

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Автоматизація процесу керування безперервним замісом тіста на
хлібозаводі»

Здобувач: І.А. Єнальєва
(прізвище, ініціали)

4 курс, група АТ-32

Керівник: доцент О.В. Мазур

Консультанти:

Доцент І.М. Світий
Доцент В.М. Левінський

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від «___» _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри АТПіРС _____ О.М. Жигайло
(назва кафедри) (підпис)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра	Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма	Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації та робототехніці

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТП і РС

_____ к.т.н., доц. Світий І.М.

«05» січня 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувач Єнальєв Іван Андрійович

1. Тема кваліфікаційної роботи «Автоматизація процесу керування безперервним замісом тіста на хлібозаводі»
2. Керівник кваліфікаційної роботи Мазур Олександр Васильович, к.т.н., доцент.
П.п. 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ від «31» грудня 2025 року, № 743-03 .
3. Строк подання здобувачем випускної кваліфікаційної роботи – «12» червня 2026 р.
4. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: матеріали індивідуальних завдань виробничої і переддипломної практик, курсових і самостійних робіт.
5. Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):
Розділ 1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК.
Розділ 2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей його компонентів, їх реалізація у середовищі імітаційного моделювання.
Розділ 3. Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів автоматичного регулювання, порівняльний аналіз САР.
Розділ 4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів автоматичного логічного керування технологічною ділянкою.
Розділ 5. Вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі.
Розділ 6. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК.
Розділ 7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.
Розділ 8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці.
Розділ 9. Попереднє обґрунтування економічної доцільності впровадження модернізованої САК.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Номер розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Керівник кваліфікаційної роботи Мазур О.В., доц. каф. АТПіРС		
Розділи 2, 3	Мазур О.В., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 4	Світій І.М., к.т.н., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 5	Левінський В. М., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 6, 7	Степанов М.Т., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 8	Левінський В. М., доц. каф. АТПіРС		
Розділ 9	Мазур О.В., доц. каф. АТПіРС		

7. Дата видачі завдання «09» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН виконання розділів кваліфікаційної роботи

Номер розділу	Строк виконання етапів роботи	Примітка
Розділ 1	«24» березня 2026 р.	
Розділ 2	«31» березня 2026 р.	
Розділ 3	«10» квітня 2026 р.	
Розділ 4	«15» квітня 2026 р.	
Розділ 5	«20» квітня 2026 р.	
Розділ 6	«30» квітня 2026 р.	
Розділ 7	«10» травня 2026 р.	
Розділ 8	«15» травня 2026 р.	
Розділ 9	«20» травня 2026 р.	

Здобувач _____ Єнальєв І.А.
Підпис ПІБ

Керівник роботи _____ Мазур О.В.
Підпис ПІБ

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач Єнальєв І.А. _____
ПІБ Підпис

Реферат

Кваліфікаційна робота бакалавра Єнальєва Івана Андрійовича «Автоматизація процесу керування безперервним замісом тіста на хлібозаводі» викладена на 218 сторінках, містить 25 таблиць, 104 рисунки, 9 додатків, джерел з переліку посилань – 24.

Ключові слова: автоматизація, приготування тіста, багатозв'язний об'єкт, автономна система керування, імітаційне моделювання, PROFINET, частотне регулювання, принципова електрична схема, SIEMENS S7-1500, SCADA.

Об'єкт розробки – система автоматичного керування (САК) технологічним процесом приготування тіста у двокамерному агрегаті безперервної дії.

Мета роботи – підвищення техніко-економічних показників та забезпечення санітарно-гігієнічних норм функціонування процесу приготування тіста. Мета досягається за рахунок підвищення динамічної точності контурів системи автоматичного регулювання (САР), зниження енергоспоживання завдяки впровадженню частотного регулювання, зниження числа аварійних ситуацій та покращення взаємодії з оператором-технологом.

Методи дослідження – методи теорії автоматичного керування багатозв'язними системами, методи структурної та параметричної ідентифікації об'єктів керування, імітаційне моделювання (у середовищі MATLAB/Simulink), методи системного проектування автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП).

Отримані результати: Ідентифіковано математичні моделі каналів перетворення об'єкта. Виконано оптимальний параметричний синтез та розроблено алгоритми автономного керування, які виключають перехресний вплив між контурами активної потужності та температури. Розроблено алгоритми логічного пуску, зупинки та апаратної безпеки (Safe Torque Off). Вибрано та обґрунтовано комплекс сучасних технічних засобів на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) Siemens SIMATIC S7-1500.

Розроблено інтерфейс автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора на базі HMI TP1900 Comfort, а також програму для колаборативного робота-маніпулятора UR5e. Підготовлено пакет документації технічного забезпечення (схеми підключень P&ID, DI, DQ, AI, AQ).

Відмінні риси та інвестиційна привабливість – відмінною рисою проекту є мережева інтеграція приводів агрегату по шині PROFINET, що мінімізує апаратну надлишковість та підвищує надійність системи. Інвестиційна привабливість характеризується коротким терміном окупності (близько 2 років та 1 місяця), що досягається завдяки економії електроенергії (до 30%), подовженню ресурсу механічного обладнання та суттєвому зниженню відсотка технологічного браку через високу динамічну точність стабілізації параметрів тіста.

ЗМІСТ

Назви розділів, підрозділів	Стор.
Перелік умовних позначень	12
Вступ	14
Розділ 1. Опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними. Виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК.	17
1.1. Автоматизована ділянка технологічного процесу: локалізація, перехід від аналізу сутності технології до її формалізованого подання у формі взаємозв'язків параметрів	17
1.1.1. Коротка історична довідка та характеристика виробничої діяльності хлібопекарського підприємства	19
1.1.2. Узагальнена схема технологічного процесу та виділення ділянки для розробки системи автоматичного керування	21
1.1.3. Розгорнута схема технологічного процесу ділянки та опис суті процесу перетворення матеріальних і енергетичних потоків	23
1.1.4. Опис конструкції технологічного агрегату та особливості його експлуатації	24
1.1.5. Умови економічно доцільної реалізації розглянутого ТП	26
1.1.6. Параметризація схеми технологічного процесу	26
1.1.7. Первинний аналіз параметрів технологічного процесу та технологічного агрегату	28
1.1.8. Поглиблений аналіз регламентованих параметрів та наслідків їх виходу за допустимі межі	30
1.1.9. Поглиблений аналіз параметрів, які впливають на регламентовані параметри ТП, та вибір керуючих впливів	32
1.1.10. Розробка параметричної схеми технологічного процесу	35
1.2. Виявлення існуючого рівня автоматизації ділянки ТП	37
1.2.1. Оцінка існуючого рівня реалізації функції регулювання для технологічних та експлуатаційних параметрів	37
1.2.2. Функції логічного управління, оцінка існуючого рівня їх реалізації	38
1.3. Аналіз впливу функцій керування технологічним процесом на техніко-економічні та екологічні показники.	40
1.3.1. Вплив вхідних сировинних, енергетичних та механічних параметрів ТП на вихідні показники	40
1.3.2. Потенційні джерела економічної ефективності від впровадження поліпшених функцій керування	41
1.3.3. Конкретизація кінцевої економічної цілі модернізації САК	41
1.3.4. Соціальний, екологічний та безпековий ефекти від модернізації САК	42

Розділ 2. Розробка концептуальної моделі об'єкта управління, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей його компонентів, їх реалізація у середовищі імітаційного моделювання.	44
2.1. Розробка концептуальної моделі об'єкта регулювання	44
2.1.1. Аналіз параметричної схеми технологічного процесу та перехід від параметрів до змінних об'єктів управління	44
2.1.2. Формування структурної схеми об'єкта регулювання та постановка задачі ідентифікації її комплексу моделей	45
2.2. Структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей каналів перетворення об'єкта керування	47
2.2.1. Апріорний аналіз фізичної суті технологічного процесу та загальні властивості каналів об'єкта регулювання	47
2.2.2. Структурна ідентифікація математичних моделей динамічних властивостей каналів	48
2.2.3. План активних експериментів та когнітивне моделювання	49
2.2.4. Аналіз перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей	52
2.2.5. План проведення пасивних експериментів та збір інформації для ідентифікації моделей контрольованих збурень	57
2.2.6. Аналіз характеристик випадкових процесів, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей збурень	59
2.2.7. Ідентифікація каналів контрольованих збурень	62
2.3. Ідентифікація математичних моделей неконтрольованих збурень об'єкта регулювання	63
2.3.1. Констатація фактів щодо неконтрольованих збурень	63
2.3.2. Аналіз фізичної суті та можливих діапазонів зміни неконтрольованих збурень	64
2.3.3. План проведення пасивного експерименту	64
2.3.4. Структурна та параметрична ідентифікація моделей неконтрольованих збурень	64
2.3.5. Математичні моделі для обліку адитивних складових	66
2.4. Реалізація математичних моделей на ПЕОМ у середовищі комп'ютерного імітаційного моделювання та обґрунтування їх адекватності об'єкту-оригіналу	67
2.4.1. Реалізація схеми моделювання каналів ОР	67
2.4.2. Комп'ютерні експерименти та перевірка адекватності моделей	69
2.4.3. Метод формуючих фільтрів для генерації збурень	72
2.4.4. Повна імітаційна модель ОР та загальні висновки	75
Розділ 3. Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів автоматичного регулювання, порівняльний аналіз САР.	77
3.1. Конкретизація задач регулювання технологічним агрегатом	77
3.1.1. Задачі регулювання, регламентні зони та вибір інтегральних показників якості	77

3.1.2. Вибір базового принципу регулювання та структурна схема САР	78
3.1.3. Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання	79
3.2. Параметричний синтез і аналіз САР базової структури	81
3.2.1. Розрахунок початкових наближень параметрів регуляторів	81
3.2.2. Імітаційне моделювання САР та комп'ютерний експеримент з оптимізації	82
3.2.3. Перевірка САР на грубість, аналіз сталих режимів та висновки	87
3.3. Структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз	91
3.3.1. Аналіз особливостей об'єкта, розробка структури автономної САР та аналіз фізичної реалізованості	91
3.3.2. Імітаційне моделювання САР підвищеної точності та оптимізація коригуючих зв'язків	93
3.3.3. Перевірка автономної САР на грубість, порівняльний аналіз та висновки	96
Розділ 4. Конкретизація задачі і розробка алгоритмів автоматичного логічного керування технологічною ділянкою.	98
4.1. Аналіз існуючого рівня реалізації функцій логічного керування технологічним агрегатом та модернізація комплексу технічних засобів для автоматизації цих функцій	98
4.1.1. Аналіз існуючого рівня реалізації функцій логічного керування	98
4.1.2. Опис процедур технологічного пуску, технологічної зупинки та аварійної зупинки	99
4.2. Формалізація регламентів функціонування технологічного агрегату при технологічному пуску, технологічній зупинці та аварійній зупинці у вигляді блок-схем та їх опис	99
4.2.1. Конкретизація логічних змінних, керуючих впливів і станів агрегату	99
4.2.2. Обґрунтування принципу побудови підсистеми логічного керування	100
4.2.3. Формалізація регламенту технологічного пуску	101
4.2.4. Формалізація регламенту технологічної зупинки	101
4.2.5. Формалізація блокувань передаварійних ситуацій та аварійної зупинки	102
4.3. Розробка алгоритмів автоматичного керування технологічним агрегатом у вигляді блок-схем та їх опис	102
4.4. Розробка функціональної логічної схеми процесу керування технологічним агрегатом та її детальний опис	105
4.4.1. Розробка функціональної логічної схеми керування об'єктом	105
4.4.2. Детальний опис функціональної логічної схеми керування об'єктом	106

4.5. Імітаційне моделювання системи логічного керування	108
4.5.1. Розробка моделі в середовищі MatLab/Simulink	108
4.5.2. Проведення комп'ютерних експериментів	109
4.5.3. Аналіз результатів моделювання	110
4.5.4 Розробка моделі роботизованої ділянки у середовищі CoppeliaSim Edu	111
4.5.5 Перевірка імітації процесу переміщення у тривимірному просторі робочого органу робота	113
Розділ 5. Вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі.	116
5.1. Характеристики середовищ, з якими взаємодіють засоби автоматизації й обслуговуючий персонал, які повинні бути враховані при виборі технічних засобів і місць їх розміщення	116
5.1.1. Перелік та характеристики технологічних середовищ	116
5.1.2. Характеристика виробничих приміщень та класифікація умов експлуатації	117
5.2. Вибір технічних засобів збору інформації про хід технологічного процесу і стан обладнання	119
5.2.1. Перелік параметрів контролю та вимоги до вимірювальних засобів	119
5.2.2. Розподіл представлення інформації користувачу	120
5.2.3. Вибір типів датчиків та перетворювачів	121
5.2.4. Обґрунтування необхідності підвищення точності вимірювальних каналів	126
5.3. Вибір технічних засобів реалізації керуючих дій на технологічний процес і керування обладнанням	127
5.3.1. Обґрунтування і вибір типів регулюючих органів	127
5.3.2. Вибір типів виконавчих механізмів	129
5.3.3. Вибір марки і типорозміру робота та його робочого органу	133
5.3.4. Вибір технічних засобів сполучення ПЗО контролера з виконавчими механізмами	134
5.4. Вибір альтернативних варіантів технічної структури і технічних засобів для реалізації контролерно-комп'ютерної мережі	137
5.4.1. Порівняльний аналіз принципів побудови технічної структури	137
5.4.2. Аналіз та вибір програмованого логічного контролера	138
5.4.3. Розміщення технічних засобів та конфігурація мережі	152
Розділ 6. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК.	155
6.1. Вибір параметрів технічних засобів, контролера і мереж	155
6.1.1. Склад технічних засобів та параметри мережі	155
6.1.2. Вибір блоків вводу/виводу (I/O) та їх параметризація	155

6.1.3. Налаштування частотних перетворювачів, інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів	155
6.2. Розробка програм для реалізації алгоритмів логічного керування	156
6.2.1. Програма реалізації алгоритму логічного керування	156
6.2.2. Тестування програми логічного керування	158
6.3. Розробка програм переміщення робочого органу робота	159
6.3.1. Розробка програми реалізації алгоритму переміщення у тривимірному просторі	159
6.3.2. Тестування програми в середовищі моделювання CoppeliaSim	161
6.4. Розробка програм для реалізації алгоритмів регулювання	162
6.4.1. Розробка підпрограми математичної моделі об'єкта регулювання (ОР) з використанням типових динамічних ланок	162
6.4.2. Розробка підпрограми системи автоматичного регулювання (САР) із використанням типових регуляторів	164
6.4.3. Тестування програми регулювання із використанням засобів емуляції контролера	165
Розділ 7. Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.	168
7.1. Конкретизація функцій і структури екранів АРМ оператора-технолога	168
7.1.1. Обґрунтування переліку функцій графічного інтерфейсу оператора	168
7.1.2. Обґрунтування вибору екранів АРМ оператора-технолога	169
7.2. Розробка екранів АРМ оператора-технолога	170
7.2.1. Опис процесу створення екранів графічного інтерфейсу	170
7.2.2. Тестування екранів у режимі емуляції	174
7.2.3. Розробка людино-машинного інтерфейсу розробленої Web-SCADA системи для керування роботизованим комплексом	175
7.3. Конкретизація функцій та структури екранів АРМ наладчика САК	176
САК	
7.3.1. Обґрунтування переліку функцій АРМ наладчика	176
7.3.2. Обґрунтування вибору екранів АРМ наладчика	176
7.4. Розробка екранів АРМ наладчика САК	176
7.4.1. Опис процесу створення екранів графічного інтерфейсу наладчика	176
7.4.2. Тестування екранів у режимі емуляції контролера	178
Розділ 8. Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці.	179
8.1. Опис основних технічних рішень із побудови САК та склад документації	179
8.2. Розробка схеми автоматизації та специфікацій на технічні засоби системи	180

8.3. Розробка принципових схем	181
8.4. Розробка схем живлення	185
8.4.1. Вимоги до джерел живлення	185
8.4.2. Вибір апаратури контролю, живлення та захисту	185
8.5. Розробка схем компонування технічних засобів у шафі керування	186
8.5.1. Вимоги до захисту оболонки	186
8.5.2. Вибір конструктивного виконання	186
8.5.3. Компонування технічних засобів	187
8.6. Розробка таблиць з'єднань у шафі керування	188
8.7. Розробка схем зовнішніх електричних проводок та компонування робочого місця оператора-технолога	190
8.7.1. Характеристика середовища та вибір кабельної продукції	190
8.7.2. Опис схеми розташування АРМ оператора та мережевих зв'язків	191
8.8. Охорона праці	192
8.8.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) та заходи щодо їх усунення	192
8.8.2. Заходи безпеки при проведенні планово-попереджувальних (ПВР) та аварійно-відбудовних робіт	193
8.8.3. Можливі аварійні ситуації, їх локалізація та шляхи евакуації	194
Розділ 9. Попереднє обґрунтування економічної доцільності впровадження модернізованої САК.	196
9.1. Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію системи автоматизації	196
9.1.1. Визначення вартості комплексів засобів автоматизації	196
9.1.2. Визначення величини первинних інвестицій	196
9.2. Розрахунок показника економічного ефекту від модернізації системи керування	197
9.2.1. Вплив потенційних джерел економічної ефективності на показники САК	197
9.2.2. Зміна річних поточних витрат при експлуатації	197
9.2.3. Визначення додаткового обсягу реалізованої продукції	198
9.2.4. Розрахунок додаткового прибутку за рахунок збільшення продуктивності	198
9.2.5. Розрахунок економічного ефекту від модернізації системи керування	199
Висновок	200
Перелік джерел	202
Додатки	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКФ – Експериментальна автокореляційна функція

АРМ – Автоматизоване робоче місце;

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічними процесами;

АТП – автоматизація технологічного процесу;

ЗНВ – зона незначних відхилень;

ІТ Інформаційні технології

НАССР – міжнародна система безпеки харчових продуктів;

ОК – об'єкт керування;

ОПС – оптимальний параметричний синтез;

ОР – об'єкт регулювання

ОТ- Операційні технології

ПК – персональний комп'ютер;

ПЛК (PLC) – Програмований логічний контролер;

ПУЕ – правила устаткування електроустановок

САК – система автоматичного керування;

САР – Система автоматичного регулювання;

СЛУ – системи логічного управління;

ТА – технологічний агрегат;

ТЗА – технічні засоби автоматизації

ТП – технологічний процес;

ФЛС – Функціональна логічна схема

AI (Analog Input) – аналоговий вхід (сигнали 4-20 мА від датчиків);

АО (Analog Output) – аналоговий вихід (сигнали 4-20 мА для керування зсувками);

HMI (Human-Machine Interface) – Людино-машинний інтерфейс;

ISO — це міжнародний стандарт, що встановлює вимоги до системи управління безпечністю харчових продуктів;

DI (Digital Input) – дискретний вхід (сигнали «0» або «1» від кнопок та кінцевиків);

DO (Digital Output) – дискретний вихід (команди «Увімкнути/Вимкнути» для клапанів та реле);

NC (Normally Closed) – нормально закритий контакт (розмикається при спрацюванні, використовується для безпеки);

NO (Normally Open) – нормально відкритий контакт (замикається при спрацюванні);

OPEX (Operating Expenditure) – це операційні витрати, тобто регулярні, повсякденні витрати компанії, необхідні для підтримання її діяльності та отримання прибутку

PNP – тип транзисторного виходу датчика (при спрацюванні видає «плюс»);

PROFINET (PN) – промисловий стандарт мережі Ethernet для зв'язку між ПЛК та частотниками;

TIA Portal – програмне середовище для розробки та налаштування всієї автоматики Siemens;

ВСТУП

Одним із стратегічних напрямів розвитку сфер виробництва та зміцнення економік усіх країн світу є безперервне підвищення її ефективності. На сучасному етапі світового науково-технічного прогресу стрімкий розвиток мікропроцесорної техніки та інформаційних технологій створив принципово нову базу для харчової промисловості. Відбувся остаточний перехід від жорсткої релейної автоматики до цифрової основи для розробки та реалізації автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП).

