимірювальних датчиків [4, 14].

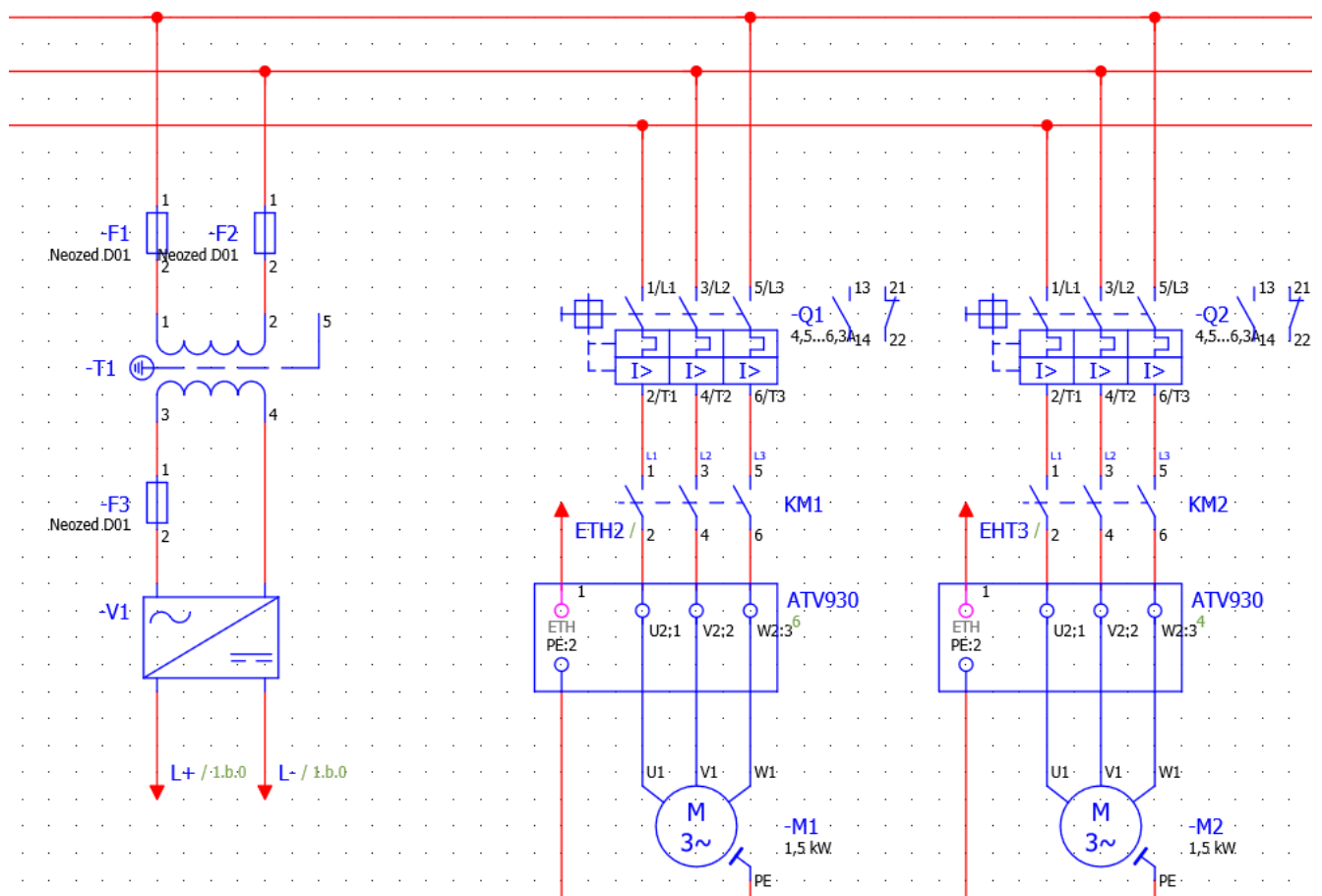


Рисунок 2.4 - Схема електрична принципова (силова частина)

Кола керування та живлення мікропроцесорної техніки побудовані на базі безпечної постійної напруги 24 В, джерелом якої є промисловий імпульсний блок живлення з функцією захисту від перенапруг. На принциповій схемі детально розмальовано підключення первинних датчиків до модулів ПЛК. Радарний рівнемір підключається за класичною двопровідною схемою ("струмова петля" 4-20 мА), де живлення датчика та передача корисного сигналу здійснюються по одній парі проводів, підведених до аналогового модуля ТМ3АМ6. Сигнали від аварійних тросових вимикачів, змонтованих вздовж конвеєра, послідовно з'єднані в єдиний ланцюг безпеки (Hardware Interlock) і заведені на дискретні входи ПЛК. Імпульсний вихід датчика швидкості стрічки фізично підключено до спеціалізованих клем процесорного модуля Modicon M241, що програмно сконфігуровані як високошвидкісні лічильники. Комунікаційна інфраструктура

схеми базується на топології "зірка" із застосуванням промислових комутаторів (Industrial Ethernet Switch). По кабелях типу "кручена пара" (категорії 5е з екрануванням) контролер M241 здійснює безперервний обмін регістрами Modbus TCP з частотними перетворювачами, реле TeSys T та передає глобальні дані на панель оператора, що забезпечує високу надійність і детермінованість передачі керуючих команд [9, 12].

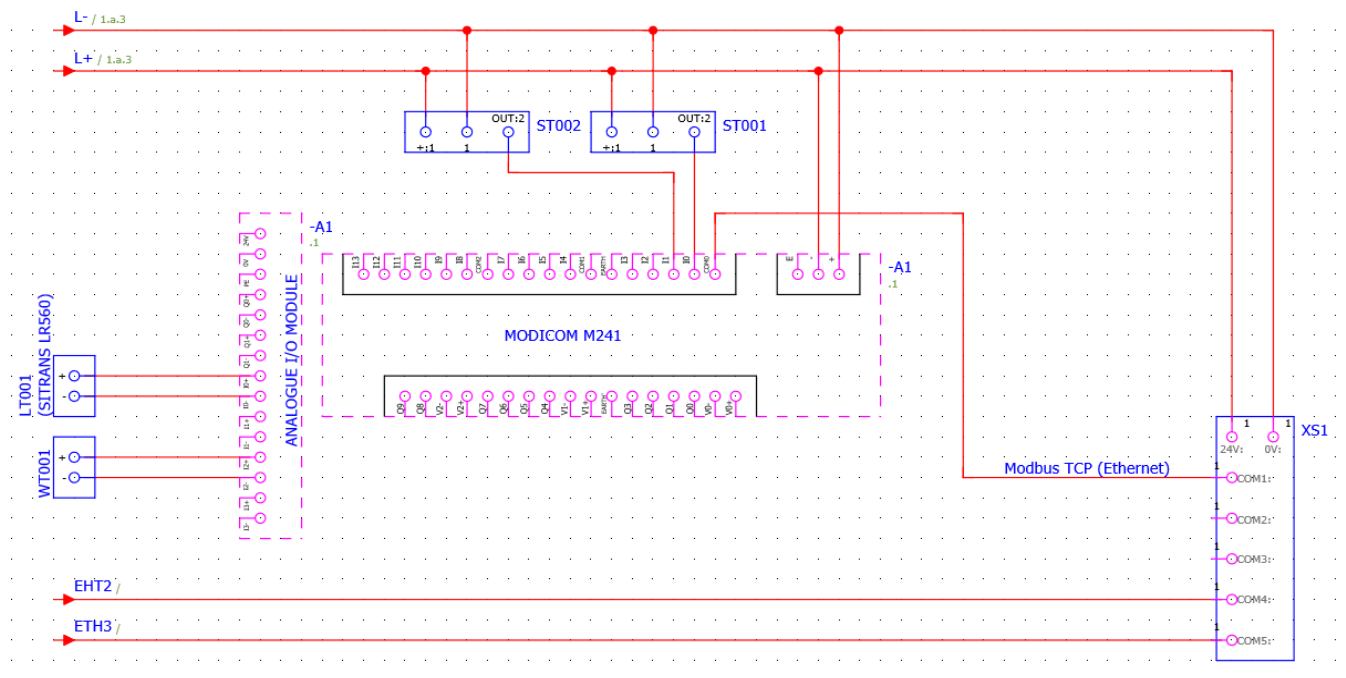


Рисунок 2.5 - Схема електрична принципова (кола керування та ПЛК)

Конструктивне розташування та монтаж обраного комплексу технічних засобів автоматизації детально відображено на розробленому кресленні компонування шафи автоматизації. Всі елементи системи раціонально та компактно розміщено всередині єдиної металевої шафи габаритними розмірами 1690×700мм з монтажною панеллю. Незважаючи на те, що розмір шафи до певної міри є надлишковим, додаткове місце може бути використане в майбутньому для встановлення нового обладнання та менеджменту кабелів. На верхній DIN-рейці монтуються ввідні автомати захисту -Q1 та -Q2, а також імпульсний блок живлення. Середня DIN-рейка виділена для встановлення процесорного модуля

Modicon M241, аналогового модуля ТМ3АМ6 та промислового Ethernet-комутатора. У нижній частині монтажної панелі вертикально встановлено два інтелектуальні частотні перетворювачі Altivar ATV930 потужністю по 1,5кВт кожен. Таке просторове розташування компонентів забезпечує оптимальний тепловий режим всередині шафи, виключає перегрів силових транзисторів частотників та гарантує зручний доступ обслуговуючого персоналу до клемних колодок при проведенні пусконаладжувальних робіт [9, 14].

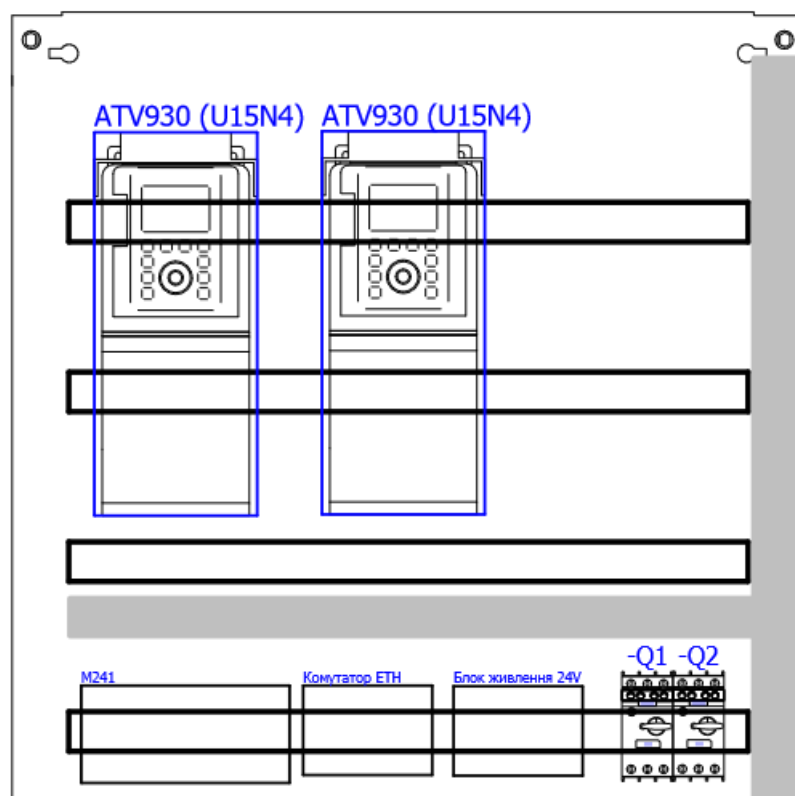


Рисунок 2.6 - Креслення компоновки шафи автоматизації

2.4 Алгоритмічне забезпечення системи керування

Алгоритмічне забезпечення є інтелектуальним ядром розроблюваної системи автоматизації, що визначає сувору послідовність взаємодії апаратних засобів, первинних перетворювачів та виконавчих механізмів у часі. Розробка програмної логіки базується на вимогах технологічної безпеки агломераційного

виробництва та необхідності мінімізації негативного впливу людського фактора. Для наочного представлення та подальшого кодування логіки в середовищі розробки ПЛК, загальний алгоритм роботи системи розбито на кілька програмних станів (автоматів станів), графічне відображення яких виконано у вигляді блок-схем відповідно до міжнародного стандарту документування алгоритмів ISO 5807 [15].