Це відкриває шляхи для розвитку алгоритмів на всіх рівнях ієрархії управління – від базової логіки до складних математичних моделей оптимізації.

У цьому контексті актуальність задачі підвищення ефективності функціонування ділянки приготування тіста у двокамерному агрегаті безперервної дії є вкрай високою. Ділянка тістоприготування є найбільш критичним і складним вузлом хлібозаводу. Саме тут закладаються фундаментальні реологічні (в'язкість, пружність) та структурно-механічні властивості майбутнього продукту. Двокамерний тістомісильний агрегат безперервної дії є складним багатозв'язним об'єктом керування: процеси змішування та інтенсивної пластифікації впливають один на одного (зміна потужності неминуче викликає зміну температури тістової маси). Існуючі локальні системи автоматики та ручне керування не здатні ефективно компенсувати ці перехресні збурення, що призводить до нестабільності якості продукції, підвищеного енергоспоживання та зносу обладнання. Удосконалення системи автоматичного керування (САК) цим агрегатом є єдиним шляхом до забезпечення стабільної якості напівфабрикату та усунення впливу «людського фактора», що робить дану кваліфікаційну роботу вкрай актуальною.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування ділянки приготування тіста шляхом розробки сучасної, високоточної

мікропроцесорної системи автоматичного керування двокамерним тістомісильним агрегатом на базі обладнання Siemens.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні основні завдання:

Провести аналіз технологічного процесу, виявити потенційні джерела економічної ефективності та конкретизувати задачі модернізації САК.

Розробити концептуальну модель об'єкта керування та виконати структурну і параметричну ідентифікацію математичних моделей його компонентів.

Здійснити розробку та параметричну оптимізацію алгоритмів багатозв'язного регулювання (автономної САР) у середовищі MATLAB/Simulink.

Розробити алгоритми логічного керування агрегатом (технологічний пуск, зупинка, протиаварійний захист).

Вибрати технічні засоби автоматизації, розробити технічну структуру контролерно-комп'ютерної мережі та підготувати комплект конструкторської документації (схеми підключень).

Розробити програмне забезпечення для ПЛК та людино-машинний інтерфейс (SCADA) для АРМ оператора-технолога.

Виконати попереднє техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої САК.

Об'єкт дослідження – технологічний процес приготування тіста у двокамерному агрегаті безперервної дії.

Предмет дослідження – апаратні, алгоритмічні та програмні засоби системи автоматичного керування тістомісильним агрегатом.

Потенційними джерелами економічної ефективності від впровадження розробленої САК є:

- зниження відсотка технологічного браку за рахунок жорсткої стабілізації температури та консистенції тіста;

- економія електроенергії (до 20-30%) завдяки переходу від прямого пуску двигунів до використання частотно-регульованих приводів;
- збільшення міжремонтного інтервалу механічного обладнання за рахунок плавних пусків та інтелектуального захисту від перевантажень.

Принципи вибору технічних та програмних засобів автоматизації базуються на вимогах надійності, відкритості архітектури та суворій відповідності санітарно-гігієнічним нормам харчового виробництва (НАССР) і правилам електробезпеки (ПУЕ).

1. ОПИС ДІЛЯНКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЙОГО АГРЕГАТИВ ТА ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ НИМИ. ВИЯВЛЕННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ І КОНКРЕТИЗАЦІЯ ЗАДАЧІ МОДЕРНІЗАЦІЇ САК.

1.1. Автоматизована ділянка технологічного процесу: локалізація, перехід від аналізу сутності технології до її формалізованого подання у формі взаємозв'язків параметрів

Розробка сучасної системи автоматичного керування (САК) вимагає переходу від фізичної природи технологічного процесу до його абстрактної математичної моделі. Цей етап є критично важливим, оскільки мікропроцесорні засоби керування (ПЛК) оперують не фізичними властивостями середовищ, а цифровими значеннями, логічними станами та математичними залежностями.

Процес формалізації для обраного об'єкта здійснюється у три послідовні етапи:

1. Локалізація об'єкта автоматизації

Межами об'єкта керування у даній роботі визначено двокамерний тістоприготувальний агрегат безперервної дії.

Отже, початок ділянки – це вузли приймання та дозування сировини (шнековий дозатор борошна; трубопроводи подачі води, розчинів солі, цукру, жиру та опари). Кінець ділянки – це вузол вивантаження готової тістової маси з другої камери агрегату.

Зовнішнє середовище – це виробниче приміщення тістомісильного відділення (з урахуванням коливань температури повітря та вологості).

Усі процеси, що відбуваються всередині цих меж, розглядаються як єдина динамічна система.

2. Аналіз сутності технології

Фізико-хімічна сутність процесу полягає у безперервному перетворенні вхідних компонентів на тістову масу із заданими реологічними властивостями.

У першій камері (змішування) відбувається гідратація борошна та початкове змішування інгредієнтів. Фізично це супроводжується різким зростанням в'язкості маси, що створює опір на валу місильного органу.

У другій камері (пластифікація) відбувається інтенсивне механічне оброблення (заміс), під час якого формується клейковинний каркас тіста. Цей процес супроводжується значним виділенням теплової енергії через внутрішнє тертя продукту об робочі органи, що викликає нагрівання тіста.

3. Формалізоване подання та взаємозв'язок параметрів

Для побудови системи автоматичного керування технологічна сутність процесу була переведена у формалізовану структуру змінних (координат), які поділено на три групи:

Вихідні (регульовані) координати (Y) – це показники стану процесу, які безпосередньо впливають на якість продукції і які необхідно стабілізувати.

$y_1(P_a)$ – потужність головного приводу першої камери (непрямий, але найбільш точний показник в'язкості та густини тіста).

$y_2(\theta)$ – температура тіста на виході з другої камери (критичний показник для життєдіяльності дріжджів та процесу бродіння).

Вхідні (керуючі) впливи (u) – це змінні, якими система керування може цілеспрямовано маніпулювати для підтримки вихідних координат на заданому рівні.

u_1 – ступінь відкриття регулюючої зсувки (шибера $Z3$) на виході першої камери. Змінює час перебування маси в камері, регулюючи навантаження (P_a).

u_2 – ступінь відкриття регулюючої зсувки (шибера $Z4$) на виході другої камери. Регулює інтенсивність механічної обробки, впливаючи на кінцеву температуру (θ).

Збурювальні впливи (f) – це неконтрольовані або випадкові зовнішні фактори, що відхиляють процес від норми.

f_1 – коливання витрати борошна, через нерівномірність роботи шнекового дозатора, та компонентів (впливає на в'язкість).

f_2 – зміна температури навколишнього середовища та вхідних компонентів (впливає на тепловий баланс).

Формалізований аналіз показує, що об'єкт є багатозв'язним. Зміна керуючого впливу u_1 (для стабілізації потужності P_a) неминуче призводить до зміни об'єму тіста, що надходить у другу камеру, а отже, викликає зміну температури θ . Цей внутрішній перехресний зв'язок є дестабілізуючим фактором для класичних одноконтурних систем.

Отримане формалізоване подання агрегату як динамічної системи з входами (u_1, u_2, f_1, f_2) та виходами (P_a, θ) створює строгу математичну базу для подальших етапів розробки. Воно дозволяє ідентифікувати передатні функції об'єкта, обґрунтувати необхідність застосування автономної САР (для компенсації перехресних зв'язків) та розробити відповідні алгоритми керування для реалізації на базі промислового контролера SIMATIC S7-1500.

1.1.1. Коротка історична довідка та характеристика виробничої діяльності хлібопекарського підприємства

Об'єктом дослідження у даній роботі виступає сучасне хлібопекарське підприємство промислового типу (хлібозавод), що спеціалізується на масовому випуску хлібобулочних виробів.

Історично розвиток хлібопекарського виробництва відображає класичний шлях еволюції вітчизняної харчової промисловості. Засноване у другій половині XX століття, виробництво починало свою діяльність із застосуванням переважно ручної праці та локальних напіваавтоматичних установок. Зі зростанням обсягів споживання та посиленням ринкової конкуренції відбулось кілька масштабних етапів реконструкції.

Протягом останніх десятиліть головним вектором розвитку стала комплексна механізація потокових ліній. На сучасному етапі підприємства реалізують стратегію цифрової трансформації. Головною метою цієї стратегії є повна відмова від застарілих релейно-контакторних схем керування на користь сучасних мікропроцесорних систем, що дозволяє мінімізувати вплив «людського фактора», знизити енергоспоживання та забезпечити сувору

відповідність європейським стандартам харчової безпеки (ISO, система HACCP).

Виробнича діяльність підприємства, що розглядається у даній роботі, охоплює повний цикл переробки сировини у готову продукцію. Технологічна структура заводу поділяється на наступні основні види виробництв (технологічні ділянки):

Відділення зберігання та підготовки сировини, що включає склади безтарного зберігання борошна (силоси), системи пневмотранспорту, ділянки водопідготовки та приготування рідких компонентів (розчинів солі, цукру, дріжджів, жиру).

Тістоприготувальне відділення (основна ділянка, що розглядається в проекті) – це ключовий вузол підприємства, де відбувається автоматичне дозування інгредієнтів за заданою рецептурою, безперервний або порційний заміс тістової маси та її бродіння (дозрівання).

Тістообробне та формувальне відділення: ділянка машинної обробки напівфабрикату (тістоділителі, округлювачі, тістозакатувальні машини) та вистоювання тістових заготовок.

Пекарне відділення де відбувається термічна обробка продукції у тунельних або ротаційних печах із заданими температурними режимами.

Відділення циркуляції, пакування та логістики для охолодження готового хліба, його нарізання, автоматичного пакування та відвантаження на склад.

Незважаючи на високий загальний рівень механізації, саме тістоприготувальне відділення сьогодні є найбільш "вузьким місцем" у забезпеченні якості продукції. Тісто є складною дисперсною системою, властивості якої (в'язкість, температура) постійно змінюються. Існуючий (базовий) рівень автоматизації, що спирається на локальні прилади контролю та ручне підлаштування зсувок, не здатний забезпечити високу динамічну точність ведення процесу.

Саме тому виникає гостра виробнича необхідність у модернізації цієї ділянки, а саме, впровадженні промислових контролерів (ПЛК), частотних перетворювачів та розробці інтелектуальних систем автоматичного регулювання (САР), що і є предметом дослідження у даній кваліфікаційній роботі.

1.1.2. Узагальнена схема технологічного процесу та виділення ділянки для розробки системи автоматичного керування

Виробництво хлібобулочних виробів на сучасному підприємстві являє собою складний, багатостадійний і безперервний технологічний потік, у якому якість кінцевого продукту залежить від суворого дотримання режимів на кожному з етапів.

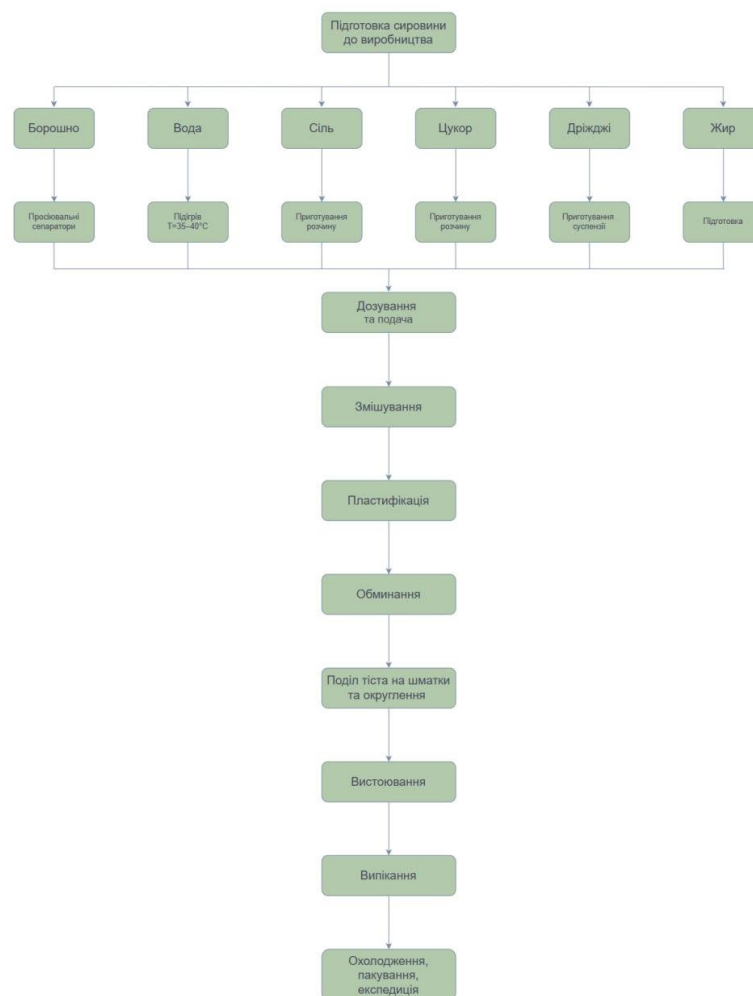


Рис. 1.1. – Узагальнена структурна схема технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів.

Загальний технологічний процес хлібопекарського виробництва (Рис.1.1) складається з наступних послідовних стадій.

Борошно зберігається у силосах, проходить магнітне очищення та просіювання. Рідкі компоненти (вода, сольові та цукрові розчини, жир, дріжджова суспензія або опара) проходять стадії фільтрації, темперування (підігріву/охолодження) та накопичення у витратних ємностях.

Відбувається строго дозована подача сухої та рідкої сировини у тістомісильне обладнання, де відбувається механічне змішування (гідратація білків і крохмалю) та інтенсивна пластифікація для утворення однорідної в'язко-пружної маси (тіста) із заданою температурою.

Далі відбувається дозрівання тіста у спеціальних бункерах або потокових ємностях для накопичення смакових та ароматичних речовин; поділ готової маси на шматки заданого розміру, їх округлення, попереднє вистоювання для зняття механічного напруження та остаточне надання форми майбутнього виробу.

Потім остаточне вистоювання тістових заготовок у шафах з контрольованим мікрокліматом (висока вологість та температура) для розпушення тіста вуглекислим газом.

Випікання – термічна обробка заготовок у хлібопекарських печах (ротаційних або тунельних) за визначеними температурними зонами до готовності.

Та на останок зниження температури хліба до нормативних значень, нарізання (за потреби), пакування у полімерні матеріали та відправка на склад готової продукції.

З наведеної узагальненої схеми технологічного процесу для подальшого глибокого дослідження та розробки сучасної САК виділено ділянку приготування тіста, а саме, процес безперервної подачі дозованої сировини та інтенсивного замісу в двокамерному тістоприготувальному агрегаті.

На вхід системи безперервно подаються сухі (борошно) та рідкі (вода, розчини солі та цукру, жир, опара) компоненти. В ході проходження через робочі зони агрегату ці розрізнені потоки змішуються, гідратуються та піддаються інтенсивній механічній обробці (пластифікації). На виході формується єдиний матеріальний потік – однорідна тістова маса із заданими реологічними властивостями.

Для здійснення процесу до системи підводиться електрична енергія, яка через електродвигуни та редуктори перетворюється на механічну енергію обертання місильних органів. У процесі інтенсивного тертя тістової маси об стінки камер та лопаті, значна частина механічної енергії перетворюється у теплову енергію, що призводить до нагрівання продукту.

Цілеспрямоване керування цим перетворенням полягає у підтримці балансу між кількістю матеріалу, що надходить, та підведеною механічною енергією для забезпечення стабільної в'язкості та температури готового тіста.

1.1.4. Опис конструкції технологічного агрегату та особливості його експлуатації

Технологічним агрегатом (ТА) є тістоприготувальна машина безперервної дії, конструкція якої розподілена на кілька функціональних блоків:

- Блок дозованих компонентів: Включає ємність борошна зі шнековим живильником та регулюючою зсувкою; ємності рідких компонентів і систему трубопроводів їх подачі, які оснащені електричними клапанами.
- Перша камера (Змішування): Являє собою коритоподібну ємність із місильним валом, оснащеним лопатями. Призначена для гідратації борошна та попереднього змішування компонентів у пухку масу. Привід валів змішувача здійснюється від мотора. На виході камери встановлена регулююча шиберна зсувка (Z3).
- Друга камера (Пластифікації): Основний робочий вузол, де відбувається інтенсивний заміс та утворення клейковинного каркаса тіста. Має циліндричну форму. Обертання на робочі органи (ротори) передається від

електродвигуна. Місильні органи змонтовані у підшипниках кочення, захищених системою спеціальних гумових сальників, які унеможливають потрапляння мастила в камеру з тістом, а тістової маси у підшипникові вузли. Ротори мають постійний профіль по всій довжині, що зводить до мінімуму поздовжній масообмін, але забезпечує максимально інтенсивне поперечне перемішування.

Виступаючі елементи роторів ділять поперечний переріз камери на п'ять динамічних зон. При обертанні три з них виконують роль транспортуючих, а дві інші постійно змінюють свій об'єм, працюючи як зона розширення та зона стиснення.

У транспортуючих зонах тістова маса піддається комплексному впливу напружень зсуву, відцентрових сил та гравітації. Асиметрія цих сил створює інтенсивні циркуляційні потоки всередині маси. Саме таке глибоке об'ємне деформування (стиснення-розширення-зсув) вимагає значних витрат механічної енергії та призводить до інтенсивного тепловиділення, що обумовлює необхідність суворого автоматичного контролю температури.

Для забезпечення гігієнічних норм камера інтенсивної обробки має знімну кришку з гвинтовими затискачами. Передбачено систему висування робочих органів: обертанням маховика винтового механізму каретка з роторами по напрямних повністю виводиться з робочого об'єму камери для очищення. Промивна вода стікає у спеціальний піддон і відводиться в каналізацію.

Особливості експлуатації агрегату полягають в тому, що агрегат працює в умовах екстремальних динамічних навантажень та підвищеної вологості. Тісто є липким та високов'язким середовищем, що генерує значний і постійно мінливий механічний опір. З огляду на необхідність регулярного висування роторів та вологої санітарної обробки (миття водою під тиском), відповідно до системи харчової безпеки (НАССР), до електрообладнання агрегату висувуються найжорсткіші вимоги.

1.1.5. Умови економічно доцільної реалізації розглянутого технологічного процесу

Реалізація даного безперервного технологічного процесу є можливою та економічно доцільною за наступних умов:

1. Забезпечення безперервного та стабільного потоку сировини відповідної якості без зупинок лінії.
2. Підтримка високої продуктивності агрегату (від 1000 кг/год) для забезпечення рентабельності масового виробництва хлібобулочних виробів.
3. Мінімізація технологічного браку (недомісу або перегріву тіста), що досягається виключно за рахунок автоматичної стабілізації параметрів процесу.
4. Оптимізація енергоспоживання потужних електроприводів шляхом використання частотного регулювання.

1.1.6. Параметризація схеми технологічного процесу

Для переходу від фізичного опису об'єкта до його математичної моделі проведено параметризацію структурної схеми технологічного процесу (рис. 1.3). Процедура параметризації полягає у визначенні та нанесенні на схему ключових фізико-механічних та енергетичних параметрів, які характеризують стан матеріальних потоків та режим роботи технологічного агрегату (ТА).

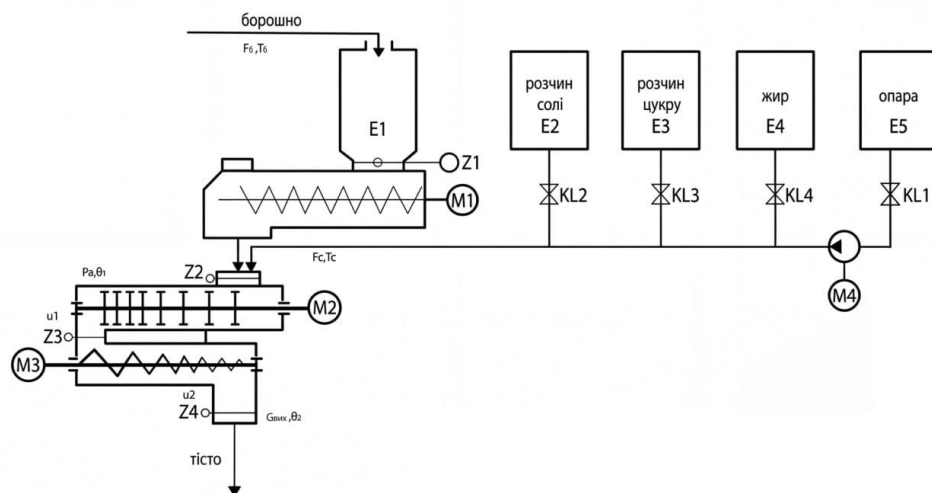


Рис. 1.3 – Параметризована технологічна схема процесу приготування тіста

Відповідно до структурно-функціональної побудови двокамерного тістоприготувального агрегату, параметризацію виконано за двома напрямками:

а) Параметри матеріальних та енергетичних потоків (вхідні та вихідні змінні)

Ці параметри нанесені на схемі поряд із відповідними лініями подачі сировини та вивантаження готового продукту. Вони визначають кількісні та якісні характеристики середовищ.

Лінія подачі борошна (основна суха сировина):

F_6 – витрата борошна (кг/год);

T_6 – початкова температура борошна ($^{\circ}\text{C}$).

Лінія подачі рідких компонентів (суміш розчинів солі, цукру, жиру та опари):

F_c – сумарна об'ємна витрата рідкої суміші (л/год);

T_c – температура рідкої суміші ($^{\circ}\text{C}$).

Лінія вивантаження готового тіста:

$G_{\text{вих}}$ – масова продуктивність агрегату за готовим тістом (кг/год);

θ_2 – кінцева температура готового тіста на виході з другої камери ($^{\circ}\text{C}$) – одна з головних регульованих координат.

б) Параметри у робочих зонах ТА:

Ці параметри нанесені безпосередньо біля робочих камер агрегату, де відбувається змішування та пластифікація маси. Вони характеризують стан процесу та енергетичні витрати:

Перша камера (зона інтенсивного змішування, привід M2):

P_a – потужність електродвигуна місильного органу (кВт). Цей параметр є непрямым індикатором в'язкості тістової маси, що утворюється. Є другою головною регульованою координатою.

θ_1 – температура напівфабрикату в першій камері ($^{\circ}\text{C}$).

u_1 – керуючий вплив на шибєрну зсувку Z3 (ступінь відкриття у %). Визначає інтенсивність перетікання маси до другої камери.

Друга камера (зона пластифікації та замісу, привід М3):

u_2 – керуючий вплив на вихідну шибєрну зсувку Z4 (ступінь відкриття у %).

Визначає час перебування тіста в зоні інтенсивної механічної обробки, що безпосередньо впливає на його кінцеву температуру θ_2 .

θ_2 – температура тіста на виході агрегата.

Нанесена на технологічну схему система позначень чітко розмежовує вхідні збурення (F_6 , T_6 , F_c , T_c), вихідні показники якості процесу (P_a , θ_2 , $G_{\text{вих}}$) та доступні канали керування (u_1 , u_2). Це формує повну параметричну картину об'єкта, необхідну для подальшого аналізу причинно-наслідкових зв'язків та побудови концептуальної математичної моделі системи керування.

1.1.7. Первинний аналіз параметрів технологічного процесу та технологічного агрегату

На основі параметризації, виконаної у п. 1.1.6, проведено первинний системний аналіз ідентифікованих фізичних та енергетичних величин. Відповідно до вимог технологічного режиму приготування тіста та умов безпечної експлуатації агрегату, всі параметри поділено на дві взаємопов'язані групи: групу регламентованих параметрів та групу параметрів впливу.

1. Регламентовані параметри

Ця група містить змінні, підтримання яких на заданому (номінальному) рівні або в межах жорстких допусків є безпосередньою ціллю керування. Відхилення цих параметрів призводить до браку продукції або аварійної зупинки обладнання. До них належать:

- Температура тістової маси на виході з камери пластифікації (θ_2) – суворо регламентований технологічний параметр. Відповідає за інтенсивність біохімічних процесів (розмноження дріжджів, ферментація).
- Потужність електродвигуна місильного органу (P_a) – комплексний експлуатаційно-технологічний параметр. З одного боку, він жорстко регламентований номінальними характеристиками приводу (для запобігання перевантаженню та перегріву двигуна), з іншого – є

еталонним показником стабільності в'язкості та густини тістової маси (показник якості гідратації борошна).

2. Параметри впливу

Ця група формує мінливі умови (як керовані, так і некеровані), у середовищі яких розроблювана мікропроцесорна система повинна досягати поставленої цілі (стабілізації групи «1»). До цієї групи увійшли:

- Ступінь відкриття регулюючих шиберних зсувок (u_1, u_2) – механічні параметри, що визначають прохідний переріз на виході з камер. Це єдині параметри з цієї групи, які система може цілеспрямовано змінювати (керуючі впливи). Вони впливають на час перебування маси в камерах, рівень їх заповнення і, як наслідок, на зміну енергії (нагрів θ) та опір на валу (P_a).
- Масова витрата борошна (F_b) та об'ємна витрата рідких компонентів (F_c) – матеріальні збурення. Їх коливання (через похибки дозаторів або зміну тиску в магістралях) миттєво змінюють співвідношення "сухе/рідке", що радикально впливає на в'язкість тіста і потужність P_a .
- Температура сировини (T_b, T_c) та навколишнього середовища – це енергетичні (теплові) збурення. Впливають на загальний тепловий баланс у камерах агрегату, зміщуючи кінцеву температуру тіста θ_2 .
- Фізико-хімічні властивості борошна (вологість, водопоглинальна здатність, якість клейковини) – неконтрольовані параметричні збурення, які неможливо виміряти в режимі реального часу, але які постійно змінюють реологічний опір тіста під час пластифікації.

Отже, складені переліки чітко формалізують задачу для розроблюваної системи автоматизації. Головна ціль керування зводиться до постійної стабілізації параметрів групи «1» (P_a, θ_2) в умовах безперервної дії дестабілізуючих факторів групи «2» (збурень F_b, T_c та ін.). Досягнення цієї цілі можливе виключно шляхом безперервного та математично обґрунтованого

коригування інших параметрів групи «2» – положень регулюючих зсувок u_1 та u_2 .

1.1.8. Поглиблений аналіз регламентованих параметрів та наслідків їх виходу за допустимі межі

Основу нормативів ведення технологічного процесу приготування тіста складають три основні регламенти: технологічний, експлуатаційний та техніко-економічний (із врахуванням екологічної складової). Відповідно до цих регламентів, усі контрольовані параметри об'єкта було поділено на три групи з подальшим аналізом їхніх номінальних значень, допусків та наслідків відхилень.

1 Технологічний регламент

Технологічний регламент визначає умови, за яких отримують продукт із заданими фізико-механічними властивостями (однорідність, вологість, пластичність, температура). Головним регламентованим параметром цієї групи є температура тіста на виході з агрегату (θ_2). Нормативне значення цього параметра задається технологічною картою (рецептурою) і становить номінально 29 °C.

Тривалі допустимі відхилення ($\pm 0,5$ °C) утворюють зону незначних відхилень (ЗНВ). У межах цієї зони дріжджові клітини розвиваються нормально, якість клейковини не страждає. Втручання системи керування має бути плавним (без різких рухів зсувок).

Короткочасні відхилення (± 2 °C). Виникають при зміні дозування сировини (f_1). Допускаються лише на обмежений час (до 2 хвилин) під час перехідних процесів. Наслідки – це тимчасова зміна швидкості ферментації, незначне відхилення пористості м'якушки готового хліба.

Граничнодопустимі відхилення (> 35 °C або < 24 °C): Є ознакою грубого порушення ТП. Як наслідок, при перегріві понад 35 °C починається денатурація білків та масова загибель дріжджів. Процес не припиняється автоматично, але тісто повністю втрачає свої властивості (закисає). Це

призводить до 100% браку всієї партії, що вимагає зупинки агрегату та його повного очищення (скидання маси у відходи).

2. Експлуатаційний регламент

Експлуатаційний регламент визначає умови нормальної та безаварійної роботи двокамерного агрегату. Він містить номінальні значення ступеня заповнення камер та навантаження на електроприводи. Головним параметром тут є потужність головних приводів змішування та замісу (P_a), яка характеризує як стан обладнання, так і в'язкість матеріального потоку.

Номінальне значення для приводу камери замісу становить 4 кВт.

Тривалі допустимі відхилення ($\pm 5\%$ від номіналу): Робоча зона. Свідчить про нормальну роботу редукторів та допустимі коливання в'язкості тіста.

Короточасні відхилення (до $+12,5\%$): Допускаються під час пускових режимів або при тимчасовому надходженні борошна з підвищеною вологопоглинальною здатністю. Система керування повинна компенсувати це відкриттям шибєрної зсувки (u_1, u_2). Наслідки: прискорений знос механіки, підвищені енерговитрати, проте процес не припиняється.

Граничнодопустимі відхилення (понад $+25\%$, тобто $>9,3$ кВт): Ознака аварії. Фактично це означає перевантаження приводу, заклинювання шнека через надмірно круте тісто або переповнення камери. Як наслідок, спрацювання апаратного захисту частотного перетворювача. Процес припиняється повністю. Вимагає ручного втручання, вивантаження тіста з камери та перезапуску системи, що веде до значних простоїв.

3. Техніко-економічний та екологічний регламент

Цей регламент визначає умови ефективності ведення ТП. До таких параметрів належать: продуктивність агрегату (кг/год), питомі витрати електроенергії (кВт·год на 1 т тіста) та рівень втрат сировини.

Екологічні параметри процесу приготування тіста, з огляду на відсутність токсичних викидів, безпосередньо зводяться до техніко-економічних показників.

Відхилення у питомих витратах енергії виникають при тривалій роботі приводів на підвищених навантаженнях (через неоптимальне положення зсувок). Наслідки: збільшення собівартості продукції, зниження економічної ефективності виробництва. Компенсується впровадженням інтелектуального частотного регулювання.

Утворення відходів (брак тіста) виникає при виході технологічних параметрів за граничнодопустимі межі. Це веде до значних фінансових втрат на списання сировини та додаткові витрати ресурсів на екологічну (біологічну) утилізацію зіпсованої органічної маси тіста.

Проведений аналіз доводить, що вихід технологічних та експлуатаційних параметрів за межі короточасних допусків призводить або до випуску бракованої продукції, або до аварійної зупинки агрегату. Це формує жорсткі вимоги до розроблюваної САК, вона повинна володіти високою швидкодією та динамічною точністю, щоб утримувати параметри виключно в зоні "тривалих допустимих відхилень", мінімізуючи техніко-економічні втрати підприємства.

1.1.9. Поглиблений аналіз параметрів, які впливають на регламентовані параметри ТП, та вибір керуючих впливів

Поточні значення регламентованих параметрів технологічного процесу приготування тіста (потужність P_a та температура θ_2) неминуче відхиляються від номінальних і можуть виходити за межі встановлених допусків унаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Для виявлення ефективних важелів керування ці параметри впливу згруповано за трьома фізичними ознаками:

1. Сировинні параметри

Характеризують властивості компонентів, що надходять на переробку. До цієї групи належать витрати та температури сировинних компонентів, зокрема: масова витрата і температура борошна (F_b , T_b), а також об'ємна витрата і температура рідкої суміші (F_c , T_c).

Причинами змін, можна вважати коливання, які виникають через нестабільність роботи дозуючого обладнання (шнеків, насосів), зміну фізико-

механічних властивостей борошна від партії до партії, а також сезонні зміни температури сировини на складах.

Теоретично, оператор може "вручну" змінити подачу борошна або води для корекції густини тіста (цілеспрямована зміна). Однак, змінювати ці параметри цілеспрямовано для регулювання процесу категорично заборонено, оскільки це призведе до порушення затвердженої рецептури (співвідношення інгредієнтів). Тому в розроблюваній САК зміна сировинних параметрів розглядається виключно як неконтрольовані координатні збурення (f_1).

2. Енергетичні параметри

Характеризують енергію, що підводиться до технологічного обладнання ззовні та витрачається на зміну властивостей продукту. Для двокамерного агрегату сюди належать електрична енергія, що споживається приводами робочих органів (перетворюється на потужність P_a), а також теплова енергія середовища (температура в цеху f_2).

Отже причиною змін енергетичних параметрів є зміна опору тістової маси під час гідратації (внутрішнє тертя) та коливання мікроклімату в приміщенні.

Цілеспрямована зміна температури навколишнього середовища в масштабах цеху є економічно недоцільною та надто інерційною. Зміна ж підведеної електричної потужності (швидкості приводів) є інструментом оптимізації, а не прямим регулятором масообміну. Відповідно, енергетичні фактори середовища також відносяться до збурень.

3. Механічні та інші специфічні параметри

Характеризують стан і режими роботи технологічного обладнання. До цієї групи відносяться: заповнення камер, гідродинамічні умови руху тіста, а також положення регулюючих органів – шибєрних зсувок на виході першої та другої камер (u_1, u_2).

Причини змін: ці параметри змінюються виключно внаслідок втручання зовнішньої сили (механічне переміщення шибєра оператором "вручну" або за допомогою моторизованого електроприводу).