Робота автоматизованої системи передбачає функціонування у двох основних режимах: місцевому (налагоджувальному) та автоматичному (основному). Місцевий режим призначений для проведення ремонтних робіт, технічного обслуговування або ліквідації технологічних завалів шихти. У цьому режимі контур ПІД-регулювання деактивується, а оператор отримує можливість незалежно керувати кожним механізмом безпосередньо з панелі НМІ за допомогою дискретних команд. Проте, навіть у налагоджувальному режимі алгоритм контролера Modicon M241 продовжує безперервно опитувати стан систем безпеки (тросові вимикачі, кнопки аварійної зупинки), щоб унеможливити запуск обладнання при загрозі життю персоналу. Автоматичний режим є основним експлуатаційним станом, у якому весь комплекс механізмів працює як єдина синхронізована система, керована комплексною циклограмою [3].

Ключовим етапом автоматичного режиму є блок передпускового контролю. Перед тим, як контролер видасть дозвіл на ініціалізацію пускової циклограми, алгоритм здійснює перевірку готовності всіх підсистем. Насамперед зчитуються дані з радарного рівнеміра SITRANS LR560: якщо рівень шихти у проміжному бункері становить менше 20% від номінальної ємності, пуск блокується через відсутність достатньої кількості матеріалу для формування стабільного шару. Далі перевіряється апаратний статус виконавчих механізмів по мережі Modbus TCP: частотний перетворювач Altivar Process та модуль керування двигуном TeSys T повинні надіслати статус "Готовий до роботи" (відсутність внутрішніх теплових перевантажень або помилок зв'язку). Завершальною стадією передпускового контролю є перевірка ланцюга безпеки. Якщо всі умови виконуються, алгоритм

переводить систему в стан готовності та очікує керуючої команди від оператора-агломератника [9, 10, 12].

Після успішного проходження передпускового контролю та отримання команди "Пуск", ініціюється сувора технологічна циклограма запуску механізмів. Фундаментальним правилом транспортування сипучих матеріалів є запуск конвеєрних ліній строго проти напрямку вантажопотоку. Алгоритм починає роботу з увімкнення попереджувальної світлозвукової сигналізації тривалістю десять секунд, що є обов'язковою вимогою техніки безпеки для оповіщення персоналу про початок руху механізмів. На наступному кроці контролер подає команду на запуск човникового розподільника через реле TeSys T. Після підтвердження його роботи, ініціюється плавний розгін головної стрічки агломашини. Контролер переходить у режим очікування і продовжує виконання циклограми лише тоді, коли від датчика швидкості стрічки надійдуть імпульси, що підтверджують досягнення нею номінальної робочої швидкості. Лише на фінальному етапі ПЛК надсилає команду на частотний перетворювач барабанного живильника, ініціюючи безпосередню подачу шихти на рухому стрічку. Такий алгоритм гарантовано запобігає утворенню завалів матеріалу на перевантажувальних вузлах [3, 12].

Перехід системи у стаціонарний робочий режим активує головний контур стабілізації витрати шихти, який реалізує раніше описану концепцію "Edge Control". У цьому стані логіка роботи розподіляється між ПЛК та частотним приводом. Програмний блок контролера M241 у кожному циклі сканування зчитує погонне навантаження з конвеєрних ваг (кг/м) та лінійну швидкість стрічки (м/с). Перемножуючи ці величини та застосовуючи фільтрацію шумів ковзним середнім, контролер розраховує фактичну масову витрату у тоннах на годину. Ця обчислена змінна, разом із заданою оператором уставкою, миттєво відправляється по мережі Ethernet до частотного перетворювача Altivar Process. Далі мікропроцесор частотного привода автономно обробляє ці дані через свій внутрішній ПІД-регулятор і динамічно коригує кутову швидкість обертання барабанного

живильника, компенсуючи нерівномірності потоку матеріалу без затримок на передачу керуючих сигналів від центрального контролера[4, 9].

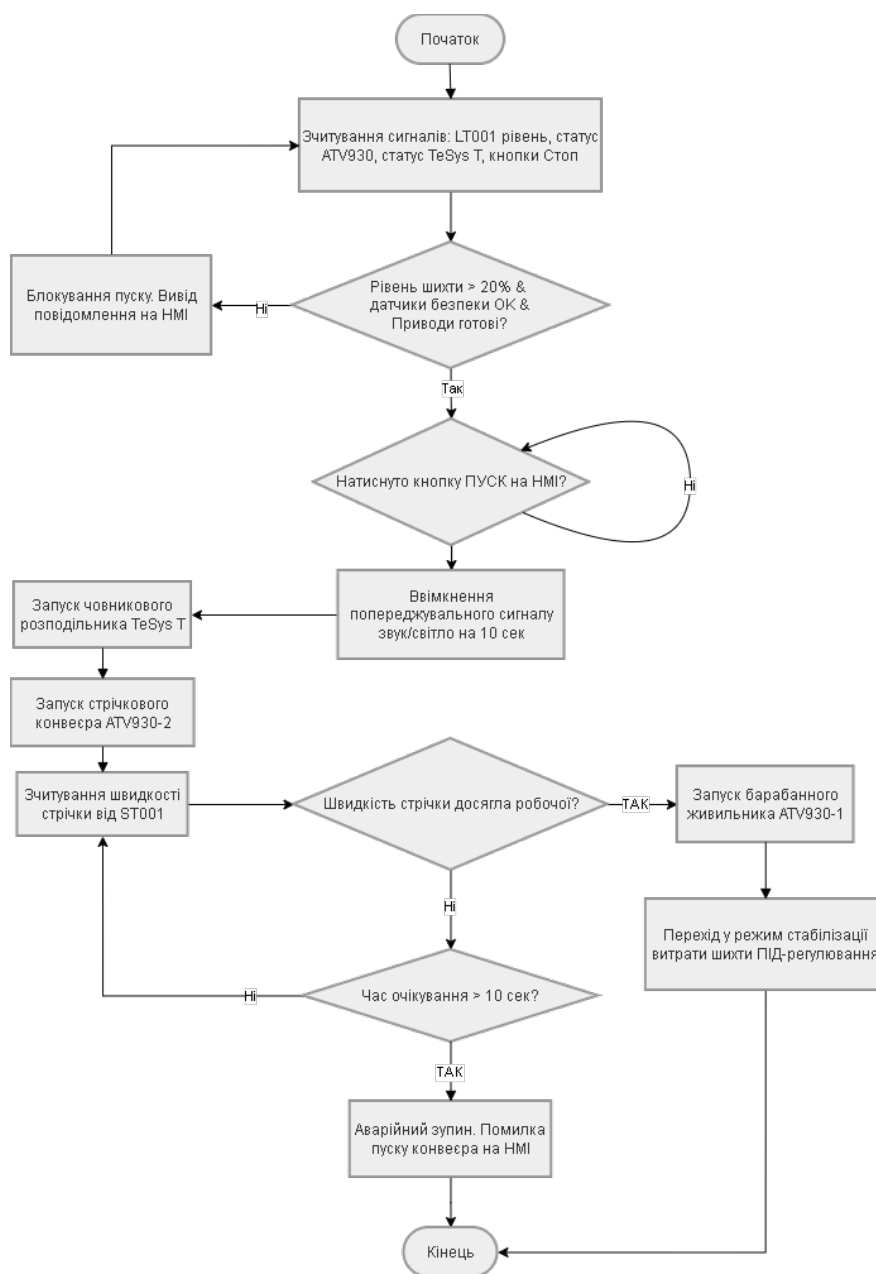


Рисунок 2.7 - Блок-схема алгоритму керування

Алгоритм нормальної технологічної зупинки кардинально відрізняється від пускової циклограми і виконується по ходу вантажопотоку для забезпечення повного звільнення конвеєрів від матеріалу. При отриманні команди на зупинку, контролер насамперед плавно знижує частоту перетворювача барабанного

живильника до повної зупинки, припиняючи подачу шихти з бункера. З цього моменту в алгоритмі запускається програмний таймер спорожнення стрічки. Час таймера розраховується динамічно, виходячи з поточної швидкості конвеєра та відстані від живильника до кінця стрічки. Паралельно ПЛК контролює покази тензометричних ваг: коли вага падає до нульового значення і таймер спорожнення завершує відлік, система робить висновок про відсутність матеріалу на тракті. Тільки після цього подаються команди на зупинку головної стрічки та човникового розподільника. Даний логічний підхід збільшує робочий ресурс механізмів, оскільки виключає необхідність важкого пуску навантаженої стрічки після зупинки [3]. Зображення блок-схеми алгоритму технологічної та аварійної зупинки зображений на рисунку 2.4.2.

Окремим програмним блоком найвищого пріоритету реалізовано алгоритм аварійної зупинки. Цей блок виконується незалежно від поточного стану системи. У разі спрацювання будь-якого апаратного захисту, наприклад, при виявленні інтелектуальним реле TeSys T критичного перевищення струму через заклинювання човникового розподільника, або при натисканні аварійної кнопки, логіка контролера миттєво ігнорує всі технологічні таймери та одночасно відключає живлення всіх приводів системи. Паралельно генерується код помилки, який фіксується у незалежному журналі тривог на панелі НМІ з точним відбитком часу, після чого система блокується до ручного квітування (підтвердження) аварії інженерним персоналом [12, 15].

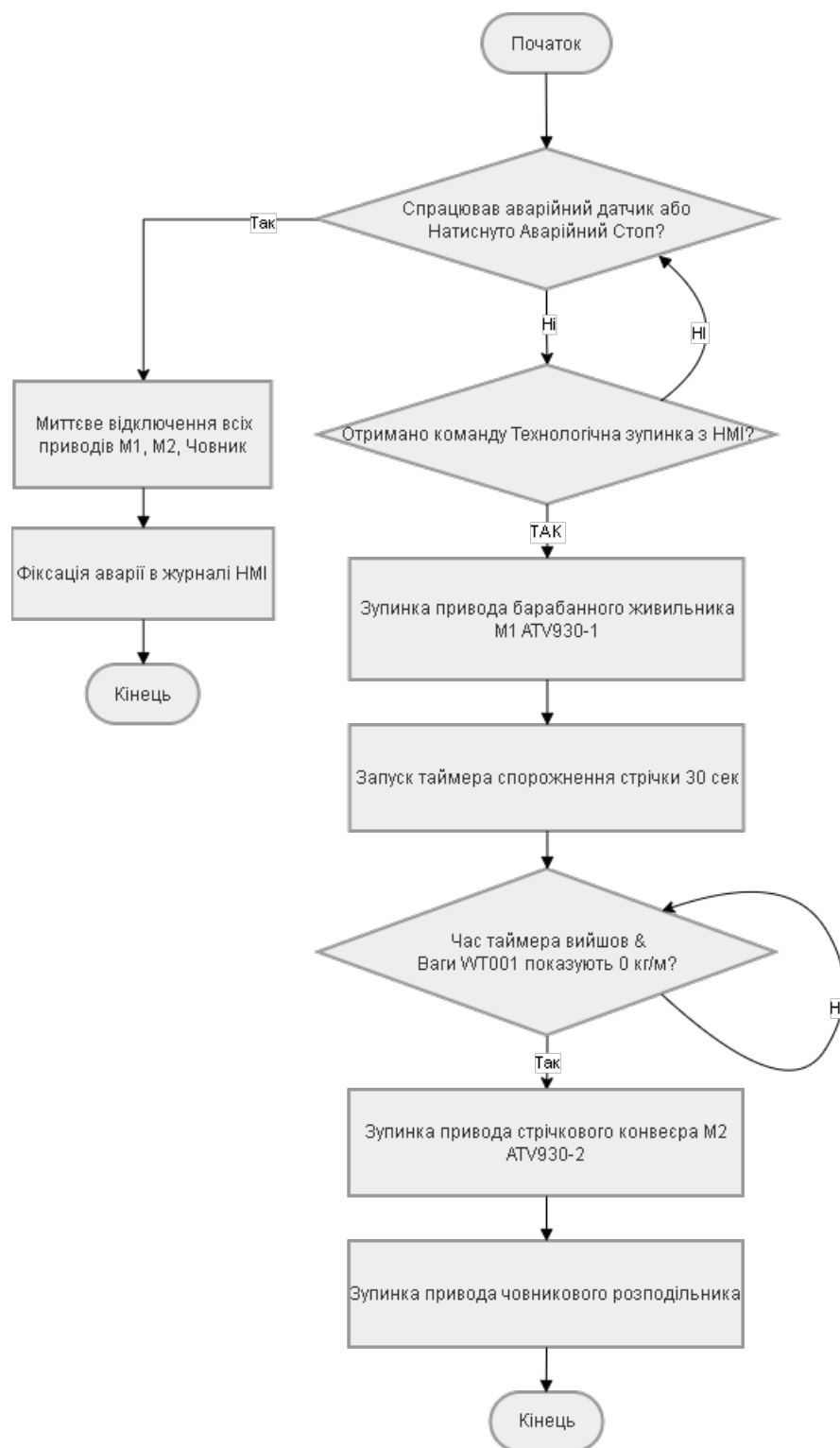


Рисунок 2.8 - Блок-схема алгоритмів нормальної технологічної та аварійної зупинки

2.5 Комп'ютерне моделювання САК завантаженням шихти на стрічку агломераційної машини

Для теоретичного підтвердження працездатності обраної двоконтурної структури керування та оцінки динамічних показників якості регулювання було розроблено комп'ютерну імітаційну модель системи в середовищі Simulink. Моделювання дозволяє дослідити поведінку системи при відпрацюванні завдання оператора, а також перевірити її стійкість при впливі випадкових зовнішніх завад, що є типовими для реальних умов аглофабрики [8].

Структурна схема імітаційної моделі побудована на основі виведених у підрозділі 2.1 передавальних функцій і містить кілька базових блоків бібліотеки Simulink. Як вхідний сигнал завдання використовується блок Step, який генерує стрибкоподібну зміну уставки продуктивності конвеєра. Сигнал уставки надходить на суматор, де з нього віднімається сигнал зворотного зв'язку, формуючи похибку регулювання. Оскільки контур регулювання масової витрати закладено в мікропроцесор частотного перетворювача, блок регулятора в Simulink імітується стандартним блоком PID Controller, сконфігурованим для роботи за пропорційно-інтегральним (ПІ) законом. Вихід регулятора підключено до передавальної функції аперіодичної ланки першого порядку Transfer Fcn, яка відтворює інерційність електропривода живильника з постійною часу розгону двигуна. Транспортне запізнення стрічки конвеєра, яке є критичним фактором для стабільності системи, моделюється спеціалізованим блоком Transport Delay [4, 8].

Для імітації випадкових збурень, таких як нерівномірність надходження матеріалу або зміна його вологості та густини, у модель введено додатковий суматор перед блоком запізнення, куди підключено генератор випадкових сигналів або блок одиничного зсуву. Вихідний сигнал системи, що відображає поточну висоту шару шихти, заведено на вхід зворотного зв'язку через блок Scope

(віртуальний осцилограф), який використовується для візуалізації та реєстрації перехідних процесів.

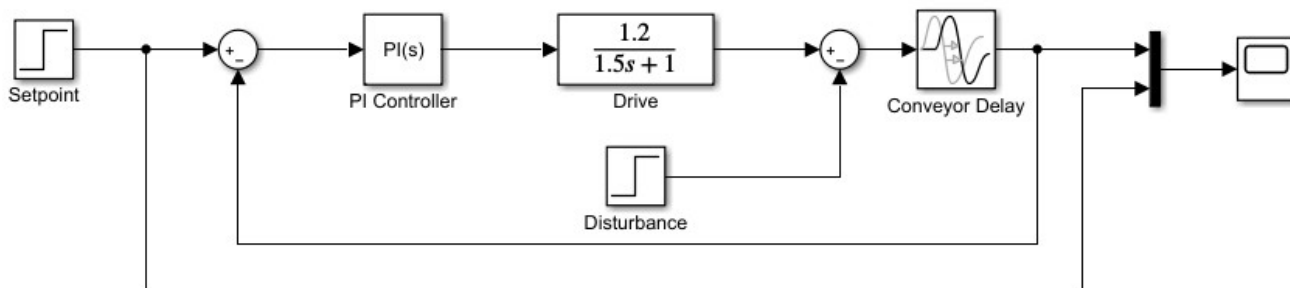


Рисунок 2.9 - Структурна схема імітаційної моделі САК у середовищі MATLAB/Simulink

Налаштування параметрів регулятора для об'єктів із чистим транспортним запізненням є складним інженерним завданням. Присутність ланки запізнення вносить фазовий зсув у контур зворотного зв'язку, що при неправильному виборі коефіцієнтів призводить до виникнення автоколивань та втрати стійкості. Для розрахунку коефіцієнтів регулятора прийнято параметри об'єкта, визначені на основі паспортних даних обладнання: постійна часу привода живильника $T_m = 1,5$ с, час транспортного запізнення стрічки $\tau = 15$ с, загальний коефіцієнт передачі об'єкта $K_{obj} = 1,2$ [3, 8].

Оскільки час запізнення значно перевищує постійну часу привода ($\tau \gg T_m$), використання класичного диференціального закону регулювання (D-складової) є недоцільним, оскільки диференціатор різко реагуватиме на шум вимірювальних приладів і викликати коливання виконавчого механізму. З цієї причини було обрано пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІ-регулятора виконано за модифікованим аналітичним методом налаштування для об'єктів із запізненням. Згідно з цим методом, параметри регулятора розраховуються за формулами, що забезпечують отримання аперіодичного перехідного процесу без перерегулювання [8]:

$$K_p = \frac{T_m}{K_{obj} \cdot \tau} = \frac{1,5}{1,2 \cdot 15} \approx 0,083 \quad (2.9)$$

$$T_i = T_m = 1,5 \text{ с} \quad (2.10)$$

З огляду на те, що об'єкт керування характеризується суттєвим переважанням чистого запізнення над інерційністю привода ($\tau \gg T_m$), при розрахунку параметрів регулятора виникає дилема між швидкістю реакції системи та її стійкістю. Для дослідження цієї специфіки було прийнято рішення налаштувати ПІ-регулятор на гранично швидку реакцію з коефіцієнтами $K_p = 0,083$ та $K_i = 0,055$ [4, 8].

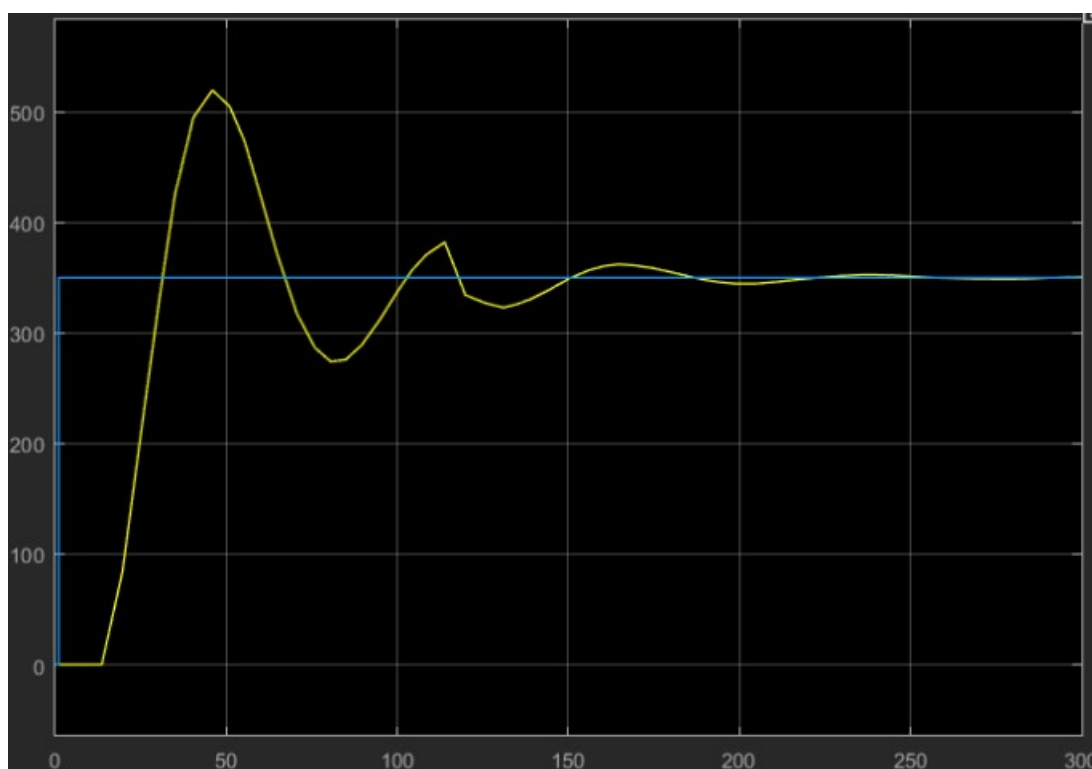


Рисунок 2.10 - Перехідні процеси у САК продуктивності при активному налаштуванні регулятора

Отриманий у результаті моделювання перехідний процес (Рисунок 2.10) наочно демонструє динаміку поведінки системи за наявності великого транспортного запізнення. Після подачі уставки продуктивності 350 т/год на початковій секунді, вихідний сигнал на конвеєрних вагах залишається нульовим

протягом перших 15 секунд моделювання, що математично підтверджує коректність роботи блоку запізнення стрічки.

Починаючи з 15-ї секунди, продуктивність стрімко зростає і вперше досягає заданого рівня на 32-й секундi. Проте, через те, що регулятор накопичив помилку за час, поки матеріал їхав до ваг, у системі виникає коливальний процес. Максимальне перерегулювання досягає 48% (пік продуктивності становить 520 т/год на 46-й секундi). Надалі ПП-регулятор успішно демпфує коливання, про що свідчить характер згасання амплітуди: перший спад до 275 т/год на 82-й секундi та другий, значно менший підйом до 380 т/год на 112-й секундi [8].

Варто зазначити, що контур стабілізації масової витрати (продуктивності) шихти $Q(t)$ та контур регулювання висоти шару $H(t)$ є динамічно еквівалентними. Відповідно до виведеного у підрозділі 2.1 рівняння (2.7), вони пов'язані між собою суто безінерційним статичним коефіцієнтом об'ємно-масового перерахунку:

$$H(t) = K_H \cdot Q(t) \quad (2.9)$$

де $K_H = \frac{1}{V_{belt} \cdot B \cdot \rho}$ - статичний коефіцієнт підсилення.

За номінальних параметрів роботи лінії ($V_{belt} \approx 210 \text{ м/год}$, $B = 3 \text{ м}$, $\rho = 1,8 \text{ т/м}^3$), коефіцієнт становить $K_H \approx 0,000882$. Оскільки даний коефіцієнт є статичним підсиленням, характер динамічного перехідного процесу (час стабілізації, показники коливальності) для обох величин є абсолютно ідентичним. Таким чином, при стабілізації продуктивності на рівні 350 т/год фактична висота шару шихти набуває сталого значення $H = 350 \cdot 0,000882 \approx 0,31 \text{ м}$. Це значення суворо відповідає номінальним вимогам спікання (0,25...0,35м відповідно до таблиці 1.1), що доводить повну математичну та фізичну узгодженість результатів комп'ютерного моделювання з теоретичним описом об'єкта [3, 8].

На 100-й секундi в систему вводиться зовнішнє збурення (падіння навантаження на -50 т/год). Внаслідок запізнення реакція на заваду фіксується вагами на 115-й секундi у вигляді характерного просідання лінії графіку до 325

т/год. Регулятор частотного перетворювача Altivar оперативно реагує на похибку, збільшуючи оберти живильника, і вже на 140-й секунді повністю повертає систему до заданого значення. Повний час стабілізації системи з урахуванням згасання стартових коливань та ліквідації завади становить близько 180с, після чого статична похибка регулювання дорівнює нулю. Це доводить, що навіть за агресивного налаштування регулятор гарантує стійкість системи в умовах сильних зовнішніх завад [3, 4].

Незважаючи на високу швидкодію системи при початково розрахованих "активних" параметрах, отримане перерегулювання на рівні 48% є небажаним для реального процесу завантаження шихти. Різке динамічне коливання продуктивності до 520 т/год при запуску може викликати лавиноподібне осипання матеріалу з відбивного лотка, нерівномірність початкового шару або перевантаження двигуна живильника. З метою усунення коливального характеру та пошуку оптимального компромісу між швидкістю та стабільністю, було проведено серію ітераційних запусків моделі з корекцією коефіцієнтів регулювання [8].

У ході експериментів було виявлено, що надмірне заниження інтегруючої складової (наприклад до $K_i=0,004$) призводить до неприпустимого затягування часу розгону привода до робочих значень, роблячи систему занадто млявою. Найбільш збалансовані показники якості регулювання було отримано при встановленні параметрів регулятора на рівні $K_p=0,04$ та $K_i=0,04$. Зменшення пропорційного коефіцієнта дозволило знизити амплітуду автоколивань, а відносно високий рівень інтегрування зберіг необхідну динаміку накопичення помилки для швидкого виходу на уставку [4].

Отриманий при таких налаштуваннях перехідний процес (Рисунок 2.11) характеризується значно вищою стабільністю. Час виходу на номінальну продуктивність 350 т/год становить близько 75 секунд, що є повністю прийнятним для конвеєрного тракту агломашины.