Положення зсувок ідеально піддається миттєвій, цілеспрямованій та безперервній зміні від 0 до 100 %. Зміна перерізу вихідного отвору безпосередньо і швидко визначає інтенсивність відтоку продукту, ступінь заповнення робочого простору та, як наслідок, тривалість перебування тіста в камерах агрегату.

Аналізуючи виділені групи, стає очевидним, що для стабілізації регламентованих показників (P_a та θ_2) без порушення рецептури продукту єдиним правильним технологічним та інженерним рішенням є цілеспрямована зміна механічних параметрів.

Таким чином, із групи механічних параметрів у якості керуючих впливів об'єкта керування для проектованої САК остаточно обрано:

u_1 – ступінь відкриття зсувки на виході першої камери (для стабілізації потужності P_a);

u_2 – ступінь відкриття зсувки на виході другої камери (для стабілізації температури тіста θ_2).

Узагальнені нормативні вимоги до ведення технологічного процесу приготування тіста, номінальні значення параметрів та їх допустимі відхилення (розділені на тривалі та короткочасні згідно з технологічним регламентом) зведено у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1. Таблиця регламентів

№ п/п	Назва параметра	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальні значення параметрів або функція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короткочасні ($0 < t < \infty$)	Час, с
1	Потужність технологічного навантаження	P_a	кВт	4,0	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	30
2	Температура тіста в першій камері	θ_1	°C	28	$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	120
3	Температура тіста в другій камері	θ_2	°C	29	$\pm 0,5$	$\pm 2,0$	120

4	Витрати сировинних компонентів	f_1	кг/год	600	$\pm 10,0$	$\pm 50,0$	-
5	Температура навколишнього середовища	f_2	$^{\circ}\text{C}$	20	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$	-
6	Рівень тіста	H_T	%	70	$\pm 5,0$	$\pm 15,0$	30
7	Положення тзсувки (камера 1)	u_1	% х.р.о.	Варюється (0...100)	-	-	-
8	Положення тзсувки (камера 2)	u_2	% х.р.о.	Варюється (0...100)	-	-	-

1.1.10. Розробка параметричної схеми технологічного процесу

На основі поглибленого аналізу параметрів, проведеного у попередніх підрозділах, розроблено параметричну схему технологічного процесу (фактично – об'єднану схему ТП і ТА). Ця схема абстрагується від фізичної сутності процесів змішування та пластифікації (без урахування термодинаміки чи конструкції агрегату) і відображає об'єкт виключно на формальному рівні як систему спрямованих інформаційних та причинно-наслідкових зв'язків між входами та виходами.

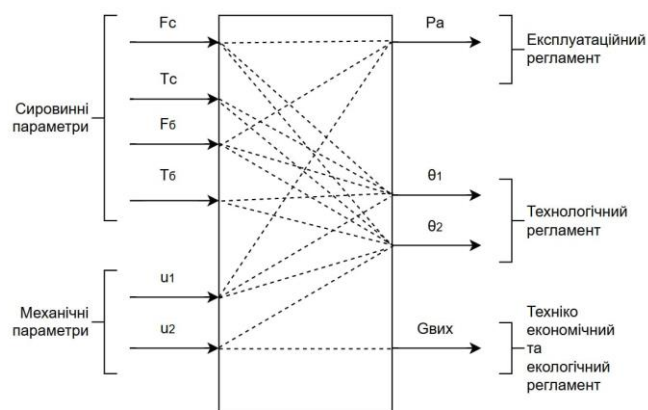


Рис. 1.4. – Параметрична загальна схема процесу приготування тіста.

Проведемо аналіз причинно-наслідкових зв'язків параметричної схеми (рис. 1.4). Двокамерний тістоприготувальний агрегат являє собою

багатозв'язний об'єкт керування. На формальному рівні відображено вплив вхідних параметрів на вихідні.

Параметри, що відображають умови функціонування об'єкта, розглядаються як вхідні. До них належать:

- Сировинні параметри (збурення):
 - витрати F_c, F_b ,
 - температури суміші та борошна T_c, T_b .

Вони визначають матеріальний та тепловий баланс процесу і носять випадковий характер. Коливання витрат (F_c, F_b) та температур (T_c, T_b) вхідних компонентів мають комплексний вплив на всі вихідні координати. Зокрема, зміна витрати борошна (F_b) є першопричиною дестабілізації в'язкості маси, що відображається на експлуатаційному параметрі – потужності (P_a). Температурні збурення (T_c, T_b) впливають переважно на технологічний регламент – температури в камерах (θ_1, θ_2).

- Керуючі впливи:
 - положення зсувки на виході першої камери u_1 ,
 - положення зсувки на виході другої камер u_2 .

Вони дозволяють цілеспрямовано змінювати режим роботи агрегату. Положення зсувки першої камери (u_1) є прямим важелем керування для стабілізації потужності (P_a). Положення зсувки другої камери (u_2) визначає час інтенсивного замісу, що прямо впливає на кінцеву температуру готового тіста (θ_2) та загальну продуктивність ($G_{\text{вих}}$).

Параметри, що відображають мету функціонування об'єкта моделювання та додаткові вимоги до нього, тобто регламентовані параметри, розглядаються як вихідні. До них належать:

- Технологічний регламент (показники якості):
 - температура тіста на виході θ_2 (основна регульована величина),
 - температура тіста в першій камері θ_1 (проміжна величина).
- Експлуатаційний регламент (безпека та режими роботи):

- активна потужність приводу P_a , що характеризує навантаження на вал, в'язкість тіста та технічний стан обладнання.

- Техніко-економічний та екологічний регламент (ефективність):

- витрата готового тіста $G_{\text{вих}}$ (продуктивність).

Цей параметр визначає ефективність виробництва та повинен відповідати заданому темпу роботи всієї потокової лінії для уникнення економічних втрат.

Зв'язок між вхідними та вихідними параметрами є причинно-наслідковим. Наприклад, зміна витрати сировини миттєво впливає на рівень тіста та навантаження на привід, а з часом на температуру. Керуючі впливи дозволяють компенсувати ці збурення.

1.2. Виявлення існуючого рівня автоматизації ділянки ТП

1.2.1. Оцінка існуючого рівня реалізації функції регулювання для технологічних та експлуатаційних параметрів

На існуючій ділянці тістоприготування функції стабілізації основних параметрів реалізовані на базовому рівні, що не відповідає сучасним вимогам до динамічної точності. Оцінка існуючого стану для кожного регламентованого параметра наведена нижче.

1. Експлуатаційний параметр: Активна потужність приводу (P_a)

Параметр P_a вимагає безперервного регулювання, оскільки він є індикатором реологічного стану (в'язкості) тіста та визначає механічне навантаження на привід. Його стабілізація запобігає перевантаженню електродвигуна та забезпечує однорідність гідратації борошна.

Для вирішення цього завдання використовується зміна положення шиберної зсувки (керуючий вплив) на виході першої камери (u_1), що змінює рівень заповнення камери.

Найбільш суттєво на зміну потужності впливає нестабільність масової витрати сировини (f_1). Цей параметр може бути віднесений до

контрольованого збурення (шляхом встановлення датчиків витрати), однак у базовій схемі його компенсація відбувається із запізненням.

На даному підприємстві функція регулювання потужності виконується «вручну». Технологічний персонал (оператор) візуально контролює покази стрілочного амперметра на шафі керування і періодично вручну коригує положення заслінки за допомогою механічного штурвала або кнопок місцевого керування приводом зсувки.

2. Технологічний параметр: Температура готового тіста (θ_2)

Температура вимагає жорсткого регулювання, оскільки від неї залежить швидкість ферментації, активність дріжджів та якість пористості майбутнього хліба. Перегрів тіста призводить до незворотного браку продукції.

Використовується зміна положення шиберної зсувки (керуючий вплив) на виході другої камери (u_2). Прикриття зсувки збільшує час інтенсивного замісу, що через внутрішнє тертя підвищує температуру маси.

Контрольоване збурення: Найбільший вплив на температуру θ_2 здійснює зміна температури вхідних рідких компонентів та середовища (f_2), а також перехресний вплив від зміни об'єму маси з першої камери.

Регулювання здійснюється «вручну». Оператор періодично вимірює температуру тіста на виході за допомогою портативного щупового термометра (або візуально за локальним біметалевим термометром) і на основі власного досвіду відкриває чи прикриває вихідну зсувку другої камери. Це зумовлює високу інерційність та значні температурні відхилення.

1.2.2. Функції логічного управління, оцінка існуючого рівня їх реалізації

На існуючому об'єкті функції логічного управління (пуски, зупинки, блокування) реалізовані переважно на базі жорсткої релейно-контакторної автоматики без використання централізованих програмованих контролерів.

1. Технологічний пуск агрегату

Згідно з регламентом, технологічний пуск з неробочого стану в робочий можливий лише за умов: наявності достатнього рівня сировини у видаткових бункерах; закритого стану оглядових кришок агрегату (спрацювання кінцевих

вимикачів безпеки); готовності ліній вивантаження тіста. Послідовність вимагає спочатку запустити приводи мішалок, а потім відкрити подачу компонентів.

На даному етапі функція виконується «вручну» технологічним персоналом. Оператор послідовно натискає кнопки пуску на місцевому пульті керування (пуск головних двигунів → пуск дозатора борошна → відкриття клапанів рідин). Алгоритмічна синхронізація (затримки часу) забезпечується виключно увагою оператора.

2. Технологічна зупинка агрегату

Планова зупинка (в кінці зміни або при переході на інший рецепт) вимагає строгої послідовності: спочатку припиняється подача сировини, потім агрегат працює певний час "вхолосту" для повного вивантаження залишків тіста з обох камер, і лише після цього зупиняються головні приводи та закриваються вихідні зсувки.

На даному етапі виконується «вручну» технологічним персоналом. Оператор зупиняє подачу борошна та рідких компонентів, візуально через оглядове вікно оцінює ступінь спорожнення камери замісу і самостійно приймає рішення про повне знеструмлення двигунів. Це часто призводить до налипання залишків тіста на роторах через передчасну зупинку.

3. Аварійна зупинка та блокування передаварійних ситуацій

Блокування передаварійної ситуації необхідне при виникненні механічного перевантаження (заклинювання шнека), обриві фаз живлення, відкритті захисних решіток під час роботи, або при натисканні кнопки "Stop". У таких випадках необхідно миттєво знеструмити всі приводи та перекрити електромагнітні клапани подачі рідин для запобігання поломці механіки та затопленню цеху.

На даному етапі виконується «автоматично» (без участі оператора), але на найпростішому апаратному рівні. Функція реалізована за допомогою теплових реле струму та захисних автоматів у силовому ланцюзі. При перевантаженні теплове реле фізично розриває ланцюг живлення контактора,

зупиняючи двигун. Проте, ця система позбавлена централізованої діагностики, не забезпечує узгодженого перекриття клапанів рідини (рідина може продовжувати литися у зупинений міксер) і не інформує оператора про першопричину аварії.

Отже, проведений аналіз існуючого рівня автоматизації доводить, що управління ділянкою здійснюється переважно в ручному або напівавтоматичному (релейному) режимі. Відсутність автоматичної стабілізації (P_a , θ_2) та алгоритмічної синхронізації пуско-зупинкових режимів призводить до підвищеного енергоспоживання, нестабільності якості тіста та прискореного зносу обладнання. Це формує чітке економічне та технічне обґрунтування для розробки сучасної САК на базі ПЛК та розробки автономної САР підвищеної точності.

1.3. Аналіз впливу функцій керування технологічним процесом на техніко-економічні та екологічні показники

1.3.1. Вплив вхідних сировинних, енергетичних та механічних параметрів ТП на вихідні показники

Функціонування тістоприготувального агрегату безпосередньо формує техніко-економічний та екологічний регламенти підприємства. Аналіз впливу параметрів показує наступне:

Сировинні параметри (витрати F_6 , F_c): їхні стохастичні коливання при ручному керуванні призводять до порушення вологості тіста. Це прямо впливає на питомі витрати сировини. Перезвожене тісто налипає на обладнання (втрати в масі), а занадто густе – вимагає бракування партії. Утилізація зіпсованого тіста як органічного відходу підвищує біологічне споживання кисню у стічних водах при митті цеху, що погіршує екологічний показник.

Механічні параметри (зсувки u_1 , u_2): неузгоджене, запізніле ручне переміщення цих робочих органів викликає стрибки рівня заповнення камер. Це призводить до різких перевантажень місильних органів, що експоненційно

збільшує питомі витрати електроенергії (кВт·год на 1 тону тіста) та прискорює знос редукторів.

Енергетичні параметри: відсутність автоматичної компенсації теплових збурень призводить до перегріву тіста (θ_2). Випуск нестандартного напівфабрикату знижує загальну ефективну продуктивність агрегату ($G_{\text{вих}}$), оскільки частина робочого часу витрачається на переробку браку.

1.3.2. Потенційні джерела економічної ефективності від впровадження поліпшених функцій керування

Модернізація існуючої системи на базі мікропроцесорної техніки (ПЛК) та сучасних електроприводів відкриває наступні джерела ефективності.

Зменшення енерговитрат за рахунок переходу від прямого контакторного пуску до керування місильними органами через частотні перетворювачі дозволить адаптувати споживання струму до фактичної в'язкості тіста, що забезпечить економію електроенергії до 20-30%.

Впровадження безперервного алгоритмічного регулювання виключить вплив «людського фактора», забезпечивши суворе дотримання температурного регламенту, що вплине на зниження відсотка технологічного браку.

Завдяки алгоритмам логічного керування (автоматизований поетапний пуск) мінімізується час виходу агрегату на робочий режим, що збільшує обсяг випуску кондитерської продукції за зміну, а це збільшення ефективної продуктивності ТА.

Логічне блокування аварійних ситуацій (заклинювання шнека) за допомогою аналізу активної потужності (P_a) дозволить миттєво зупиняти приводи до руйнування механічних вузлів, що зменшить витрати на ремонти.

1.3.3. Конкретизація кінцевої економічної цілі модернізації САК

Кінцевою економічною ціллю модернізації є максимізація рентабельності ділянки тістоприготування за рахунок зниження операційних витрат (ОРЕХ) та мінімізації втрат сировини.

Досягнення цієї цілі базується на двох стовпах автоматизації, які покращать конкретні економічні показники:

- За рахунок поліпшень функцій регулювання (перехід до САР підвищеної динамічної точності):

Впровадження автономної багатозв'язної САР з динамічними компенсаторами (нівелювання впливу u_1 на θ_2) усуне температурні "викиди" у перехідних режимах. Це напряду покращить такий економічний показник, як коефіцієнт виходу придатної продукції (зниження браку тіста на 0,5–1,5%).

- За рахунок функцій логічного керування:

Реалізація алгоритмів автоматичного вивантаження залишків тіста при зупинці агрегату зменшить втрати сировини (зменшення показника питомих незворотних втрат). Автоматичне блокування аварій скоротить показник часу простою обладнання, що прямо конвертується у збережений прибуток підприємства.

1.3.4. Соціальний, екологічний та безпековий ефекти від модернізації САК

Окрім прямого економічного ефекту, комплексна модернізація САК задовольнить низку критично важливих експлуатаційних та нормативних вимог:

1. Поліпшення умов праці та ергономіки

Оператор-технолог звільняється від важкої ручної праці (крутіння штурвалів зсувок) та постійного перебування в запиленій зоні агрегату. Взаємодія з процесом переноситься на інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс сенсорної панелі (НМІ).

2. Підвищення рівня пожежної та електричної безпеки

Враховуючи специфіку виробництва (присутність дрібнодисперсного борошняного пилу та необхідність вологого прибирання), заміна застарілої відкритої контактної апаратури на сучасні герметичні датчики та впровадження апаратної функції безпеки у частотних перетворювачах унеможливають іскроутворення, захищають від коротких замикань та зводять ризик виникнення пожежі до мінімуму.

3. Забезпечення санітарно-екологічних стандартів (НАССР)

Автоматизоване ведення процесу та застосування санітарних виконавчих механізмів з нержавіючої сталі виключає контакт персоналу з продуктом, що підвищує біологічну безпеку харчового виробництва. Зниження кількості залишків тіста в агрегаті зменшує використання миючих засобів і води під час санітарної обробки, покращуючи екологічний фон стоків підприємства.

Проведений аналіз технологічного об'єкта, його регламентів та існуючого рівня автоматизації повністю обґрунтовує технічну та економічну доцільність модернізації.

2. РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ, СТРУКТУРНА ТА ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ, ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ У СЕРЕДОВИЩІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.

2.1. Розробка концептуальної моделі об'єкта регулювання

Для переходу від фізичної параметричної схеми ТП (розробленої у п. 1.1.10) до концептуальної математичної моделі об'єкта керування (ОК) здійснено цілеспрямований аналіз параметрів із переведенням їх у систему понять теорії автоматичного управління.

2.1.1. Аналіз параметричної схеми технологічного процесу та перехід від параметрів до змінних об'єктів управління

Відповідно до поставленої мети (забезпечення стабільної якості тіста), головною функцією, яку повинна виконувати розроблювана САК, є функція автоматичного регулювання. Задача полягає в утриманні вихідних координат об'єкта на заданих нормативних рівнях в умовах дії збурень.

Для розробки ефективної системи автоматичного керування (САК) необхідно здійснити перехід від параметричної схеми технологічного процесу приготування тіста до концептуальної моделі об'єкта керування (ОК).

З огляду на мету функціонування технологічного агрегату (ТА) – двокамерної тістомісильної машини – головною функцією керування для даної роботи є регулювання (стабілізація) фізико-механічних та теплових показників напівфабрикату в умовах дії неконтрольованих і контрольованих збурень.

Серед усіх вихідних параметрів процесу, які відображають цілі керування, регламентами задані конкретні значення, які необхідно підтримувати. Ці параметри утворюють групу регульованих змінних ОК:

P_a – потужність технологічного навантаження приводу (характеризує в'язкість тіста та силовий стан процесу);

θ_2 – температура тіста на виході агрегату (основний показник якості готового продукту);

θ_1 – температура тіста в першій камері (проміжна керована величина).