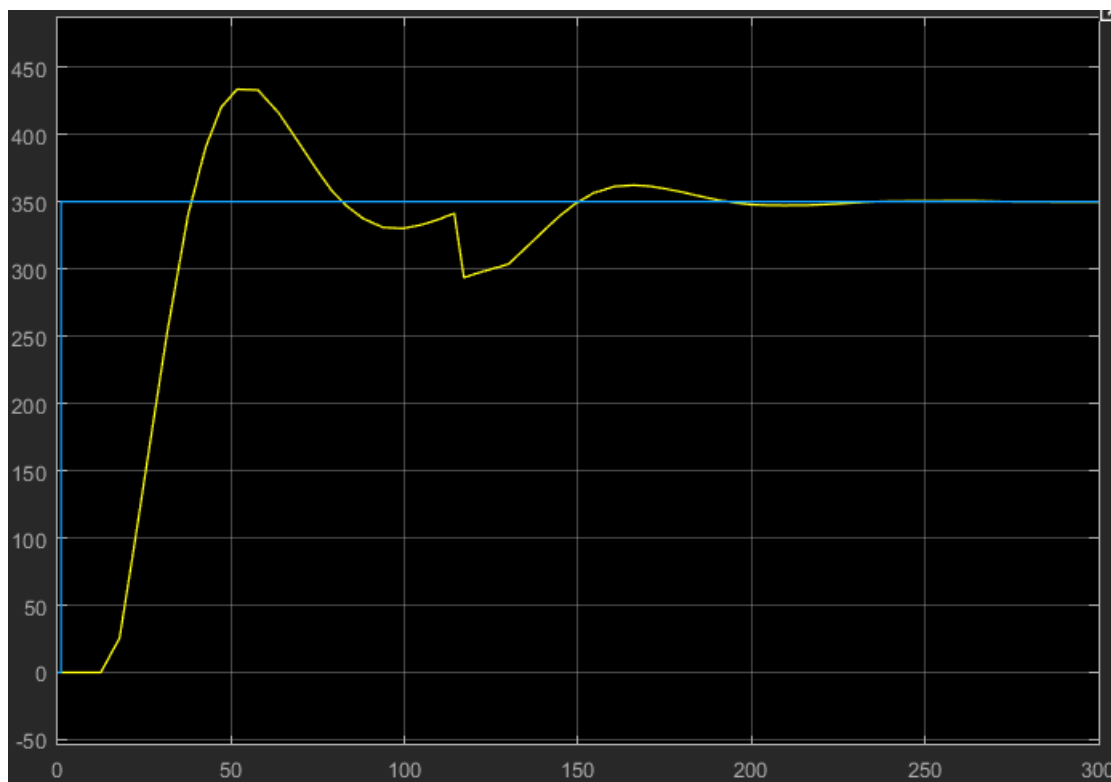


Рисунок 2.11 - Перехідний процес при оптимальних збалансованих параметрах

При цьому максимальний динамічний викид знизився з 48% до безпечних 14%, а коливальний процес повністю згас вже на другому напівперіоді. Дане налаштування регулятора забезпечує плавне, безударне регулювання швидкості привода живильника, мінімізуючи динамічні навантаження на механічні вузли та гарантуючи високу стабільність формування товщини шару шихти.

2.6 Розробка програмного забезпечення системи автоматичного керування

Для реалізації алгоритмічного забезпечення системи автоматизації, розроблено прикладне програмне забезпечення для контролера Modicon M241. Розробка та відналагодження ППЗ виконувалися у сучасному інженерному середовищі EcoStruxure Machine Expert від компанії Schneider Electric. Дане середовище побудоване на базі промислової платформи CODESYS V3 і повністю

відповідає вимогам міжнародного стандарту IEC 61131-3 та його вітчизняного аналога ДСТУ EN 61131-3:2016 щодо структури та мов програмування промислових контролерів [9, 16].

Серед п'яти стандартизованих мов програмування для реалізації логіки роботи нашого об'єкта було обрано мову ST (Structured Text - Структурований текст). ST є високорівневою текстовою мовою програмування, яка має суттєві переваги при побудові складних математичних розрахунків (таких як фільтрація та інтегрування витрати шихти) та логічних автоматів станів (для реалізації крокової циклограми пуску та зупинки). Використання текстової мови ST дозволяє створити компактний, легкий для читання та модифікації програмний код, який займає значно менше пам'яті контролера порівняно з графічними мовами типу LD або FBD [16].

Створення проєкту в інженерному середовищі починається з налаштування фізичної конфігурації обладнання в дереві пристроїв (Devices Tree). У головному вузлі конфігурації обирається центральний процесорний модуль TM241CE40R. Наступним кроком є налаштування комунікаційного інтерфейсу Ethernet. У властивостях вбудованого Ethernet-порту задається статична IP-адреса контролера (192.168.220.2 з маскою підмережі 255.255.255.0), яка повинна знаходитися в одному адресному просторі з частотними перетворювачами ATV930 та комутатором XS1. Під Ethernet-вузлом створюється менеджер промислової мережі Modbus TCP Manager, який буде відповідати за циклічне опитування регістрів частотників та реле TeSys T по мережі [9].

Для фізичного збору аналогових сигналів до правої шини контролера в дереві пристроїв додається один аналоговий модуль розширення Module_1 (TM3AM6/G), що має пружинні клеми для підвищеної стійкості до промислових вібрацій. У конфігурації каналів цього модуля для перших двох входів обирається режим роботи струмової петлі «4-20 mA». Контролер автоматично присвоює адреси для входних каналів цього модуля, починаючи з %IW3. Відтак, перший

аналоговий канал (%IW3) закріплюється за радарним рівнеміром LT001, а другий аналоговий канал (%IW4) - за аналоговим виходом вагового індикатора WT001 [9].

Збір дискретних сигналів (сигнали безпеки, датчики сходу стрічки, кнопки пуску) та керування релейними виходами (світлозвукова сирена) здійснюється безпосередньо через вбудовані входи (DI) та виходи (DQ) самого процесора TM241CE40R. Це дозволяє відмовитися від купівлі додаткових дискретних модулів розширення, спростити електричні схеми та оптимізувати габаритні розміри шафи автоматизації.

Для забезпечення зв'язку між апаратними входами/виходами контролера, внутрішньою логікою програми та екранами людино-машинного інтерфейсу (HMI), в проєкті створено глобальний список змінних (Global Variable List). Кожна змінна має унікальний ідентифікатор, тип даних та прив'язку до фізичної пам'яті ПЛК. Основні змінні нашої системи наведені у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Список глобальних змінних системи автоматизації завантаження шихти

Ім'я змінної (Tag)	Тип даних	Фізична адреса	Опис технологічного параметра
i_iRawLevel	INT	%IW3	"Сире" значення рівня з аналогового входу (0-10000)
i_iRawWeight	INT	%IW4	"Сире" значення ваги з аналогового входу (0-10000)
i_xBeltSpeed_In	BOOL	%IX0.0	Вхід швидкісного лічильника (імпульси швидкості стрічки)

Продовження таблиці 2.1

Ім'я змінної (Tag)	Тип даних	Фізична адреса	Опис технологічного параметра
i_xEmergencyStop	BOOL	%IX1.0	Сигнал з ланцюга аварійних кнопок та тросів (1 - Норма, 0 - Аварія)
q_xSiren	BOOL	%QX1.0	Вихід на попереджувальну сирену та блималку (1 - Активна)
g_rLevel	REAL	%MW100	Фізичне значення рівня у бункері (0.0 - 5.0 м)
g_rWeight	REAL	%MW102	Погонне навантаження на стрічці (0.0 - 100.0 кг/м)
g_rBeltSpeed	REAL	%MW104	Поточна швидкість руху стрічки (0.0 - 2.5 м/с)
g_rFlow	REAL	%MW106	Розрахована поточна продуктивність (0.0 - 500.0 т/год)
g_rSetpoint	REAL	%MW108	Задана оператором уставка продуктивності з HMI (т/год)

Продовження таблиці 2.1

Ім'я змінної (Tag)	Тип даних	Фізична адреса	Опис технологічного параметра
g_xStart	BOOL	%MX100.0	Команда "Пуск" з НМІ (1 - Натиснуто)
g_xStop	BOOL	%MX100.1	Команда "Стоп" з НМІ (1 - Натиснуто)
g_xSystemReady	BOOL	%MX100.2	Біт готовності системи до автоматичного запуску

Для безпосереднього виконання розрахунків за математичною моделлю об'єкта у ПЛК, розроблено прикладні програмні модулі мовою Structured Text. Оскільки повний лістинг усього коду програми є об'ємним, його винесено в кінець пояснювальної записки у ДОДАТОК А, тоді як у даному розділі детально розглянуто ключові фрагменти розроблених підпрограм [16].

Для переведення цілочисельних сигналів 4-20 мА з аналогового модуля ТМЗАМ6/G у фізичні одиниці вимірювання розроблено підпрограму POU_Scaling (повний лістинг наведено у ДОДАТКУ А). Основним інженерним завданням тут є приведення типів даних та лінійна інтерполяція. Ключовий фрагмент коду, що виконує масштабування рівня шихти у бункері та ваги на стрічці, має наступний вигляд:

```
// Масштабування сигналу радарного рівнеміра бункера (перетворення 0...10000 -> 0...5.0 м)
GVL.g_rLevel := INT_TO_REAL(GVL.i_iRawLevel) * rMaxLevel / 10000.0;

// Масштабування сигналу тензометричних конвеєрних ваг (перетворення 0...10000 -> 0...100.0 кг/м)
GVL.g_rWeight := INT_TO_REAL(GVL.i_iRawWeight) * rMaxWeight / 10000.0;
```

Рисунок 2.12 - Лістинг коду «POU_Scaling»

У даному фрагменті стандартна функція INT_TO_REAL використовується для уникнення конфлікту типів даних у компіляторі, оскільки аналогове значення є цілим числом (INT), а подальші математичні розрахунки вимагають високої точності з плаваючою комою (REAL).

Наступним кроком є розрахунок швидкості стрічки та поточної продуктивності у підпрограмі POU_Flow. Для обробки імпульсів від датчика швидкості конвеєра використовується системна змінна частоти diHscFrequency вбудованого швидкісного лічильника контролера Modicon M241. Обчислення масової витрати шихти в тоннах на годину (т/год) реалізовано за наступним фрагментом коду:

```
// Розрахунок лінійної швидкості руху стрічки конвеєра, м/с
GVL.g_rBeltSpeed := DINT_TO_REAL(GVL.diHscFrequency) * rSpeedCoeff;

// Запобігання діленню на нуль або помилковим негативним значенням швидкості
IF GVL.g_rBeltSpeed < 0.01 THEN
    GVL.g_rBeltSpeed := 0.0;
END_IF

// Розрахунок поточної продуктивності конвеєра (масової витрати шихти), т/год
// Формула: кг/м * м/с = кг/с. Для переведу в т/год множимо на (3600 / 1000) = 3.6
GVL.g_rFlow := GVL.g_rWeight * GVL.g_rBeltSpeed * 3.6;
```

Рисунок 2.13 - Лістинг коду «POU_Flow»

Коефіцієнт 3.6 у формулі розрахунку витрати є математично обґрунтованою константою перерахунку секундної маси у годинну продуктивність (враховує 3600 секунд в годині та 1000 кілограмів у одній тонні), що дозволяє ПЛК оперувати стандартними для металургії величинами вимірювання.

Для захисту обладнання від аварійних ситуацій та автоматичного запуску у ПЛК розроблено підпрограми POU_Interlocks та POU_Sequence. Програма передпускового контролю здійснює логічне множення умов готовності. Ключовий фрагмент перевірки параметрів безпеки має вигляд:

```
// Перевірка умов безпеки та формування сигналу готовності системи до пуску
IF (GVL.i_xEmergencyStop = TRUE) AND           // Коло безпеки ціле (аварійні кнопки віджаті)
  (GVL.g_rLevel >= rMinLevel) AND               // Рівень матеріалу в бункері достатній
  (xAtv1_Ready = TRUE) AND                      // Частотний перетворювач живильника справний
  (xAtv2_Ready = TRUE) AND                      // Частотний перетворювач конвеєра справний
  (xTesys_Ready = TRUE)                        // Реле захисту розподільника справне
THEN
  GVL.g_xSystemReady := TRUE;                  // Система готова до автоматичного запуску
ELSE
  GVL.g_xSystemReady := FALSE;                 // Запуск заборонено, або аварійна зупинка
END_IF
```

Рисунок 2.14 - Лістинг коду «POU_Interlocks »

Даний фрагмент гарантує, що автоматичний запуск конвеєрної лінії буде заблоковано, якщо рівень шихти у бункері впаде нижче критичного мінімуму rMinLevel (1.0 м), або якщо частотні перетворювачі чи інтелектуальні реле захисту TeSys T повідомлять про наявність внутрішніх апаратних помилок чи перевантажень [12].

Безпосередня циклограма запуску лінії проти ходу вантажопотоку та зупинки з таймером спорожнення стрічки реалізована у підпрограмі POU_Sequence на основі крокового автомата станів CASE ... OF. Фрагмент коду, що описує запуск попереджувального сигналу та послідовний старт розподільника, конвеєра і живильника, наведено нижче:

```

// Виконання крокової циклограми запуску та зупинки механізмів
CASE iState OF
  0: // Крок 0: Стан очікування команди пуску
    xAtv1_Run := FALSE;
    xAtv2_Run := FALSE;
    xTsys_Run := FALSE;
    GVL.q_xSiren := FALSE;
    IF (GVL.q_xStart = TRUE) AND (GVL.q_xSystemReady = TRUE) THEN
      iState := 10; // Перехід до попереджувального сигналу
    END_IF

  10: // Крок 10: Попереджувальна сирена та блималка (10 секунд)
    GVL.q_xSiren := TRUE;
    fbSirenTimer(IN := TRUE, PT := T#10s); // Запуск таймера
    IF fbSirenTimer.Q = TRUE THEN
      GVL.q_xSiren := FALSE;
      fbSirenTimer(IN := FALSE); // Скидання таймера
      iState := 20; // Перехід до запуску розподільника
    END_IF

```

Рисунок 2.15 - Лістинг коду « POU_Sequence »

Використання стандартного блоку таймера TON (fbSirenTimer) дозволяє ініціювати звуковий сигнал безпеки строго на заданий час, а перевірка уставки швидкості $g_rBeltSpeed \geq 1.0$ на кроці 30 унеможливорює запуск живильника і засипання нерухомої стрічки конвеєра у разі обриву з'єднувальної муфти привода. Повний текст логіки автомата станів, включаючи кроки нормальної та аварійної зупинки, наведено у ДОДАТКУ А [9, 16].

У зв'язку з відсутністю безпосереднього доступу до реального технологічного обладнання та фізичних первинних перетворювачів на етапі розробки, перевірка працездатності створеного програмного забезпечення здійснювалася методом програмної емуляції об'єкта керування. Для цього в середовищі EcoStruxure Machine Expert було розроблено спеціалізований імітаційний модуль POU_Simulation, запуск якого здійснюється виключно в режимі програмного симулятора ПЛК (Simulation Mode) [9].

Програмний емулятор на основі спрощених різницевих рівнянь імітує фізичну поведінку завантажувального вузла. Зокрема, при отриманні команди на запуск конвеєра xAtv2_Run, модуль плавно збільшує значення віртуальної частоти

швидкісного лічильника `diHscFrequency` до номінальних значень, відтворюючи динаміку розгону стрічки. Аналогічно, при активації сигналу роботи живильника `xAtv1_Run` та руху стрічки, імітується поява сигналу ваги на конвеєрних вагах `iRawWeight` та пропорційне зменшення рівня шихти у бункері `iRawLevel` зі швидкістю, що залежить від продуктивності дозування.

Застосування такого підходу дозволило провести всебічне інтеграційне тестування розробленого ППЗ, перевірити правильність відпрацювання крокової циклограми пуску та зупинки, налаштувати часові інтервали попереджувального сигналу й спорожнення стрічки, а також перевірити реакцію САК на критичне зниження рівня матеріалу в бункері та спрацювання аварійних блокувань без залучення реального обладнання аглофабрики [12, 16].

2.7 Реалізація системи візуалізації процесу завантаження шихти

Людино-машинний інтерфейс (HMI - Human-Machine Interface) є ключовою сполучною ланкою між оператором та автоматизованою системою керування. При розробці інтерфейсу для вузла завантаження агломераційної шихти першочергову увагу було приділено принципам ергономіки, зручності використання (Usability) та ситуаційної обізнаності оператора відповідно до вимог міжнародного стандарту ANSI/ISA-101 [5].

Досвід експлуатації аналогічних конвеєрних та насосних комплексів на підприємствах Криворізького басейну показує, що перевантаження екранів візуалізації великою кількістю дрібних індикаторів та складними багаторівневими меню часто призводить до дезорієнтації чергового персоналу, підвищення втомлюваності та виникнення аварійних ситуацій через помилки людського фактора. З метою запобігання цим ризикам, у даній роботі було реалізовано концепцію спрощеного, високоефективного триекранного інтерфейсу. Дизайн екранів виконано в монохромній палітрі з використанням сірих та темних фонових елементів. Яскраві кольори застосовуються виключно як активні тригери для

привернення уваги оператора при виникненні аварій або відхилень параметрів від норми, що повністю відповідає філософії ситуаційного керування [5, 6].

Для створення людино-машинного інтерфейсу було використано інженерний програмний пакет EcoStruxure Operator Terminal Expert від Schneider Electric. Це програмне забезпечення дозволяє створювати векторну графіку високої роздільної здатності з підтримкою HTML5-вебвізуалізації, що дає можливість транслювати екрани керування на будь-які віддалені пристрої через вбудований Web-сервер нашого контролера Modicon M241 без встановлення додаткового платного софту на стороні клієнта [9].

Головний екран системи (Мнемосхема процесу) є стартовим вікном, яке поєднує в собі спрощену графічну схему руху шихти та органи безпосереднього автоматичного керування лінією. Таке поєднання дозволяє оператору запускати та зупиняти комплекс механізмів в один клік, одночасно спостерігаючи за реакцією системи на одному робочому полі, що повністю виключає необхідність хаотичного перемикання між різними вікнами під час пускових операцій [13].

Для забезпечення швидкої навігації та збереження єдиного стилю відображення, архітектура людино-машинного інтерфейсу побудована на основі шаблонного екрана - Master Screen. Використання цієї технології у середовищі Operator Terminal Expert дозволяє розділити робоче поле дисплея на статичну та динамічну зони. Статична зона містить верхню панель (Header) з інформаційним текстовим полем стану системи та глобальними індикаторами тривоги, а також нижню панель (Footer) з кнопками швидкого переходу між екранами: MOTOR, GRAPH та ALARM.

Центральна чорна область екрана (Screen Area) є динамічною зоною, в яку, залежно від натиснутої оператором кнопки внизу, завантажуються відповідний робочий екран. Така структура гарантує, що оператор у будь-який момент часу має швидкий доступ до будь-якої підсистеми в один клік, що повністю виключає заплутаність інтерфейсу та полегшує роботу чергового персоналу.

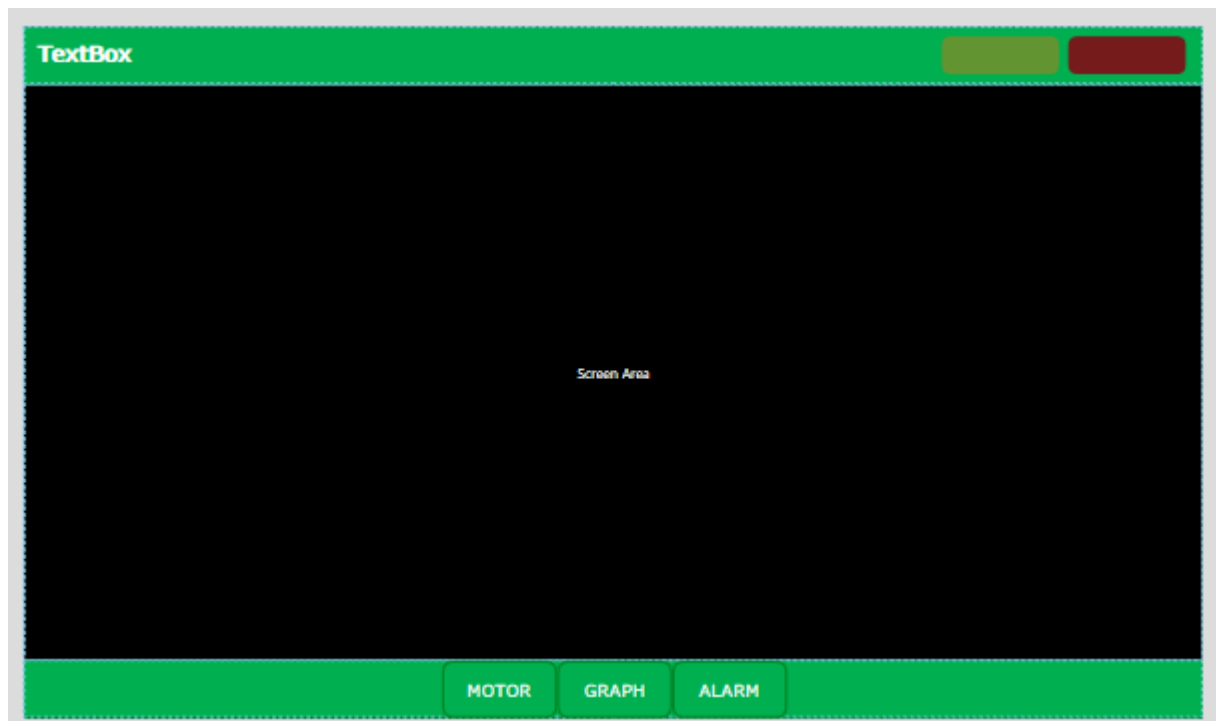


Рисунок 2.16 - Шаблонний екран навігації «Master Screen» у середовищі Operator Terminal Expert

Графічна частина екрана містить спрощені двовимірні символи технологічного обладнання. Для відображення рівня шихти в проміжному бункері (g_rLevel) замість традиційних вертикальних шкал використано круговий (кільцевий) шкальний індикатор, ідентичний за стилістикою індикатору швидкості двигуна. Це дозволяє зберегти візуальну цілісність та гармонійність графічного дизайну. Кільцевий індикатор рівня має градуювання від 0 до 5 метрів, а його шкала поділена на колірні сектори: зелена дуга сигналізує про достатній рівень шихти, а при наближенні стрілки до критичної відмітки у 1.0 м (20% об'єму), стрілка переходить у червоний сектор попередження.

Для керування на екрані розміщено великі контрастні кнопки «START» (зеленого кольору, зв'язана зі змінною g_xStart) та «STOP» (червоного кольору, зв'язана зі змінною g_xStop). Також на екрані присутній великий круглий індикатор (Gauge) з інтегрованим символом двигуна, який візуалізує поточну продуктивність конвеєра в т/год.

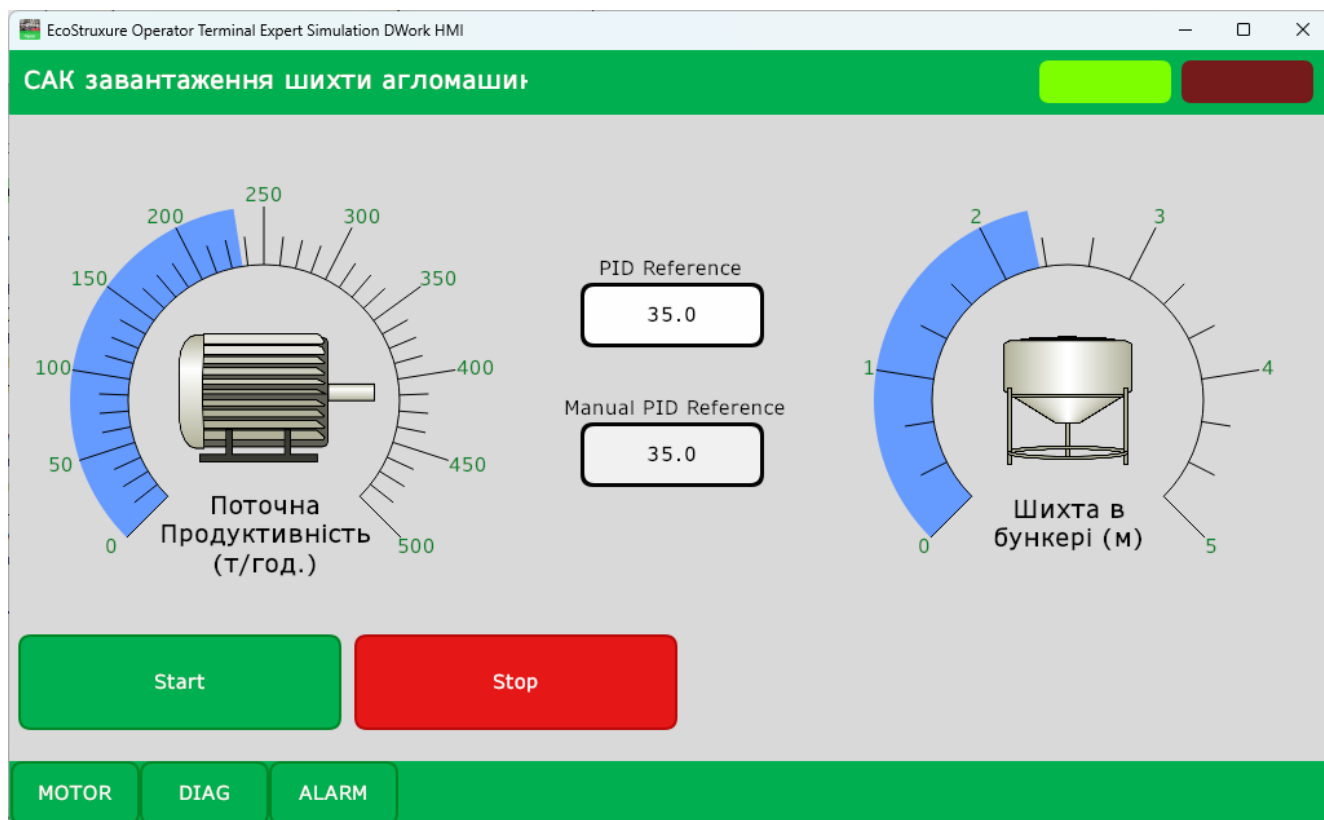


Рисунок 2.17 - Мнемосхема та керування у середовищі Operator Terminal Expert

Особливу увагу в алгоритмах роботи головного екрана приділено ланцюжку передачі та верифікації уставки продуктивності. Коли оператор вводить бажане значення продуктивності через поле числового введення на екрані, процес передачі параметрів реалізується за наступною схемою:

- Введене оператором значення записується в глобальну змінну уставки $g_rSetpoint$ за адресою %MW108 та по мережі Modbus TCP надходить у пам'ять контролера Modicon M241 [9].
- Контролер виступає в ролі "арбітра" безпеки: його програма перевіряє отримане значення $g_rSetpoint$ на відповідність технологічним обмеженням (діапазон від 50 до 500 т/год). Якщо значення коректне, ПЛК дає дозвіл на роботу; якщо оператор помилково ввів нереальне значення (наприклад, 1000 т/год), ПЛК ігнорує його, видає попередження на екран і залишає попередню безпечну уставку.

- Після успішної верифікації, контролер M241 по мережі Modbus TCP передає значення $g_rSetpoint$ разом із розрахованою поточною витратою g_rFlow (%MW106) безпосередньо в контур регулювання частотного перетворювача Altivar ATV930 барабанного живильника [4].
- Внутрішній ПІД-регулятор частотника ATV930 обробляє отриману уставку та зворотний зв'язок, безпосередньо коригуючи швидкість обертання двигуна, як це було доведено в ході моделювання у підрозділі 2.5.

Для забезпечення можливості глибокої інженерної діагностики та контролю стану електротехнічного обладнання без необхідності відкриття дверей шафи автоматизації (що знижує ризик ураження персоналу електричною дугою та запобігає потраплянню пилу всередину корпусу), розроблено Екран 2. Цей екран не вимагає постійної уваги оператора під час штатної роботи і орієнтований на чергових електриків та інженерів служби КВПіА. На ньому відображаються детальні електричні, теплові та статусний параметри приводів, що зчитуються ПЛК Modicon M241 по мережі Modbus TCP з частотного перетворювача Altivar ATV930 та інтелектуального реле TeSys T [4, 12].

Вікно діагностики логічно розділене на блоки. Вони відображають загальні системні параметри, такі як температура внутрішніх електронних плат контролера M241, поточна частота струму живильної мережі, коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) та споживана активна потужність у кіловатах. Інший блок присвячено моніторингу якості електроживлення, що забезпечується інтелектуальним реле захисту TeSys T. Тут виводяться значення лінійних напруг між фазами (L3-L1, L1-L2, L2-L3), середнє значення напруги в системі та поточний відсоток дисбалансу фазних напруг. Контроль дисбалансу є критично важливим, оскільки навіть незначна асиметрія фаз призводить до різкого нагріву обмоток електродвигунів та їх передчасного виходу з ладу [9, 12].

Окреме вікно детальної діагностики привода буде містити вичерпну інформацію про поточні фізичні параметри двигуна барабанного живильника. У блоці «Motor Parameters» виводяться поточна частота обертання ротора, швидкість

у обертах за хвилину, споживаний струм, крутний момент на валу, активна потужність, розрахована температура обмоток та напруга на виході інвертора. Блок «Drive Status» відображає внутрішній стан привода, код поточного кроку автомата станів перетворювача, канал отримання команд та код останньої зафіксованої помилки.

Також розташовано блок аварійних статусів «Error Status» у вигляді індикаторів віртуальних сигнальних ламп, що сигналізують про обрив фази живлення, втрату аналогового сигналу 4-20 мА на вході AI2, перегрів привода або двигуна, зниження напруги чи інші зовнішні блокування.

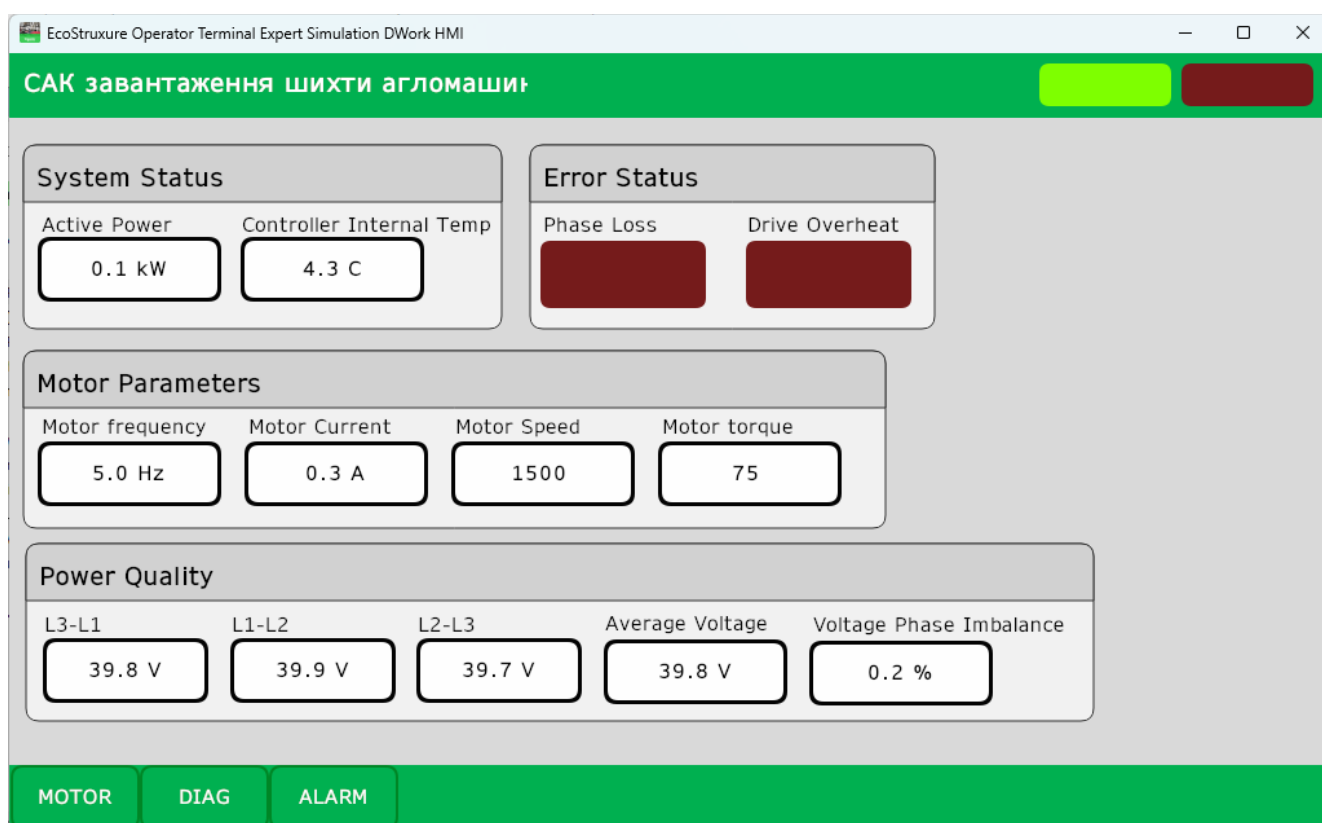


Рисунок 2.18 - Вікно загальної діагностики та параметрів енергомережі

Примітка: Наведені на рисунках 2.17 та 2.18 параметри енергомережі та технологічних уставок відображають роботу системи в режимі емуляції з умовними коефіцієнтами масштабування тегів (%MW). При впровадженні системи на реальному об'єкті коефіцієнти масштабування аналогових сигналів

налаштовуються відповідно до номінальних параметрів обладнання (380 В для напруги мережі та 50...500 т/год для продуктивності).

Для надання оператору можливості ретроспективного аналізу ходу технологічного процесу та швидкого розслідування причин аварійних зупинок розроблено Екран 3, який об'єднує графічне відображення трендів та журнал тривог. Екран розділений на дві функціональні зони. Права зона містить поле побудови графіків реального часу (Trend). На графіку виводиться крива поточної частоти роботи живильника або розрахованої продуктивності конвеєра. Панель керування трендом дозволяє оператору перемикатися між режимом реального часу (Real Time) для контролю поточного пуску та режимом перегляду історії (Historical Mode) для аналізу роботи за попередні зміни. Поруч виводиться цифрове значення поточної частоти двигуна живильника великим зеленим шрифтом для полегшення зорового сприйняття.

Ліва зона екрана (Рисунок 2.19) є інтерактивною таблицею журналу аварійних повідомлень та подій, розробленою відповідно до вимог стандарту ISA-18.2. Таблиця містить стовпчики з часом та датою виникнення події, текстовим описом аварії, її поточним статусом (активна, квітована оператором, скинута) та класом пріоритету. Усі аварійні повідомлення мають колірне кодування: критичні аварії, що викликали зупинку лінії (наприклад, спрацювання тросового вимикача або перевантаження двигуна), підсвічуються червоним кольором, а попереджувальні повідомлення (наприклад, зниження рівня в бункері менше 40%) - жовтим. Наявність суміщеного екрана трендів та тривог дозволяє машиністу агломашини швидко співставити час виникнення аварії з графіком зміни продуктивності, що значно полегшує пошук першопричини несправностей та зменшує час простою обладнання [6, 15].

живильника та конвеєра, подаючи на входи програми розраховані значення рівнів, ваги та швидкості. Це дало змогу перевірити роботу САК у динаміці за трьома послідовними сценаріями: передпусковий контроль, автоматичний запуск та стабілізація витрати шихти [16].

Першим етапом апробації стала перевірка роботи алгоритмів безпеки, закладених у модулі «POU_Interlocks». При запуску симулятора системи у вихідному стані, на Головному екрані уставка «PID Reference» та поточна продуктивність дорівнюють 0.0 т/год. Для перевірки блокування пуску було змодельовано ситуацію відсутності готовності системи - у списку змінних GVL прапорець безпеки i_xEmergencyStop було примусово встановлено у стан FALSE (імітація натиснутої аварійної кнопки).

При спробі оператора активувати систему натисканням зеленій кнопки «Start» на екрані, алгоритм ПЛК заблокував перехід автомата станів «POU_Sequence» з нульового кроку. Кнопка «Start» не зреагувала, а система залишилася в стані спокою.

Для перевірки динаміки автоматичного запуску умовну кнопку аварійної зупинки було приведено в безпечний стан (i_xEmergencyStop := TRUE), а рівень у бункері встановлено на рівні 4м. При цьому індикатор готовності на панелі Master Screen перейшов у активний зелений стан, підтверджуючи працездатність підсистеми передпускового контролю.

Після натискання оператором кнопки «Start» на першому екрані HMI, імітаційний процес пуску продемонстрував чітке виконання закладених технологічних кроків:

- Перші 10 секунд (Крок 10): на екрані спалахнув індикатор попереджувального сигналу q_xSiren, а ПЛК заблокував запуск будь-яких двигунів, даючи час персоналу покинути небезпечну зону.
- На 10-й секунді (Крок 20): сирена вимкнулася, і на екрані активувався індикатор роботи човникового розподільника. На другому діагностичному екрані в блоці «Power Quality» з'явилися робочі параметри двигуна

розподільника від реле TeSys T (струм навантаження, активна потужність та напруга живлення) [12].

- На 12-й секунді (Крок 30): ПЛК подав команду на запуск головного конвеєра. На першому екрані миттєво закрутилася анімація конвеєрної стрічки. Завдяки роботі емулятора POU_Simulation, оператор побачив плавний ріст лінійної швидкості стрічки від 0 до 1.5м/с, що відображалось на циферблаті швидкості та на другому екрані в полі «Motor Speed» частотника ATV930 [4].
- При досягненні швидкості стрічки понад 1.0 м/с (Крок 40): система автоматично дозволила запуск барабанного живильника. На екрані НМІ почала обертатися анімація барабана, а ваги WT001 зафіксували появу погонного навантаження, яке почало плавно зростати, сигналізуючи про початок надходження шихти на рухому стрічку конвеєра [11].