Серед вхідних параметрів виділено ті, які доступні для цілеспрямованої зміни і за допомогою яких можливо компенсувати відхилення регульованих величин. Вони складають групу керуючих (регулюючих) впливів ОК:

u_1 – положення зсувки на виході першої камери (% від повного ходу);

u_2 – положення зсувки на виході другої камери (% від повного ходу).

Усі інші вхідні впливи середовища, які не увійшли до керуючих, утворюють групу збурюючих впливів (збурень). За характером впливу на ОК вони класифікуються наступним чином:

а) контрольовані збурення: витрата сировинних компонентів (суміші та борошна) f_1 та температура навколишнього середовища f_2 . Їхній вплив на регульовані змінні є суттєвим, вони мають власну фізичну розмірність і можуть бути виміряні для використання в алгоритмах керування.

б) неконтрольовані збурення та шуми: високочастотні коливання витрат сировини (через специфіку шнекових дозаторів), зміни гідродинамічних властивостей тіста внаслідок налипання, а також похибки вимірювальних каналів. Ці збурення мають розглядатися як випадкові процеси і підлягають фільтрації та компенсації за рахунок замкнених контурів САК.

2.1.2. Формування структурної схеми об'єкта регулювання та постановка задачі ідентифікації її комплексу моделей

Зважаючи на складність фізико-хімічних перетворень під час інтенсивного механічного замісу тіста, використання аналітичних методів для отримання математичних моделей є недоцільним, оскільки вони не дозволяють з достатньою точністю врахувати всі гідродинамічні та теплообмінні явища. Тому обґрунтованим методом отримання математичних моделей для даного ОК є експериментальний метод (зняття перехідних характеристик на об'єкті-оригіналі).

Для вирішення задач ідентифікації та побудови системи керування обрано «внутрішню» структуру ОК у вигляді багатозв'язної структурної схеми. На рис. 2.1 наведено загальну концептуальну модель (структурну схему) процесу приготування тіста як об'єкта регулювання.

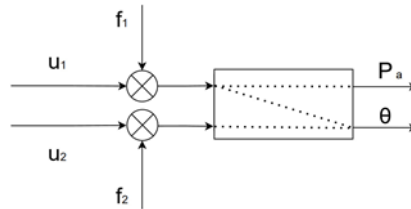


Рис. 2.1 – Загальна структурна схема процесу приготування тіста як об'єкта регулювання

Для кращого розуміння взаємозв'язків між компонентами ТА, структурну схему деталізовано (рис. 2.2). Процес подано у вигляді двох взаємопов'язаних підсистем (камер), що дозволяє чітко виділити канали перетворення впливів.

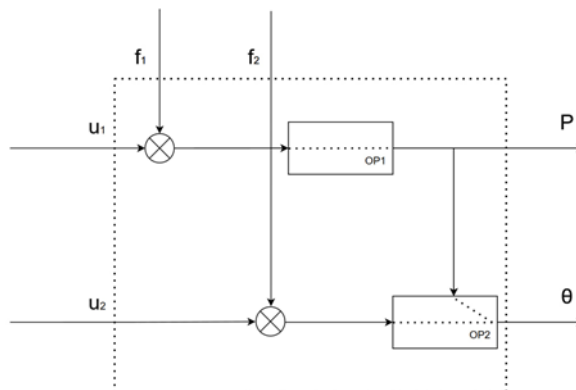


Рис. 2.2 – Деталізована структурна схема дії координатних збурень та керуючих впливів на об'єкт керування

На основі розробленої структурної схеми складено перелік каналів ОК, для яких мають бути отримані математичні моделі. Оскільки вхідні керуючі змінні є доступними для цілеспрямованої зміни, ідентифікація їхніх моделей буде проведена за результатами активного експерименту. До цієї групи належать канали перетворення:

$$u_1 \rightarrow P_a \text{ (вплив зсувки 1 на потужність);}$$

$u_1 \rightarrow \theta_1$ (вплив зсувки 1 на температуру в камері 1);

$u_2 \rightarrow \theta_2$ (вплив зсувки 2 на кінцеву температуру тіста).

Для збурень складається окремий перелік. Оскільки цілеспрямована зміна цих збурень в умовах реального виробництва є технологічно недопустимою або неможливою, їхні математичні моделі будуть отримані за результатами пасивного експерименту. До них належать:

$f_1 \rightarrow P_a$ (вплив коливань витрати сировини);

$f_2 \rightarrow \theta_2$ (вплив зміни температури середовища).

Остаточна мета ідентифікації полягає в отриманні передавальних функцій каналів керування (у вигляді аперіодичних ланок із запізненням) та розробці моделей формуючих фільтрів для генерації випадкових збурень. Ці моделі необхідні для подальшого імітаційного моделювання, синтезу ПІ- та ПІД-регуляторів і розрахунку їх оптимальних параметрів налаштування.

2.2. Структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей каналів перетворення об'єкта регулювання

2.2.1. Апріорний аналіз фізичної суті технологічного процесу та загальні властивості каналів об'єкта регулювання

На етапі проведення апріорного аналізу фізичної суті технологічного процесу приготування тіста та когнітивного (уявного) моделювання впливу змін вхідних змінних каналів регулювання (u_1, u_2) на вихідні змінні (P_a, θ_1, θ_2), можна зробити наступні висновки про найбільш загальні властивості каналів об'єкта керування (ОК):

а) Аналіз теплових (температура тіста) та механічних (потужність) процесів в агрегаті свідчить про наявність самовирівнювання каналів (статичних властивостей). Зі зростанням температури тіста збільшується інтенсивність тепловіддачі, що приводить до встановлення динамічної рівноваги. Зміна положення зсувки призводить до зміни інтенсивності руху матеріального потоку, однак у сталому режимі встановлюється баланс між притоком і відтоком матеріалу.

б) Процеси в ОК у загальному випадку є нелінійними (через складність тепло- та масообміну). Однак, оскільки номінальний режим функціонування ТА пов'язаний з порівняно вузькими діапазонами зміни регульованих координат (наприклад, θ_2 варіюється навколо 29 °С), приймається рішення про допустимість лінеаризації при описі властивостей каналів математичними моделями в околиці номінальних робочих режимів.

в) Оскільки процес пов'язаний із транспортуванням (переміщенням) в'язкої тістової маси вздовж камер агрегату, існує транспортне запізнення між моментом зміни положення зсувки та реакцією датчиків на виході. Це створює структурні невизначеності, які доцільно "обійти", використовуючи математичні моделі із чистим запізненням τ .

г) Враховуючи безперервність роботи тістомісильного агрегату в усталеному режимі, приймається гіпотеза про квазістаціонарність властивостей каналів (незмінність параметрів математичних моделей у ході окремих перехідних процесів).

2.2.2. Структурна ідентифікація математичних моделей динамічних властивостей каналів

На основі висновків про загальні властивості каналів ОК (наявність самовирівнювання, лінійність у робочій зоні, наявність інерційності та запізнення) проводимо структурну ідентифікацію математичних моделей. Загальний вигляд відповідних моделей вибираємо з класу типових лінійних динамічних ланок, а саме – аперіодичних ланок першого та другого порядків із запізненням.

Передавальні функції моделей для каналів керування матимуть вигляд:

Для моделі першого порядку:

$$w^{(1)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p}}{T_p s + 1} \quad (2.1)$$

Для моделі другого порядку:

$$w^{(2)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p s}}{(T_p s + 1)^2} \quad (2.2)$$

де

k_p – коефіцієнт передачі ОК по каналу,

T_p – стала часу,

τ – час запізнення.

2.2.3. План активних експериментів та когнітивне моделювання

Для параметричної ідентифікації розроблено план активних експериментів, який передбачає подачу ступінчастих вхідних дій на канали керування. Внаслідок неможливості проведення реальних експериментів безпосередньо на промисловому підприємстві в рамках даної роботи, використовуються результати їх когнітивних аналогів (отриманих на основі експериментальних даних, наведених у розділі 2 курсової роботи).

План експерименту:

За допомогою керуючих дій об'єкт виводять у номінальний робочий режим:

$u_1=50\%$, $u_2=50\%$ від повного ходу зсувок. Очікують настання сталого режиму.

Керуючу дію u_1 змінюють ступінчастим чином на $\Delta u_1=-10\%$ (від 50% до 40%). Реєструють реакцію вихідних координат P_a та θ_1 .

Після відновлення сталого режиму, керуючу дію u_2 змінюють на $\Delta u_2=+10\%$ (від 50% до 60%). Реєструють реакцію вихідної координати θ_2 .

Отримані графіки перехідних характеристик (когнітивні аналоги) наведено на рис. 2.3 та 2.4.

На верхньому графіку рисунку 2.3 зображено зміну керуючого впливу $u(t)$ у відсотках від ходу регулюючого органу (% х.р.о.).

Дана дія використовується як збурювальний сигнал для отримання перехідної характеристики об'єкта.

Нижній графік відображає зміну вихідної координати об'єкта – температури $\theta_2(t)$ °С, у відповідь на прикладену ступінчасту вхідну дію.

Після подачі керуючого впливу спостерігається монотонний аперіодичний перехідний процес, характерний для інерційного об'єкта без

коливань. Температура зменшується з початкового значення близько 31 °С до нового усталеного значення приблизно 29 °С.

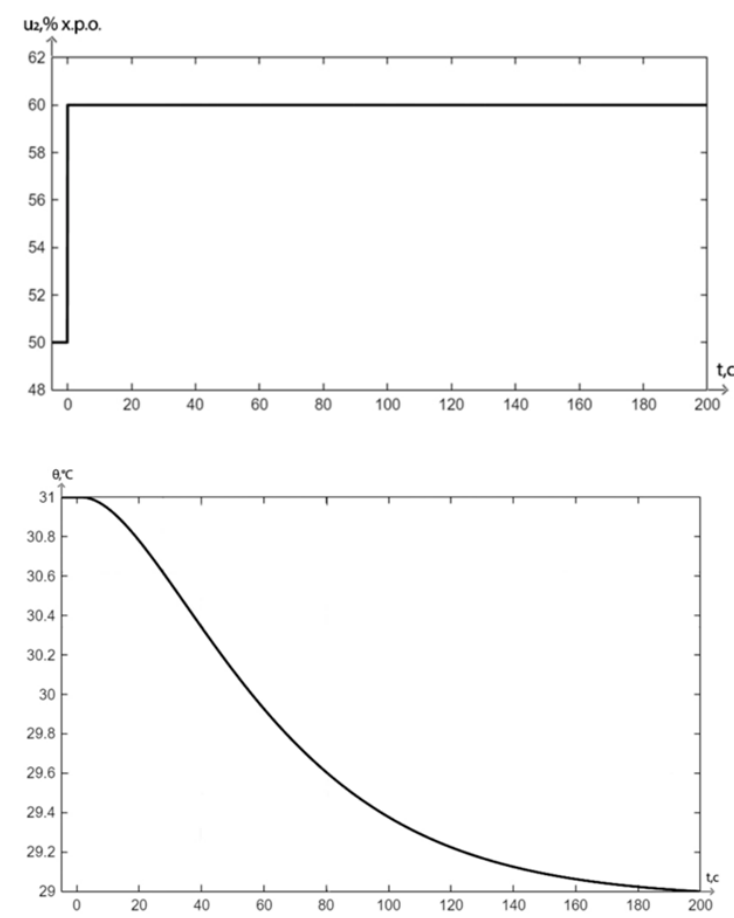


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика каналу керування $u_2 \rightarrow \theta_2$ та ступінчастий вплив керуючої дії $u_2(t)$ під час активного експерименту

На верхньому графіку рисунку 2.4 показано зміну керуючого впливу $u(t)$ у відсотках від ходу регулюючого органу (% х.р.о.).

Середній графік відображає реакцію першої вихідної координати об'єкта (потужність $Pa(t)$) на прикладену ступінчасту зміну керування. Спостерігається аперіодичний перехідний процес із монотонним зростанням вихідної величини від початкового значення близько 4,0 до усталеного рівня приблизно 4,5.

На нижньому графіку наведено зміну температури $\theta(t)$ у відповідь на ту саму вхідну дію. Перехідний процес має інерційний аперіодичний характер без коливань, що є типовим для теплових об'єктів.

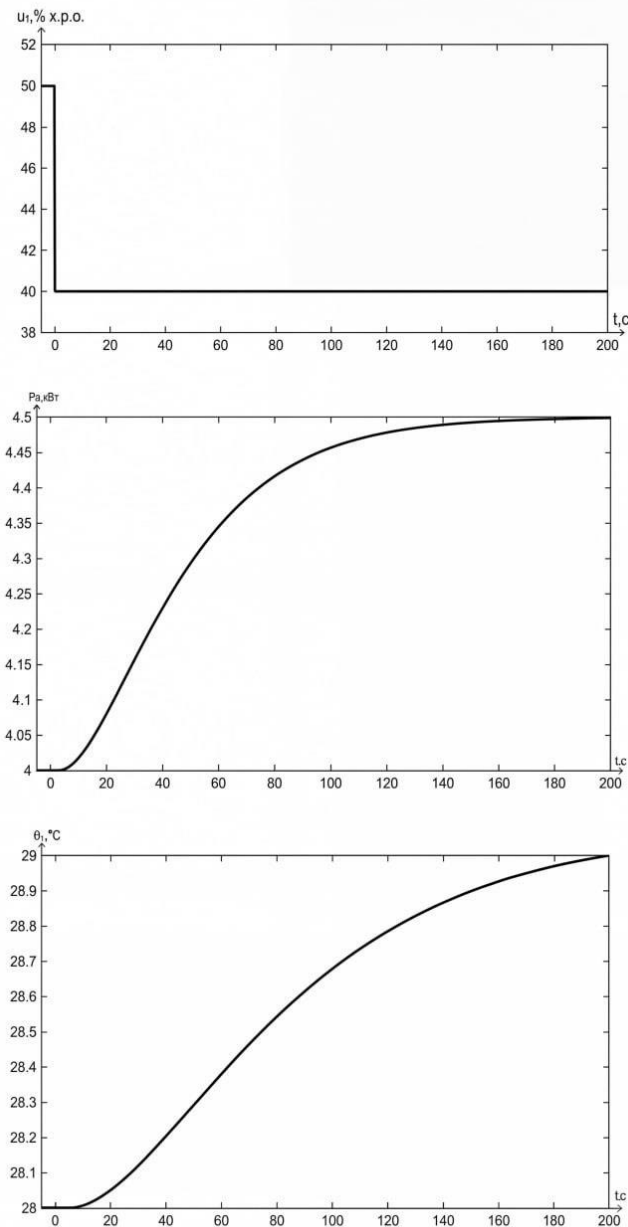


Рис. 2.4 – Перехідні характеристики каналів керування $u_1 \rightarrow \theta_1$, та $u_1 \rightarrow P_a$ при ступінчастій зміні керуючого впливу $u_1(t)$ під час активного експерименту

Загалом наведені графіки підтверджують, що досліджувані канали керування можуть бути адекватно описані лінійними аперіодичними моделями першого або другого порядку з урахуванням інерційності об'єкта. Отримані експериментальні залежності є базою для подальшої структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей у середовищі MATLAB/Simulink.

2.2.4. Аналіз перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей

Аналіз перехідних характеристик, отриманих у п. 2.2.3, підтверджує наявність значної інерційності та відсутність самозбуджених коливань, що підтверджує адекватність структурної ідентифікації (вибір аперіодичних моделей із запізненням за п. 2.2.2).

Оскільки за результатами структурної ідентифікації встановлено, що канали керування об'єкта мають статичні властивості (властивість самовирівнювання), для їх опису доцільно використовувати лінеаризовані моделі першого та другого порядків із запізненням.

Для параметричної ідентифікації моделей об'єкта керування зі статичними властивостями необхідно визначити такі параметри: коефіцієнт передачі об'єкта k_0 ; сталу часу T_0 ; час запізнення τ_0 .

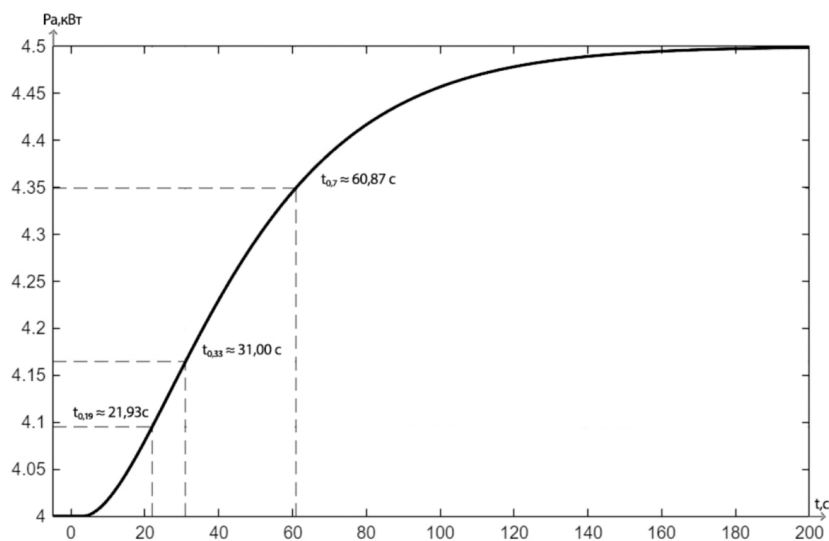


Рис. 2.5 – Параметрична ідентифікація моделі ОК

На графіку позначені характерні моменти часу, які використовуються для визначення постійної часу та інших параметрів динамічної моделі.