Після завершення автоматичного запуску система автоматично переходить на крок 50 (штатний режим роботи), а на Головному екрані НМІ активується контур автоматичного регулювання. У полі введення «Manual PID Reference» оператор встановлює уставку продуктивності 350т/год. Програма ПЛК транслює це значення у змінну g_rSetpoint (%MW108) та по мережі Modbus TCP передає його на частотний перетворювач. На екрані в полі виводу «PID Reference» з'являється підтверджене частотником діюче значення уставки [4, 9].

Спостерігаючи за Головним екраном у динаміці, можна оцінити високу стабільність роботи системи. Ліва кругова шкала «Поточна Продуктивність» плавно піднімається і стабілізується біля відмітки 350т/год. Права кругова шкала «Шихта в бункері» при цьому починає повільно рухатися у зворотний бік (покази плавно зменшуються з 4 до 2.5м), імітуючи реальне вивантаження матеріалу з проміжного бункера.[10, 11]

Для перевірки роботи алгоритмів зупинки лінії, оператор натискає червону сенсорну кнопку «Stop» на першому екрані НМІ, що ініціює перехід автомата станів POU_Sequence на крок 60. За першою ж командою ПЛК знімає дозвіл на

роботу живильника (`xAtv1_Run := FALSE`). На Головному екрані миттєво зупиняється анімація обертання барабана, а покази кругової шкали «Шихта в бункері» фіксуються на поточному значенні (наприклад 2.5м), підтверджуючи припинення вивантаження матеріалу.

При цьому стрічковий конвеєр продовжує працювати, а на екрані трендів зафіксовано плавне падіння кривої продуктивності до нуля. Програма ПЛК на кроці 70 запускає таймер спорожнення стрічки. Через 30 секунд, коли вся віртуальна шихта повністю зійшла з конвеєра, контролер вимикає приводи стрічки та човникового розподільника. На екрані НМІ зупиняється анімація руху конвеєра, а всі числові індикатори швидкості, струму та ваги переходять у нульовий стан, завершуючи технологічний цикл [3].

Окремим етапом апробації стала імітація аварії під час роботи лінії. При роботі системи на кроці 50 у списку змінних було примусово скинуто сигнал безпеки (`i_xEmergencyStop := FALSE`). Програмний блок `POU_Interlocks` миттєво зняв готовність системи `g_xSystemReady`, що призвело до негайного скидання крокового автомата `POU_Sequence` в нульовий крок. На екрані НМІ одночасно зупинилися всі анімації, а індикатори двигунів змінили свій колір на сірий, сигналізуючи про повне знеструмлення приводів. На екрані аварій (Екран 3) з'явився новий рядок червоного кольору з описом причини аварійної зупинки. Це підтвердило стовідсоткову надійність роботи програмно-апаратних блокувань та безпеки системи [12, 16].

Таким чином, успішна апробація розробленого прикладного програмного забезпечення та людино-машинного інтерфейсу в середовищі імітаційного моделювання повністю підтвердила правильність обраних інженерних рішень, адекватність розрахованих параметрів регулювання та високу надійність роботи алгоритмів безпеки, що дозволяє рекомендувати систему до впровадження на реальних промислових об'єктах агломераційного виробництва.

Висновки за розділом

У другому розділі виконано повну практичну та програмно-технічну реалізацію системи автоматичного керування процесом завантаження шихти на стрічку агломераційної машини. На основі аналізу фізико-хімічних властивостей шихти розроблено математичну модель об'єкта керування у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з чистим запізненням, яка адекватно описує динаміку наповнення бункера, інерційність привода та транспортну затримку стрічки. Спираючись на модель, обґрунтовано вибір засобів автоматизації екосистеми Schneider Electric на базі ПЛК Modicon M241, аналогового модуля TM3AM6/G, частотних перетворювачів Altivar ATV930, реле TeSys T та первинних датчиків Siemens SITRANS. У EPLAN Education спроектовано схему електричну принципову та креслення компоновання шафи, де завдяки використанню вбудованих ресурсів ПЛК оптимізовано габарити шафи до розмірів 1690*700мм із резервом простору для кабель-менеджменту та модернізації.

Для перевірки стійкості контуру в пакеті MATLAB/Simulink розроблено імітаційну модель, за допомогою якої знайдено збалансовані параметри ПІ-регулятора. Це дозволило отримати плавний перехідний процес із перерегулюванням до 14%, стабілізацією витрати за 75 секунд та успішною ліквідацією збурень за 25 секунд. У середовищі Machine Expert розроблено прикладне програмне забезпечення контролера мовою Structured Text, що складається з модулів масштабування, розрахунку витрати, безпеки та крокового автомата станів запуску обладнання проти ходу вантажопотоку. Спроектовано ергономічний людино-машинний інтерфейс у середовищі EcoStruxure Operator Terminal Expert за принципами ситуаційної обізнаності ISA-101 на основі шаблонного екрана Master Screen.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальне науково-практичне завдання проектування комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування та візуалізації процесу завантаження шихти на стрічку агломераційної машини. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні висновки:

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз технологічного процесу завантаження шихти як об'єкта автоматизації. Доведено, що стабільність висоти укладання матеріалу та позитивна сегрегація фракцій є вирішальними факторами забезпечення необхідної аеродинаміки шару в процесі спікання. Визначено динамічні характеристики об'єкта, який характеризується вираженою нелінійністю та чистим транспортним запізненням від 10 до 30 секунд (із середнім значенням 15 секунд) при переміщенні матеріалу від живильника до конвеєрних ваг. Така специфіка повністю виключає використання класичних централізованих схем регулювання та обґрунтовує доцільність переходу на розподілену периферійну структуру з перенесенням обчислювальних навантажень ПІД-закону безпосередньо на інтелектуальні виконавчі пристрої [3].

Для реалізації поставленої мети обґрунтовано та розроблено двоконтурну структуру системи автоматичного керування за концепцією «Edge Control» на базі сучасної апаратної платформи Schneider Electric. Як центральний обчислювальний модуль обрано контролер Modicon M241 (модель TM241CE40R з вбудованими релейними виходами), а функції безпосереднього локального регулювання та обчислення ПІД-алгоритму делеговано мікропроцесору інтелектуального частотного перетворювача Altivar Process ATV930. Для моніторингу живильної мережі та захисту нерегульованих двигунів обрано реле TeSys T (модель LTMR).

					КНУ КРБ.151.26.06.03.ПЗ		
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Киловатий М.				ВИСНОВКИ	Літера	Аркуш
Перевір.	Рубан С.А.						72
							3
Н. контр.	Маринич І.А.					АКНТ АКІТ-22	
Затверд.	Маринич І.А.						

Збір первинної технологічної інформації реалізовано за допомогою високоточних датчиків від компанії Siemens: радарного рівнеміра SITRANS LR560 (78 ГГц) для бункера та конвеєрних ваг SITRANS MSI з датчиком швидкості WS300. Проектування принципів електричних схем, а також креслення компонування шафи автоматизації виконано в середовищі САПР EPLAN Education відповідно до вимог вітчизняних стандартів. Завдяки використанню вбудованих ресурсів процесора M241 і відмові від зайвих дискретних модулів розширення, вдалося оптимізувати габаритні розміри шафи до компактних 1690 x 700 мм, де детально відображено схему захисту та ЕМС-сумісності силових приводів, підключення аналогових струмових петель 4-20 мА до модуля розширення TM3AM6/G та побудову комунікаційної мережі Modbus TCP за топологією «зірка» з використанням промислового Ethernet-комутатора [4, 9, 10, 11, 12, 14].

З метою теоретичного підтвердження працездатності розробленої системи створено імітаційну модель у пакеті MATLAB/Simulink. У ході моделювання було проведено оптимізацію ПІ-регулятора частотного перетворювача, в результаті чого доведено, що при розрахованих «активних» параметрах ($K_p=0,083$; $K_i=0,055$) система має високу швидкодію, але характеризується небажаним перерегулюванням на рівні 48%. Запропоновано та обґрунтовано вибір збалансованих параметрів ($K_p=0,04$; $K_i=0,04$), які дозволяють досягти плавного, безударного характеру перехідних процесів із перерегулюванням до 14%, забезпеченням стабілізації витрати за 75 секунд та успішною компенсацією зовнішніх збурень вологості шихти за 25 секунд. Перевірка робастності моделі підтвердила стійкість контуру при коливаннях транспортного запізнення в діапазоні 10-20 секунд, що доводить працездатність системи в реальних виробничих умовах [8].

Для програмування контролера Modicon M241 у середовищі EcoStruxure Machine Expert розроблено прикладне програмне забезпечення високорівневою мовою Structured Text (ST) відповідно до ДСТУ EN 61131-3:2016. Програма побудована за модульним принципом і складається з окремих ROU для

масштабування сигналів, розрахунку лінійної швидкості й масової витрати та реалізації крокового автомата станів запуску обладнання проти ходу вантажопотоку й технологічної зупинки за допомогою таймерів fbSirenTimer та fbPurgeTimer. Для відлагодження програми без реального заліза створено імітаційну підпрограму POU_Simulation, яка успішно емулює фізику об'єкта в режимі програмного симулятора ПЛК, відтворюючи розгін стрічки, налипання шихти та зміну рівня в бункері, що забезпечило повноцінне інтеграційне тестування системи [9, 12, 16].

Завершальним етапом роботи стала розробка ергономічного людино-машинного інтерфейсу (HMI) в інженерному середовищі EcoStruxure Operator Terminal Expert на основі стандартів високоефективного інтерфейсу ISA-101 та управління тривогами ISA-18.2. Створено триекранну структуру на базі шаблону Master Screen, що включає головну мнемосхему процесу з круговими шкальними приладами та органами пуску, екран сервісної діагностики приводів та енергомережі, а також суміщений екран трендів реального часу й журналу тривог. У роботі детально реалізовано логічний ланцюжок передачі та верифікації уставки продуктивності за маршрутом: поле введення HMI → Modbus TCP → пам'ять ПЛК M241 (перевірка на технологічні обмеження) → Modbus TCP → ПД-регулятор частотника ATV930. Проведена успішна апробація ПЗ та людино-машинного інтерфейсу в середовищі імітаційного моделювання повністю підтвердила правильність та надійність розроблених алгоритмів. Спроектowana комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування повністю відповідає вимогам технічного завдання, забезпечує високу точність стабілізації масової витрати агломераційної шихти, володіє значним запасом завадостійкості й рекомендується для впровадження при модернізації дозувальних відділень агломераційних фабрик металургійних підприємств [5, 6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

1. Лобов В. Й., Співак О. О. Моделювання завантаження шихти між бункерами агломашины. Вісник Криворізького національного університету. 2013. Вип. 34. С. 100-103.

2. Єфремов Б. Б. Проєкт автоматизації шихтопідготовки для агломераційного виробництва підприємств чорної металургії. Система автоматичного регулювання дозування компонентів шихти : кваліфікаційна робота бакалавра : 151 / Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2023. 88 с. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12306> (дата звернення: 02.06.2026).

3. Щокін В. П., Нечитайло В. М. Автоматизована система управління технологічним процесом шихтопідготовки агломераційного виробництва в умовах ГЗК ВАТ «Міттал Стіл Кривий Ріг». Науковий вісник Національного гірничого університету. 2018. № 4. 8 с.

4. Altivar Process. Variable Speed Drives ATV930, ATV950, ATV960, ATV980, ATV993 : Programming Manual. Schneider Electric, 2017. 548 с.

5. ANSI/ISA-101.01-2015. Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. Research Triangle Park : International Society of Automation, 2015. 94 с.

6. ANSI/ISA-18.2-2016. Management of Alarm Systems for the Process Industries. Research Triangle Park : International Society of Automation, 2016. 82 с.

7. Automation of sintering process. Sinter plant control systems. IspatGuru : web-site. 2023. URL: <https://www.ispatguru.com/automation-and-control-system-of-sinter-plant/> (дата звернення: 02.06.2026).

8. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.