1. Канал $u_1 \rightarrow P_a$ (потужність)

1.1 Розрахунок коефіцієнту передачі

Вхідний вплив по каналу $u_1 = 50\% \rightarrow 40\%$:

$$\Delta u_1 = 40 - 50 = -10$$

Реакція на вплив Δu_1 регульованої змінної $P_a = 4,0 \text{ кВт} \rightarrow 4,5 \text{ кВт}$:

$$\Delta P_a = 4,5 - 4 = 0,5 \text{ кВт.}$$

Коефіцієнт передачі ОК по каналу $u_1 \rightarrow P_a$ (для моделей ОК 1 і 2-го порядку):

$$k_{P_a} = \Delta P_a / \Delta u_1 = 0,5 / (-10) = -0,05 \text{ кВт/\% х. р. о.}$$

1.2 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 1-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,33} \approx 31,00 \text{ с,}$$

$$t_{0,7} \approx 60,87 \text{ с.}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 31,00 - 60,87) / 2 = 16,07 \text{ с}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (60,87 - 16,07) / 1,2 = 37,33 \text{ с}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_1 \rightarrow P_a}^{(1)}(s) = \frac{k_P e^{-\tau p}}{T p s + 1} = \frac{-0,05 e^{-16,07 s}}{37,33 s + 1} \quad (2.3)$$

1.3 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 2-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,19} \approx 21,93 \text{ с,}$$

$$t_{0,7} \approx 60,87 \text{ с}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 21,93 - 60,87) / 2 = 2,46 \text{ с}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (60,87 - 2,46) / 2,4 = 48,68 \text{ с}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_1 \rightarrow P_a}^{(2)}(s) = \frac{k_P e^{-\tau p s}}{(T p s + 1)^2} = \frac{-0,05 e^{-2,46 s}}{(48,68 s + 1)^2} \quad (2.4)$$

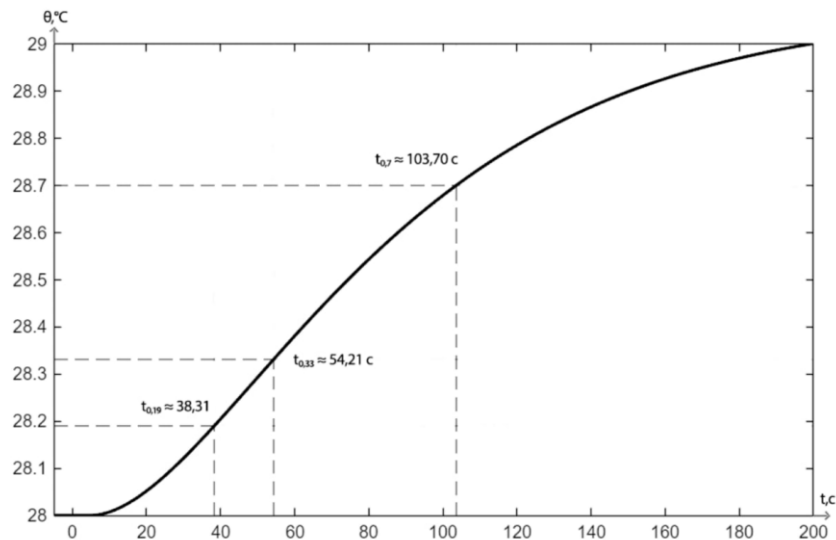


Рис. 2.6. – Параметрична ідентифікація моделі ОК

Аналогічно до попереднього графіка, відмічені характерні часові точки, які використовуються для ідентифікації параметрів моделі.

2. Канал $u_1 \rightarrow \theta_1$ (температура камери 1)

2.1 Розрахунок коефіцієнту передачі

Вхідний вплив по каналу $u_1 = 50\% \rightarrow 40\%$:

$$\Delta u_1 = 40 - 50 = -10$$

Реакція на вплив Δu_1 регульованої змінної $\theta_1 = 28^\circ\text{C} \rightarrow 29^\circ\text{C}$:

$$\Delta \theta_1 = 29 - 28 = 1^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнт передачі ОК по каналу $u_1 \rightarrow \theta_1$ (для моделей ОК 1 і 2-го порядку):

$$k = \Delta \theta_1 / \Delta u_1 = (29-28) / (40-50) = -0,1$$

2.2 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 1-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,33} \approx 54,21 \text{ c}$$

$$t_{0,7} \approx 103,70 \text{ c}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 54,21 - 103,70) / 2 = 29,47 \text{ c}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (103,70 - 29,47) / 1,2 = 61,86 \text{ c}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_1 \rightarrow \theta_1}^{(1)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p}}{T_p s + 1} = \frac{-0,1 e^{-29,47s}}{61,86s + 1} \quad (2.5)$$

2.3 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 2-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,19} \approx 38,31$$

$$t_{0,7} \approx 103,70 \text{ с}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 38,31 - 103,70) / 2 = 5,62 \text{ с}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (103,70 - 5,62) / 2,4 = 40,87 \text{ с}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_1 \rightarrow \theta_1}^{(2)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p s}}{(T_p s + 1)^2} = \frac{-0,1 e^{-5,62s}}{(40,87s + 1)^2} \quad (2.6)$$

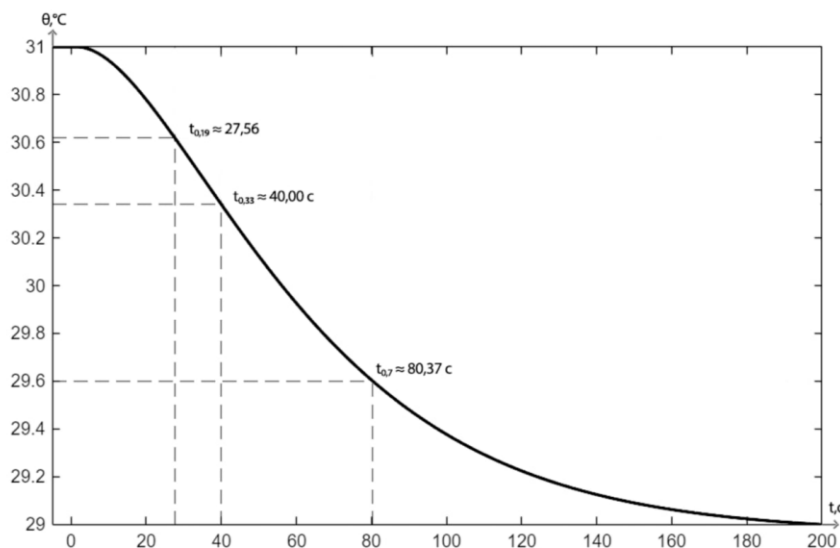


Рис. 2.7. – Параметрична ідентифікація моделі ОК

На графіку відмічені характерні моменти часу які відповідають досягненню певних часток від загальної зміни вихідної величини та використовуються для оцінювання постійної часу і динамічних параметрів моделі об'єкта.

3. Канал $u_2 \rightarrow \theta_2$ (температура камери 2)

3.1 Розрахунок коефіцієнту передачі

Вхідний вплив по каналу $u_2 = 50\% \rightarrow 60\%$:

$$\Delta u_2 = 60 - 50 = 10$$

Реакція на вплив Δu_2 регульованої змінної $\theta_2 = 31^\circ\text{C} \rightarrow 29^\circ\text{C}$:

$$\Delta \theta_2 = 31 - 29 = -2^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнт передачі ОК по каналу $u_2 \rightarrow \theta_2$ (для моделей ОК 1 і 2-го порядку):

$$k = \Delta \theta_2 / \Delta u_2 = (31-29) / (60-50) = -0,2$$

3.2 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 1-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,33} \approx 40,00 \text{ с}$$

$$t_{0,7} \approx 80,37 \text{ с}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,33} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 40,00 - 80,37) / 2 = 19,82 \text{ с}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 1,2 = (80,37 - 19,82) / 1,2 = 50,46 \text{ с}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_2 \rightarrow \theta_2}^{(1)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p}}{T p s + 1} = \frac{-0,2 e^{-19,82s}}{50,46s + 1} \quad (2.7)$$

3.3 Розрахунок постійної часу та часу запізнення моделі 2-го порядку

Часові точки з графіку:

$$t_{0,19} = 27,56$$

$$t_{0,7} \approx 80,37 \text{ с}$$

Запізнення:

$$\tau = (3 * t_{0,19} - t_{0,7}) / 2 = (3 * 27,56 - 80,37) / 2 = 1,16 \text{ с}$$

Стала часу:

$$T = (t_{0,7} - \tau) / 2,4 = (80,37 - 1,16) / 2,4 = 33 \text{ с}$$

Передавальна функція моделі:

$$w_{u_1 \rightarrow \theta_2}^{(2)}(s) = \frac{k_p e^{-\tau p s}}{(T p s + 1)^2} = \frac{-0,2 e^{-1,16s}}{(33s + 1)^2} \quad (2.8)$$

2.2.5. План проведення пасивних експериментів та збір інформації для ідентифікації моделей контрольованих збурень

Для досліджуваного технологічного процесу контрольованими збуреннями, які мають власну фізичну розмірність і суттєво впливають на регульовані змінні, є витрата сировинних компонентів f_1 та температура навколишнього середовища f_2 .

Оскільки цілеспрямована зміна цих параметрів на реальному об'єкті призведе до порушення технологічного регламенту та випуску бракованої продукції, розроблено план проведення пасивних експериментів без зміни режимів роботи об'єкта.

У зв'язку з відсутністю доступу до промислового об'єкта для зняття тривалих статистичних реалізацій, ми реалізуємо цей експеримент у віртуальному форматі. Для цього використано спеціальне програмне забезпечення (середовище MATLAB), яке імітує реальні умови роботи об'єкта.

- Параметри віртуального експерименту (генерації випадкових процесів):

Час спостереження: $T_{sim}=2000$ с;

крок дискретизації: $\Delta t=0,5$ с.

- Для збурення f_1 (витрата борошна): математичне очікування $M_{f1}=600$ кг/год;

допустиме відхилення (амплітуда шуму дозатора) ± 50 кг/год;

задане середньоквадратичне відхилення (СКВ) $\sigma_{f1} \approx 16$ кг/год.

- Для збурення f_2 (температура): математичне очікування відхилень $M_{f2}=0$; допустиме відхилення ± 5 °C;

задане СКВ $\sigma_{f2} \approx 1,6$ °C.

Програма генерує та записує у файли реалізації випадкових процесів, які є вхідними даними для подальшої статистичної обробки (рис. 2.8 та рис. 2.9).

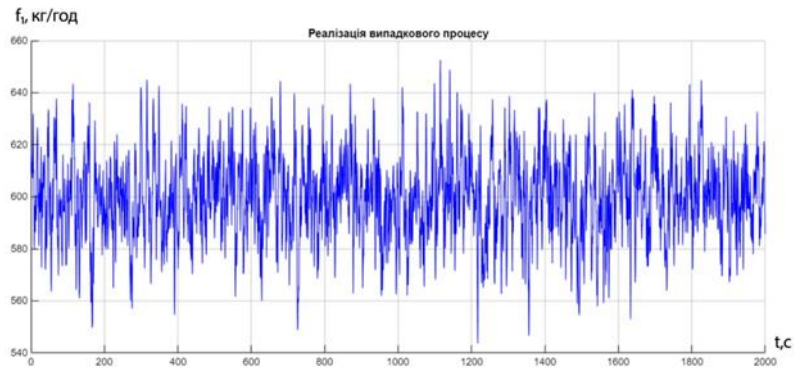


Рис. 2.8 – Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу контрольованого збурення f_1 (витрата борошна)

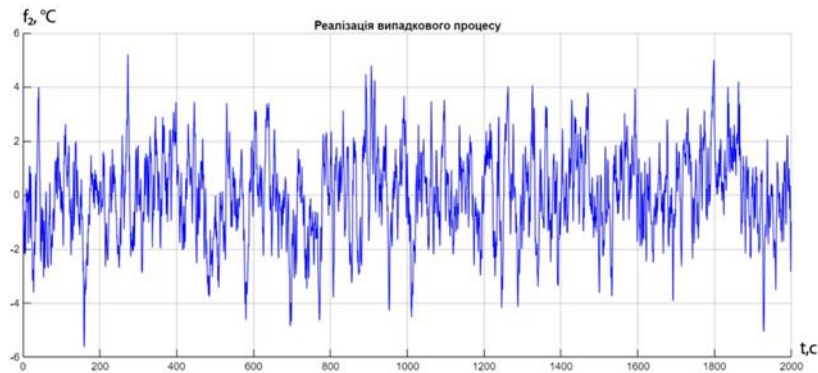


Рис. 2.9 – Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу контрольованого збурення f_2 (температура)

Отримані часові реалізації є вихідними даними для подальшої статистичної обробки та ідентифікації параметрів кореляційних функцій і спектральних щільностей у наступних пунктах.

Таблиця 2.1 – Експериментальні дані

t, c	$P_a, кВт$	$\theta_1, ^\circ C$	$\theta_2, ^\circ C$
0	4	28	31
10	4,02	28,01	30,94
20	4,08	28,05	30,78
30	4,16	28,12	30,57
40	4,23	28,21	30,34
50	4,29	28,29	30,12

60	4,35	28,38	29,93
70	4,39	28,47	29,75
80	4,42	28,54	29,60
90	4,44	28,62	29,48
100	4,46	28,68	29,38
110	4,47	28,74	29,29
120	4,48	28,79	29,22
130	4,49	28,83	29,17
140	4,49	28,87	29,12
150	4,49	28,89	29,09
160	4,494	28,93	29,06
170	4,496	28,95	29,04
180	4,497	28,97	29,02
190	4,498	28,99	29,01
200	4,5	29,00	29,0

2.2.6. Аналіз характеристик випадкових процесів, структурна та параметрична ідентифікація математичних моделей збурень

У ході пасивного експерименту отримано реалізацію випадкового процесу. Для аналізу властивостей цього процесу виконано оцінювання його імовірнісних характеристик.

Обробка експериментальних даних проводилася за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (середовище MATLAB).

Для кожної реалізації випадкового процесу були розраховані основні статистичні показники. На основі розрахованих експериментальних автокореляційних функцій (АКФ) проведено структурну ідентифікацію математичних моделей збурень (вибір їх кореляційних функцій із доступних типових варіантів).

Для контрольованого збурення f_1 :

Графік експериментальної АКФ спадає до нуля швидко, не перетинає вісь абсцис, але має слабо виражену коливальність, що пояснюється специфікою роботи шнекового дозатора (пульсація подачі).

Для опису цієї випадкової складової структурно обрано Модель № 6 (затухаюча косинусоїда), яка найкраще апроксимує дані.

6	$R_f(\tau_k) = D_f \cdot e^{-\alpha \tau_k } \cdot \left(\cos(\beta \cdot \tau_k) + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin(\beta \cdot \tau_k) \right)$
	$S_f(\omega) = \frac{D_f \cdot 4\alpha \cdot (\alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}$

(2.9)

У діалоговому режимі з програмою проведено параметричну ідентифікацію, в результаті якої отримано наступні параметри кореляційної функції:

Коефіцієнт затухання: $\alpha_1 = 0,5117 \text{ с}^{-1}$;

Коефіцієнт коливальності: $\beta_1 = 0,0643 \text{ с}^{-1}$;

Дисперсія: $D_1 = 256 \text{ (кг/год)}^2$.

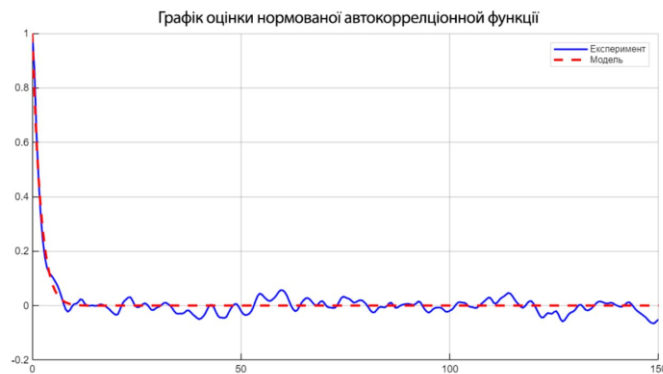


Рис. 2.10 – Результати оцінювання нормованої автокореляційної функції для контрольованого збурення f_1

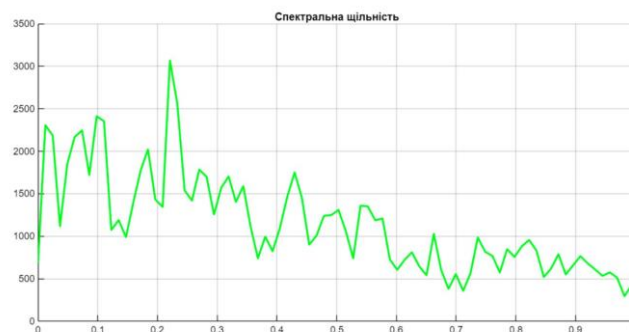


Рис. 2.11 – Результати оцінювання спектральної щільності для контрольованого збурення f_1

Для контрольованого збурення f_2 :

Графік експериментальної АКФ демонструє плавний експоненціальний спад до нуля без перетину осі абсцис (коливальна складова відсутня, $\beta=0$). Це повністю відповідає інерційним тепловим процесам.

Для опису обрано Модель №1 (експоненціальна автокореляційна функція).

1	$R_f(\tau_k) = D_f \cdot e^{-\alpha \cdot \tau_k }$
	$S_f(\omega) = \frac{D_f \cdot 2\alpha}{(\omega^2 + \alpha^2)}$

(2.10)

Результати параметричної ідентифікації:

Коефіцієнт затухання: $\alpha_2 = 0,2372 \text{ c}^{-1}$;

Коливальність: $\beta_2 = 0$;

Дисперсія: $D_2 = 2,56 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$.