9. Modicon M241 Logic Controller : Hardware Guide. Schneider Electric, 2020. 184 р.

					<i>КНУ КРБ.151.26.06.04.ПЗ</i>		
Змн	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Киловатий М.				ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА		
Перевір.	Рубан С.А.						
Н. контр.	Маринич І.А.						
Затверд.	Маринич І.А.						
						Літера	Аркуш
							75
							2
						АКНТ АКІТ-22	

10. SITRANS LR560 Radar level transmitter : Operating Instructions. Siemens AG, 2021. 142 p.

11. SITRANS MSI and WS300 Conveyor Belt Scales : Manual. Siemens AG, 2019. 86 p.

12. TeSys T Motor Management System : User Manual. Schneider Electric, 2018. 320 p.

13. ДСТУ Б А.2.4-3:2009. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 28 с.

14. Gischel B. EPLAN Electric P8 Reference Handbook. 4th ed. Munich : Hanser Publishers, 2016. 528 с.

15. ISO 5807:1985. Information processing - Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts. Geneva : ISO, 1985. 24 с.

16. Modicon TM3. Analog I/O Modules : Hardware Guide. Schneider Electric, 2021. 112 с.

17. ДСТУ EN 61131-3:2016. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування (EN 61131-3:2013, IDT). Київ : УкрНДНЦ, 2017. 156 с.

A.1 Підпрограма масштабування аналогових сигналів POU_Scaling

```

PROGRAM POU_Scaling
VAR
    rMaxLevel  : REAL := 5.0;    // Максимальний діапазон вимірювання датчика рівня, м
    rMaxWeight : REAL := 100.0;  // Максимальний діапазон конвеєрних ваг, кг/м
END_VAR

// Масштабування сигналу радарного рівнеміра бункера (перетворення 0...10000 -> 0...5.0 м)
g_rLevel := INT_TO_REAL(i_iRawLevel) * rMaxLevel / 10000.0;

// Масштабування сигналу тензOMETричних конвеєрних ваг (перетворення 0...10000 -> 0...100.0 кг/м)
g_rWeight := INT_TO_REAL(i_iRawWeight) * rMaxWeight / 10000.0;

```

A.2 Підпрограма розрахунку продуктивності конвеєра POU_Flow

```

PROGRAM POU_Flow
VAR
    rSpeedCoeff      : REAL := 0.0025; // Коефіцієнт перерахунку частоти Гц у лінійну швидкість м/с
    diHscFrequency    : DINT;           // Локальна змінна для частоти від вбудованого HSC
END_VAR

// Читання частоти від вбудованого швидкісного лічильника (HSC) контролера M241
diHscFrequency := MyController.Counters.HSC_Main.DiFrequency;

// Розрахунок лінійної швидкості руху стрічки конвеєра, м/с
g_rBeltSpeed := DINT_TO_REAL(diHscFrequency) * rSpeedCoeff;

// Запобігання діленню на нуль або помилковим негативним значенням швидкості
IF g_rBeltSpeed < 0.01 THEN
    g_rBeltSpeed := 0.0;
END_IF

// Розрахунок поточної продуктивності конвеєра (масової витрати шихти), т/год
// Формула: кг/м * м/с = кг/с. Для переведення в т/год множимо на (3600 / 1000) = 3.6
g_rFlow := g_rWeight * g_rBeltSpeed * 3.6;

```

A.3 Підпрограма перевірки передпускових блокувань POU_Interlocks

```

PROGRAM POU_Interlocks
VAR
    rMinLevel  : REAL := 1.0;    // Мінімально допустимий рівень шихти в бункері, м
    xAtv1_Ready : BOOL := TRUE;  // Готовність ЧРП живильника (зчитується по Modbus TCP)
    xAtv2_Ready : BOOL := TRUE;  // Готовність ЧРП конвеєра (зчитується по Modbus TCP)
    xTsys_Ready : BOOL := TRUE;  // Готовність реле розподільника (зчитується по Modbus TCP)

```

END_VAR

```
// Перевірка умов безпеки та формування сигналу готовності системи до пуску
IF (i_xEmergencyStop = TRUE) AND // Коло безпеки ціле (аварійні кнопки віджаті)
  (g_rLevel >= rMinLevel) AND // Рівень матеріалу в бункері достатній
  (xAtv1_Ready = TRUE) AND // Частотний перетворювач живильника справний
  (xAtv2_Ready = TRUE) AND // Частотний перетворювач конвеєра справний
  (xTsys_Ready = TRUE) // Реле захисту розподільника справне
THEN
  g_xSystemReady := TRUE; // Система готова до автоматичного запуску
ELSE
  g_xSystemReady := FALSE; // Запуск заборонено, або аварійна зупинка
END_IF
```

A.4 Підпрограма автоматичної циклограми роботи POU_Sequence

PROGRAM POU_Sequence

VAR

```
iState : INT := 0; // Крок автомата станів (0, 10, 20... 70)
fbSirenTimer : TON; // Стандартний таймер попереджувальної сирени
fbPurgeTimer : TON; // Стандартний таймер спорожнення стрічки
xAtv1_Run : BOOL; // Сигнал запуску живильника M1 (передається по
Modbus)
xAtv2_Run : BOOL; // Сигнал запуску конвеєра M2 (передається по Modbus)
xTsys_Run : BOOL; // Сигнал запуску розподільника (передається по
Modbus)
END_VAR
```

// Аварійне скидання автомата станів при зникненні готовності системи

IF g_xSystemReady = FALSE THEN

```
iState := 0;
xAtv1_Run := FALSE;
xAtv2_Run := FALSE;
xTsys_Run := FALSE;
q_xSiren := FALSE;
```

END_IF

// Виконання крокової циклограми запуску та зупинки механізмів

CASE iState OF

0: // Крок 0: Стан очікування команди пуску

```
xAtv1_Run := FALSE;
xAtv2_Run := FALSE;
xTsys_Run := FALSE;
q_xSiren := FALSE;
IF (g_xStart = TRUE) AND (g_xSystemReady = TRUE) THEN
  iState := 10; // Перехід до попереджувального сигналу
END_IF
```

10: // Крок 10: Попереджувальна сирена та блималка (10 секунд)

```
q_xSiren := TRUE;
fbSirenTimer(IN := TRUE, PT := T#10s); // Запуск таймера
IF fbSirenTimer.Q = TRUE THEN
  q_xSiren := FALSE;
  fbSirenTimer(IN := FALSE); // Скидання таймера
  iState := 20; // Перехід до запуску розподільника
END_IF
```

20: // Крок 20: Запуск привода човникового розподільника

```

xTsys_Run := TRUE;
iState := 30;           // Перехід до запуску стрічки конвеєра

30: // Крок 30: Запуск стрічкового конвеєра
xAtv2_Run := TRUE;
// Перехід далі можливий лише після того, як стрічка розженеться > 1.0 м/с
IF g_rBeltSpeed >= 1.0 THEN
    iState := 40;       // Перехід до запуску живильника
END_IF

40: // Крок 40: Запуск барабанного живильника (початок подачі шихти)
xAtv1_Run := TRUE;
iState := 50;           // Перехід у режим нормальної роботи

50: // Крок 50: Режим нормальної роботи (стабілізація витрати шихти)
// Очікування натискання кнопки технологічної зупинки "Стоп"
IF g_xStop = TRUE THEN
    iState := 60;       // Перехід до зупинки подачі матеріалу
END_IF

60: // Крок 60: Зупинка привода живильника (припинення подачі шихти)
xAtv1_Run := FALSE;
iState := 70;           // Перехід до стадії спорожнення конвеєра

70: // Крок 70: Очікування спорожнення конвеєра за таймером (30 секунд)
fbPurgeTimer(IN := TRUE, PT := T#30s); // Запуск таймера спорожнення
IF fbPurgeTimer.Q = TRUE THEN
    xAtv2_Run := FALSE; // Зупинка стрічки конвеєра
    xTsys_Run := FALSE; // Зупинка човникового розподільника
    fbPurgeTimer(IN := FALSE); // Скидання таймера
    iState := 0;        // Повернення у вихідний стан очікування
END_IF
END_CASE

```

A.5 Підпрограма імітаційного емулятора об'єкта POU_Simulation

```

PROGRAM POU_Simulation
VAR
    fbSimTimer    : TON;           // Таймер кроку інтегрування імітації (100 мс)
    rSimLevel     : REAL := 8000.0; // Стартовий віртуальний рівень у бункері (80% від
макс)
    rSimWeight    : REAL := 0.0;   // Початкова віртуальна вага на стрічці
    rSimFreq      : REAL := 0.0;   // Початкова віртуальна частота лічильника швидкості
    xRefill       : BOOL := FALSE; // Прапорець автоматичного дозасипання бункера
грейфером
END_VAR

// Запуск таймера кроку інтегрування імітації на 100 мс
fbSimTimer(IN := NOT fbSimTimer.Q, PT := T#100ms);

// Розрахунок фізики об'єкта відбувається строго один раз на 100 мс
IF fbSimTimer.Q = TRUE THEN

    // 1. ІМІТАЦІЯ ШВИДКОСТІ СТІЧКИ (розгін та вибіг привода конвеєра)
    IF POU_Sequence.xAtv2_Run = TRUE THEN
        IF rSimFreq < 400.0 THEN
            rSimFreq := rSimFreq + 8.0; // Імітуємо плавний розгін до 400 Гц (робоча
частота)

```

```

ELSE
    rSimFreq := 400.0;
END_IF
ELSE
    IF rSimFreq > 0.0 THEN
        rSimFreq := rSimFreq - 15.0;    // Імітуємо вибіг (зупинку) стрічки по інерції
    ELSE
        rSimFreq := 0.0;
    END_IF
END_IF;

// 2. ІМІТАЦІЯ ПОГОННОЇ ВАГИ ШИХТИ НА СТРИЦІ
// Вага з'являється лише якщо увімкнено живильник і конвеєр
IF (POU_Sequence.xAtv1_Run = TRUE) AND (POU_Sequence.xAtv2_Run = TRUE) THEN
    // Розрахунок цільової ваги (кг/м) виходячи з уставки продуктивності (т/год)
    // Формула: Weight (кг/м) = Flow (т/год) / (Speed (м/с) * 3.6)
    // При симульованій швидкості конвеєра 1.0 м/с: Weight = Setpoint / 3.6
    // Множимо на 100.0, бо симулятор оперує шкалою 0...10000 (де 10000 = 100.0 кг/м)
    rTargetWeight := (GVL.g_rSetpoint / 3.6) * 100.0;

    // Імітація динаміки завантаження (аперіодична ланка з постійною часу ~3 сек)
    // Формула: Y(k) = Y(k-1) + (X(k) - Y(k-1)) * dt / T
    // При циклі симуляції dt = 100мс і T = 3с: dt/T ≈ 0.033
    rSimWeight := rSimWeight + (rTargetWeight - rSimWeight) * 0.033;
ELSE
    // Якщо живильник зупинено, але конвеєр працює - конвеєр поступово спорожнюється
    IF (POU_Sequence.xAtv2_Run = TRUE) AND (rSimWeight > 0.0) THEN
        rSimWeight := rSimWeight - 150.0; // Швидкість спорожнення стрічки
        IF rSimWeight < 0.0 THEN
            rSimWeight := 0.0;
        END_IF;
    ELSE
        rSimWeight := 0.0;
    END_IF;
END_IF;

// 3. ІМІТАЦІЯ РІВНЯ ШИХТИ У ПРОМІЖНОМУ БУНКЕРІ
// Якщо працює живильник - рівень падає пропорційно реальній продуктивності
IF POU_Sequence.xAtv1_Run = TRUE THEN
    // Витрата бункера за 100мс симуляції
    rLevelDecrement := (GVL.g_rFlow / 3600.0) * 0.1 * 1000.0; // переклад в умовні одиниці
    рівня
    IF rSimLevel > 100.0 THEN
        rSimLevel := rSimLevel - rLevelDecrement;
    ELSE
        rSimLevel := 100.0;
    END_IF;
END_IF;

// Коли рівень впаде нижче 15% (викликаючи тривогу), імітуємо, що грейфер наповнив
бункер до 85%
IF rSimLevel < 1500.0 THEN
    xRefill := TRUE;
END_IF;

IF xRefill = TRUE THEN
    rSimLevel := rSimLevel + 300.0;    // Швидке наповнення бункера
    IF rSimLevel >= 8500.0 THEN
        rSimLevel := 8500.0;
    END_IF;
END_IF;

```

```

        xRefill := FALSE;                // Закінчили засипання
    END_IF
END_IF;

// 4. ПЕРЕДАЧА ЗМОДЕЛЬОВАНИХ ЗМІННИХ В АПАРАТНІ ТЕГИ ПРОГРАМИ
// Ми примусово перезаписуємо вхідні змінні, імітуючи сигнали з реального заліза
i_iRawLevel      := REAL_TO_INT(rSimLevel);
i_iRawWeight     := REAL_TO_INT(rSimWeight);
MyController.Counters.HSC_Main.DiFrequency := REAL_TO_DINT(rSimFreq);
END_IF

```