Рис. 2.12 – Результати оцінювання нормованої автокореляційної функції для неконтрольованого збурення f_2



Рис. 2.13 – Результати оцінювання спектральної щільності для неконтрольованого збурення f_2

Отримані оцінки параметрів є стабільними та фізично узгодженими з характером технологічного процесу. Повторний аналіз автокореляційної та спектральної характеристик після параметричної ідентифікації не виявив істотних розбіжностей з експериментальними даними, що свідчить про адекватність обраної моделі.

У зв'язку з цим повернення до попереднього етапу структурної ідентифікації не потребується.

2.2.7. Ідентифікація каналів контрольованих збурень

Згідно з методикою, наступним етапом є аналіз файлів із результатами пасивного експерименту для отримання взаємкореляційних функцій та ідентифікації динаміки самих каналів перетворення контрольованих збурень (вплив $f_1 \rightarrow P_a$ та $f_2 \rightarrow \theta_2$).

Однак, проведення повноцінної структурної та параметричної ідентифікації цих каналів виключно методами пасивного експерименту в умовах сильних міжканальних зв'язків двокамерного агрегату ускладнене. Зважаючи на фізичну природу об'єкта, динаміка перетворення витрати борошна (f_1) у потужність (P_a) та температури середовища (f_2) у температуру тіста (θ_2) проходить через ті самі фізичні маси (робочі об'єми камер), що й сигнали від керуючих впливів (u_1, u_2).

Тому, спираючись на когнітивний аналіз та результати ідентифікації збурень як випадкових процесів, приймається рішення:

Динамічні властивості каналів перетворення збурень приймаються еквівалентними або пропорційними до динамічних властивостей основних каналів керування (аперіодичні ланки із запізненням), оскільки вони діють на ті ж самі регульовані змінні об'єкта.

Основний акцент для моделювання збурюючих впливів переноситься на передавальні функції формуючих фільтрів ($W\Phi(P)$), які генеруватимуть адекватний "забарвлений шум" із заданими параметрами (α, β, D), отриманими у п. 2.2.6. Розрахунок цих передавальних функцій формуючих фільтрів буде наведено на етапі підготовки до імітаційного моделювання.

Вплив цих збурень на систему компенсуватиметься опосередковано – через замкнені контури керування та забезпечення достатнього запасу стійкості синтезованої САК.

2.3. Ідентифікація математичних моделей неконтрольованих збурень об'єкта регулювання

2.3.1. Констатація фактів щодо неконтрольованих збурень

Для забезпечення ефективного функціонування системи автоматичного керування тістомісильним агрегатом констатуємо наступні факти:

а) Абстрактне поняття «неконтрольовані збурення» відображає наявність сукупності великої кількості конкретних збурень (коливання вологості та хімічного складу борошна, нестабільність напруги живлення моторів, знос перемішувальних лопатей тощо), вплив яких, окремо, на керовані змінні не такий інтенсивний, щоб було доцільно розглядати їх як контрольовані збурення. Їх вимірювання спричинить необґрунтовані додаткові витрати ресурсів на оснащення САР додатковими дорогими датчиками.

б) Не враховувати наявність неконтрольованих збурень неможливо, оскільки їхній сукупний вплив на керовані змінні (потужність P_a та температуру θ_2) є великим. Саме тому САР для об'єктів технологічного типу (як тістомісильна машина) практично завжди повинні мати замкнуті контури регулювання для компенсації цих відхилень.

в) Оскільки сума цих слабо залежних один від одного змінних має приблизно однакові масштаби (жодний із доданків не домінує), їхній вплив можна розглядати як випадковий процес. Згідно з центральною граничною теоремою, він має щільність розподілу ймовірностей, близьку до нормальної, що обґрунтовує доцільність їх ідентифікації саме як стохастичних випадкових процесів.

г) Дія всіх збурень завжди проявляється у змінах регульованих змінних. Звідси випливає, що дію цих збурень доцільно привести до регульованих

змінних або, методом еквівалентних структурних перетворень, привести до керуючих впливів (u_1, u_2), зберігаючи їх фізичні розмірності (% ходу регулюючого органу).

2.3.2. Аналіз фізичної суті та можливих діапазонів зміни неконтрольованих збурень

Проводячи аналіз фізичної суті, встановлено, що неконтрольовані збурення діють адитивно на об'єкт. Фізичний діапазон зміни керуючих дій u_1 та u_2 лежить у межах $0 \dots 100$ % х.р.о. (ходу робочого органу).

Згідно з інженерною практикою, діапазон зміни неконтрольованих координатних збурень приймаємо на рівні $10 \dots 15$ % від діапазону зміни керуючої дії.

Апріорна структурна ідентифікація дозволяє припустити, що математичні моделі цих збурень матимуть вигляд стаціонарних випадкових процесів із заданими математичними очікуваннями, дисперсіями та автокореляційними функціями (АКФ).

2.3.3. План проведення пасивного експерименту

Через неможливість отримання даних з реального об'єкта-оригіналу, розроблено план проведення пасивного експерименту у віртуальному форматі. Експеримент реалізується за допомогою спеціального програмного забезпечення MATLAB, налаштованого на особливості об'єкта-оригіналу.

Параметри генерації:

Час спостереження: $T_{sim}=2000$ с;

Крок дискретизації: $\Delta t=0.5$ с.

Програма генерує та записує у файли випадковий процес змін регульованої змінної (шумову складову), сумісний за форматом з програмою ідентифікації.

2.3.4. Структурна та параметрична ідентифікація моделей неконтрольованих збурень

Неконтрольовані збурення є невід'ємною складовою функціонування технологічного процесу приготування тіста та суттєво впливають на

стабільність регламентованих параметрів. У даній роботі до основних збурюючих впливів віднесено:

f_1 – коливання витрати сировинних компонентів (борошна та рідкої суміші);

f_2 – зміна температури навколишнього середовища та вхідних компонентів.

- Структурна ідентифікація збурень

На основі аналізу параметричної схеми (рис. 2.2) встановлено, що збурення впливають на об'єкт керування через такі канали:

- збурення f_1 впливає на в'язкість тістової маси, що відображається на потужності приводу: $f_1 \rightarrow P_a$
- збурення f_2 впливає на тепловий баланс процесу та змінює температуру тіста: $f_2 \rightarrow \theta_2$

Крім того, внаслідок багатозв'язності об'єкта спостерігається перехресний вплив збурень, зокрема:

$f_1 \rightarrow \theta_2$ (через зміну об'єму та інтенсивності замісу);

$f_2 \rightarrow P_a$ (через зміну реологічних властивостей тіста).

Таким чином, збурення діють як у прямих, так і в перехресних каналах об'єкта керування.

- Параметрична ідентифікація моделей збурень

Для опису впливу збурень використано передатні функції каналів збурень, які мають вигляд аперіодичних ланок першого порядку із запізненням:

1) канал збурення витрати сировини:

$$w_{f_1 \rightarrow P_a}(s) = \frac{K_{f_1}}{T_{f_1}s + 1} e^{-\tau_{f_1}s} \quad (2.9)$$

2) канал температурного збурення:

$$w_{f_2 \rightarrow \theta_2}(s) = \frac{K_{f_2}}{T_{f_2}s + 1} e^{-\tau_{f_2}s} \quad (2.10)$$

де:

K_f — коефіцієнти підсилення каналів збурень;

T_f — постійні часу;

τ_f — запізнення, обумовлене інерційністю процесу.

Параметри моделей визначаються експериментально за перехідними характеристиками об'єкта або приймаються на основі інженерної оцінки.

- Моделювання випадкових збурень та шумів

Окрім детермінованих збурень, у реальному технологічному процесі присутні випадкові впливи, що пов'язані з:

- нерівномірною роботою дозаторів;
- коливаннями властивостей сировини;
- шумами вимірювальних каналів.

Для їх урахування у моделі використовується сигнал типу «білий шум» (white noise), який додається до відповідних каналів:

- як випадкова складова збурення (на вході об'єкта);
- як шум вимірювання (на виході датчиків).

Використання білого шуму дозволяє оцінити стійкість системи автоматичного керування до випадкових відхилень параметрів процесу.

Проведена структурна та параметрична ідентифікація неконтрольованих збурень дозволила сформувати математичні моделі їх впливу на об'єкт керування. Це забезпечує можливість подальшого аналізу стійкості системи, оцінки якості регулювання та розробки ефективних алгоритмів компенсації збурень.

2.3.5. Математичні моделі для обліку адитивних складових

Згідно з теорією випадкових процесів, математичні моделі вхідних дій (збурень) представляються у вигляді випадкового процесу з декількома адитивними складовими:

$$f(t) = \bar{f}(t) + \tilde{f}_n(t) + \tilde{f}_c(t) + \tilde{f}_w(t) \quad (2.11)$$

де

$\bar{f}(t)$ – детермінована складова,

$\tilde{f}_n(t)$ – квазидетермінована складова,

$\tilde{f}_c(t)$ – стохастична центрована складова (ідентифікована у п. 2.3.4),

$\tilde{f}_w(t)$ – високочастотний білий шум вимірювання (який буде відфільтровано САК).

2.4. Реалізація математичних моделей на ПЕОМ у середовищі комп'ютерного імітаційного моделювання та обґрунтування їх адекватності об'єкту-оригіналу

2.4.1. Реалізація схеми моделювання каналів ОР

На основі обґрунтованої структури об'єкта регулювання та результатів ідентифікації математичних моделей каналів (отриманих у п. 2.2.4), у середовищі MATLAB/Simulink реалізовано імітаційні моделі каналів ОР (1-го та 2-го порядків). Для моделювання використано блоки Transfer Fcn (передавальні функції), Transport Delay (ланки чистого запізнення) та Step (джерела входних сигналів).

Процес моделювання починаємо з підготовки експериментальних даних:

Експериментальні дані, отримані на етапі ідентифікації (часові залежності вихідної величини при ступінчастій зміні входної), завантажуються у модель за допомогою блоку Look-Up Table. Це дозволяє відобразити реальну перехідну характеристику на одному графіку з модельними.

Схема моделювання складається з таких елементів:

Джерело входного сигналу (Step): Генерує ступінчастий вплив, що відповідає умовам експерименту (наприклад, зміна керуючого впливу на - 10%).

Моделі динаміки: Блоки Transfer Fcn, у яких задано параметри передавальних функцій, отримані раніше.

Ланки запізнення (Transport Delay): Моделюють час чистого запізнення τ , визначений під час ідентифікації.

Врахування початкових умов: До вихідних сигналів моделей додається початкове значення регульованої величини (наприклад, 28 °C або 31 °C), щоб сумістити графіки за рівнем.

Візуалізація (Score): Всі сигнали (експериментальні дані, вихід моделі 1-го порядку, вихід моделі 2-го порядку) об'єднуються через мультиплексор (Mux) і виводяться на осцилограф для порівняльного аналізу.

Нижче наведено схеми моделювання.

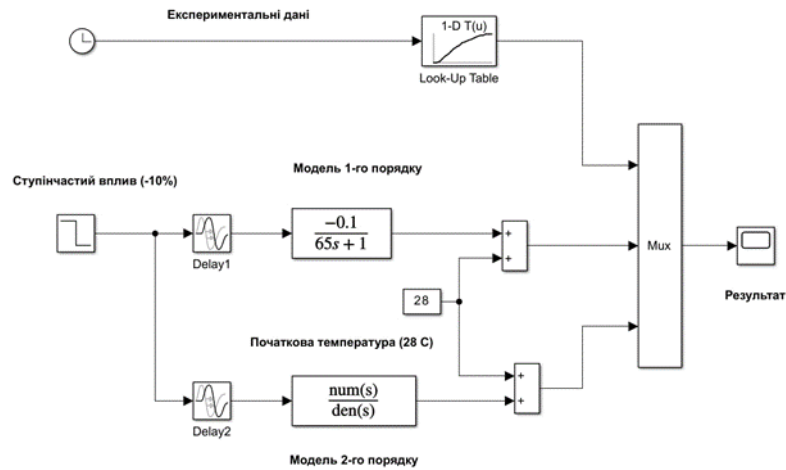


Рис. 2.14. Схема імітаційного моделювання динаміки каналу $u_1 \rightarrow \theta_1$ у середовищі Simulink.

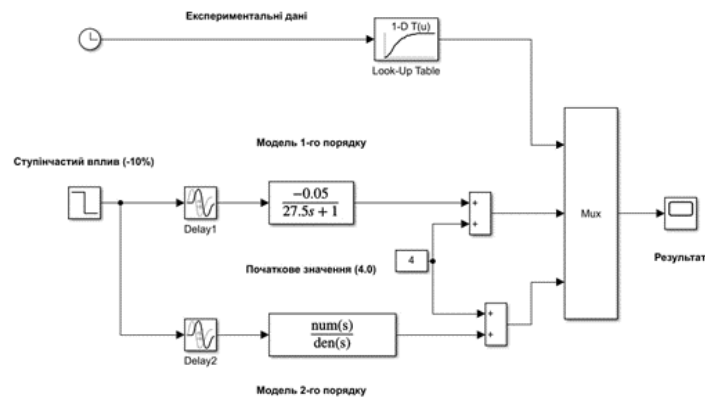


Рис. 2.15. Схема імітаційного моделювання динаміки каналу $u_1 \rightarrow P_a$ у середовищі Simulink.

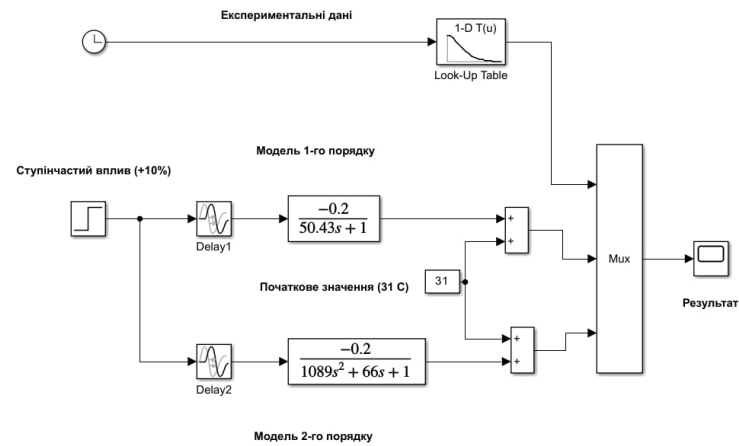


Рис. 2.16 – Схема моделювання динаміки каналу $u_2 \rightarrow \theta_2$ у середовищі Simulink.

2.4.2. Комп'ютерні експерименти та перевірка адекватності моделей

На імітаційній моделі проведено комп'ютерні експерименти, план яких повністю відповідає раніше розробленому плану активних експериментів на об'єкті-оригіналі (подача ступінчастих впливів $\Delta u = \pm 10\%$). Результати імітаційного моделювання (реакції моделей 1-го та 2-го порядків) накладено на експериментальні криві об'єкта-оригіналу для порівняння модельних та експериментальних перехідних характеристик (таблиця 2.1) у характерних точках:

- для моделі першого порядку – у точках $(t_{0,33}, y_{0,33})$ та $(t_{0,7}, y_{0,7})$;
- для моделі другого порядку – у точках $(t_{0,19}, y_{0,19})$ та $(t_{0,7}, y_{0,7})$.

У результаті моделювання встановлено, що обидві моделі адекватно відтворюють динамічні властивості об'єкта керування, проте модель другого порядку забезпечує кращу точність апроксимації експериментальних даних, особливо на початковій ділянці перехідного процесу.

Аналіз результатів:

Отримані перехідні характеристики моделей накладаються на експериментальну криву. Візуальний аналіз дозволяє оцінити точність апроксимації динаміки об'єкта моделями різного порядку. Зазвичай модель 2-

го порядку забезпечує краще наближення, особливо на початковій ділянці перехідного процесу.

Нижче наведено схеми моделювання та отримані результати для двох каналів керування.

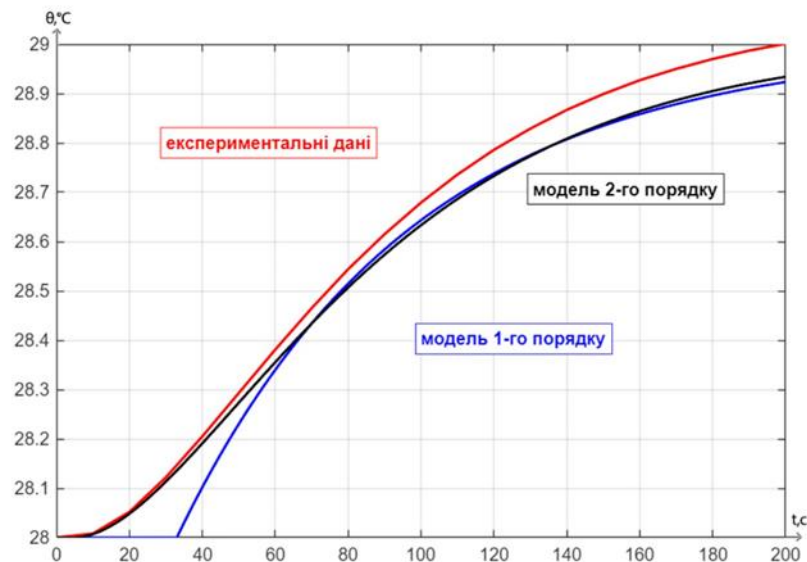


Рис. 2.17. Порівняння перехідних характеристик каналу $u_1 \rightarrow \theta_1$ (експериментальні дані порівняно з моделями 1-го та 2-го порядків)

Математичні моделі (аперіодичні ланки) наближаються до свого кінцевого значення асимптотично. Це означає, що вони постійно наближаються до 29, але "математично" досягають його через нескінченно довгий час.

На практиці вважається, що перехідний процес закінчується через час $3T$ (три постійні часу) або $4T$.

Оскільки графік обмежений часом 200 секунд, модель фізично не встигає дійти до повного сталого значення (29°C) на графіку.

Експериментальні дані – це реальний фізичний процес. Реальні об'єкти часто мають нелінійності або трохи інші динамічні властивості, через що вони можуть "заспокоюватися" швидше, ніж ідеальна лінійна модель.

"Моделі 1-го та 2-го порядку на момент часу $t=200$ с ще не досягли сталого значення 29°C , оскільки сума часу запізнення та часу регулювання

($3T+\tau$) перевищує 200 с. Це свідчить про те, що розраховані моделі мають більшу інерційність, ніж реальний об'єкт на останній стадії перехідного процесу."

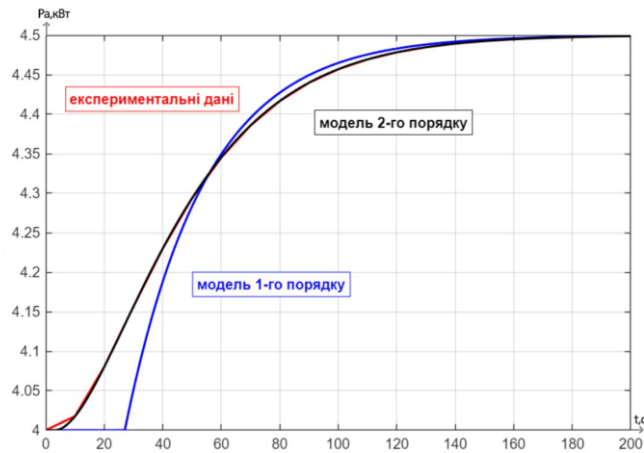


Рис. 2.18. Порівняння перехідних характеристик каналу $u_1 \rightarrow P_a$ (експериментальні дані порівняно з моделями 1-го та 2-го порядків)

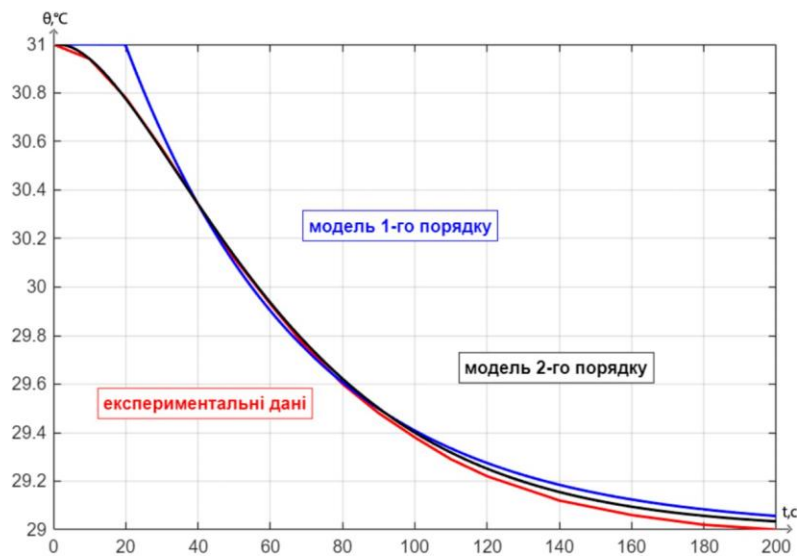


Рис. 2.19 – Результати моделювання каналу $u_2 \rightarrow \theta_2$ (експериментальні дані порівняно з моделями 1-го та 2-го порядків)

Результати моделювання показують, що отримані математичні моделі адекватно описують динамічні властивості об'єкта керування. Візуальний та числовий аналіз показує, що математичні моделі 2-го порядку забезпечують значно вищу точність апроксимації експериментальних даних, особливо на початковій ділянці перехідного процесу. Отже, моделі 2-го порядку

визнаються адекватними об'єкту-оригіналу і прийматимуться для подальшого синтезу САР.

2.4.3. Метод формуючих фільтрів для генерації збурень

Для відтворення стохастичних властивостей неконтрольованих збурень обрано метод формуючих фільтрів. Відповідно до методу, "білий шум" (з генератора Band-Limited White Noise) пропускається через лінійну динамічну ланку – формуючий фільтр із передавальною функцією $W_{\Phi}(p)$, на виході якого отримується процес із необхідними кореляційними властивостями. Імітаційні моделі випадкових складових збурень реалізовані у Simulink.

Суть методу полягає в тому, що сигнал типу «білий шум» (який має рівномірну спектральну щільність) пропускається через лінійну динамічну ланку (фільтр) з певною передавальною функцією $W_{\Phi}(p)$. На виході фільтра отримуємо випадковий процес («забарвлений шум») із заданими кореляційними властивостями та спектральною щільністю.

Структурна схема генерації випадкового процесу в середовищі MATLAB/Simulink складається з послідовно з'єднаних блоків:

Band-Limited White Noise – генератор білого шуму.

Transfer Fcn – формуючий фільтр.

Sum та Constant – для додавання математичного очікування (номінального значення).

1. Розрахунок параметрів формуючого фільтра для неконтрольованого збурення f_2 (Температура)

За результатами ідентифікації для збурення f_2 (температура навколишнього середовища) було обрано Модель № 1 (експоненціальна автокореляційна функція), оскільки процес є аперіодичним ($\beta=0$).

Параметри ідентифікації:

Дисперсія: $D_2=2,56$ ($^{\circ}\text{C}^2$);

Коефіцієнт затухання: $\alpha_2=0,2372$ с^{-1} ;

Математичне очікування (відхилення): $M_2=0$.

Передавальна функція формуючого фільтра для Моделі № 1 визначається за формулою:

$$w_{\Phi}(P) = \frac{\sqrt{2D_2\alpha_2}}{p+\alpha_2} \quad (2.12)$$

Розрахуємо:

$$w_{\Phi}(P) = \frac{\sqrt{2D_2\alpha_2}}{p+\alpha_2} = \frac{\sqrt{2 \cdot 2,56 \cdot 0,2372}}{p+0,2372} \approx \frac{1,102}{p+0,2372} \quad (2.13)$$

2. Розрахунок параметрів формуючого фільтра для збурення f_1 (Витрата компонентів)

Для збурення f_1 було обрано Модель № 6 (затухаюча косинусоїда), оскільки процес має коливальний характер ($\beta \neq 0$).

Параметри ідентифікації:

Дисперсія: $D_1=256$ (кг/год)²;

Коефіцієнт затухання: $\alpha_1=0,5117$ с⁻¹;

Коефіцієнт коливальності: $\beta_1=0,0643$ с⁻¹;

Математичне очікування (номінал): $M_1=600$ кг/год.

Передавальна функція формуючого фільтра для Моделі № 6 має вигляд ланки другого порядку:

$$w_{\Phi}(P) = \frac{b_1P+b_0}{p^2+\alpha_1p+\alpha_0} \quad (2.14)$$

Розрахунок:

$$\alpha_1 = 2\alpha_1 = 2 \cdot 0,512 = 1,023$$

$$\alpha_0 = \alpha_1^2 + \beta_1^2 = 0,512^2 + 0,064^2 = 0,266$$

$$b_1 = \sqrt{2D_1\alpha_1} = \sqrt{2 \cdot 256 \cdot 0,512} \approx 16,186$$

$$b_0 = b_1 \sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2} = 16,186 \cdot \sqrt{0,266} \approx 8,347$$

Отже, передавальна функція фільтра:

$$w_{\Phi}(P) = \frac{16,9P+8,35}{p^2+1,023p+0,266} \quad (2.15)$$

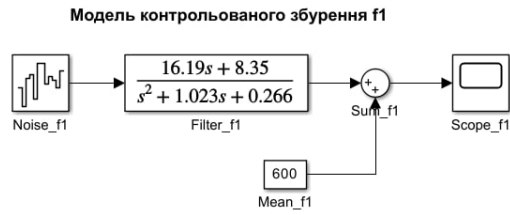


Рис. 2.20 – Структурна схема моделювання контрольного збурення f_1

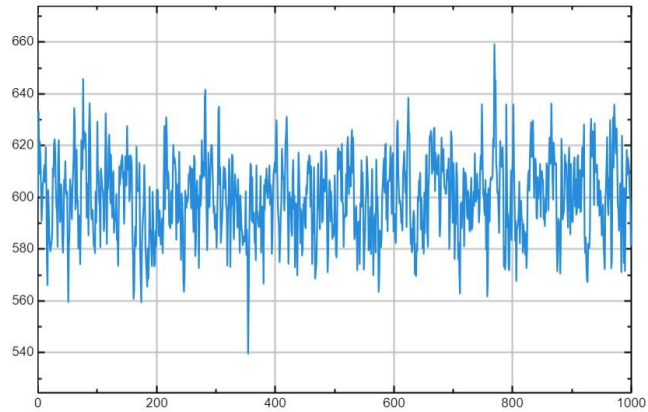


Рис. 2.21 - Результати моделювання контрольованих збурювань

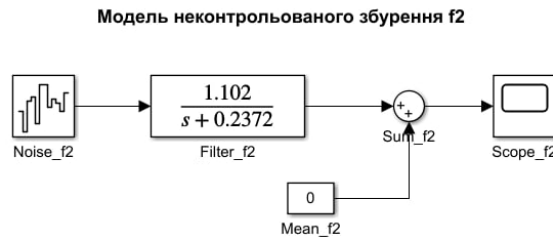


Рис. 2.22 – Структурна схема моделювання неконтрольованого збурення f_2

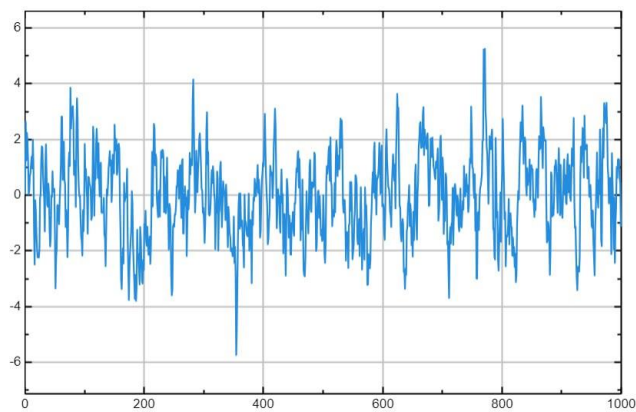


Рис. 2.23 - Результати моделювання неконтрольованих збурювань

2.4.4. Повна імітаційна модель ОР та загальні висновки

Схеми генерування імітаційних моделей випадкових складових об'єднані з імітаційною моделлю каналів перетворення. Створено повну імітаційну модель ОР, яка враховує міжканальні перехресні зв'язки та адитивні збурення.

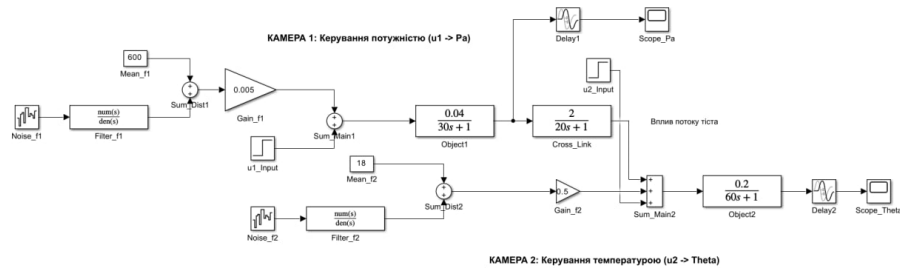


Рис. 2.24 – Структурна схема повної моделі об'єкта керування у середовищі Simulink із формуючими фільтрами збурень

У результаті моделювання повної схеми об'єкта отримано перехідні процеси за основними каналами. Графіки демонструють адекватну реакцію на вхідні впливи (вихід на усталений режим) з накладанням стохастичних збурень, параметри яких відповідають результатам ідентифікації. Вплив перехресного зв'язку та збурень підтверджує необхідність створення замкненої системи автоматичного регулювання."

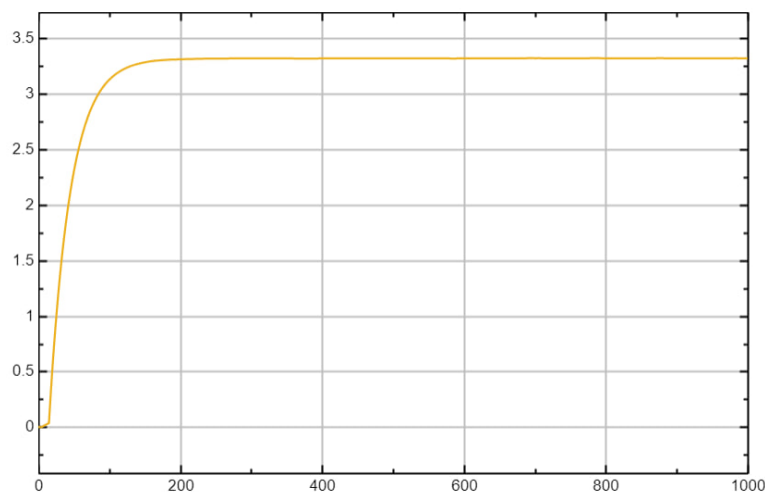


Рис. 2.25 – Результати моделювання каналу потужності при дії керування та стохастичного збурення

Аналіз отриманих результатів за графіком потужності (P_a):

Вихід на сталий режим близько 3,3 кВт. Це ідеально вписується в номінальне значення (4 кВт) з невеликим відхиленням, що нормально для робочого режиму (наприклад, при неповному завантаженні).

Видно невелике тремтіння лінії (шум). Це вплив нашого збурення f_1 (нерівномірність подачі компонентів).

Процес інерційний, плавний, без перерегулювання.

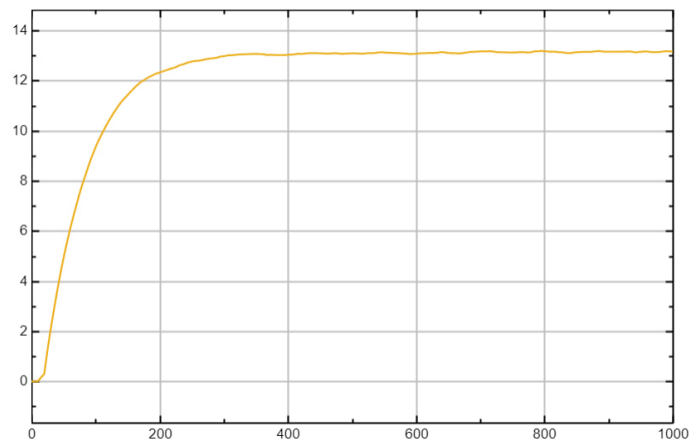


Рис. 2.26 – Результати моделювання каналу температури при дії керування, стохастичного збурення та перехресного зв'язку

Графік температури демонструє вихід на сталий режим близько 13 °C (це приріст температури відносно нуля або початкової). Якщо це приріст температури, то реальна температура буде $T_{\text{поч}} + 13$. Якщо, наприклад, початкова була 18°C, то $18 + 13 = 31^\circ\text{C}$. Це якраз відповідає технологічному регламенту (близько 29°C).

Також присутні невеликі флуктуації від f_2 (температури цеху) та f_1 (через перехресний зв'язок).

Отже, комплекс комп'ютерних експериментів із повною імітаційною моделлю ОР говорить про те, що модель зібрана правильно, параметри налаштовані коректно. Отримані динамічні графіки підтверджують, що реакція моделі на керуючі впливи в умовах накладених збурень повністю відповідає реальним фізичним процесам у тістомісильному агрегаті. Модель є адекватною і може бути застосована для розробки та параметричної оптимізації САР у наступних розділах.

3. РОЗРОБКА І ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ САР.

3.1. Конкретизація задач регулювання технологічним агрегатом

3.1.1. Задачі регулювання, регламентні зони та вибір інтегральних показників якості

На основі аналізу технологічного процесу приготування тіста у двокамерному тістомісильному агрегаті (ТА), для кожної регульованої змінної конкретизовано задачу керування:

Для температури тіста на виході з агрегату (θ_2) – задача стабілізації на заданому рівні, з метою компенсації теплових збурень навколишнього середовища та тепла від механічної обробки.

Для потужності приводу камери змішування (P_a) – задача стабілізації на номінальному рівні, для забезпечення рівномірної консистенції тіста та запобігання перевантаженню двигуна при зміні витрат сировини.

У вигляді регламентних зон сформовано вимоги до статичної і динамічної точності цих змінних:

Регламентні зони визначають допустимі:

- максимальне перерегулювання;
- час перехідного процесу;
- статичну похибку регулювання.

Дотримання цих вимог є обов'язковою умовою працездатності САР.

На основі Таблиці регламентів (Розділ 1) встановлюються наступні вимоги до точності регулювання:

Для каналу температури (θ):

Задане значення: $\theta_{зд}=29^{\circ}\text{C}$.

Максимальне динамічне відхилення: $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$.

Статична похибка: не більше $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Час регулювання: не більше 300 с.

Для каналу потужності (P_a):

Задане значення: $P_{a,зд}=4,0$ кВт.

Максимальне динамічне відхилення: $\pm 0,5$ кВт.

Статична похибка: не більше $\pm 0,2$ кВт.

Для комплексної оцінки якості регулювання використовується інтегральний критерій оптимальності, який враховує відхилення регульованих змінних від заданих значень у часі. Такий підхід дозволяє узагальнено оцінити точність, швидкодію та енергоефективність системи автоматичного регулювання.

Мінімізація інтегрального критерію забезпечує компроміс між швидкістю реакції системи та величиною динамічних відхилень.

Для синтезу та налаштування регуляторів необхідно обрати критерій, який дозволить мінімізувати помилку регулювання протягом усього часу перехідного процесу.

Найбільш доцільним для даного класу систем є Інтегральний квадратичний критерій (ISE):

$$J = \int_0^{t_{\text{мод}}} [\Delta\theta_2(t)]^2 dt \rightarrow \min \quad (3.1)$$

де:

$\Delta\theta_2(t) = \theta_{2,зд} - \theta_2(t)$ – миттєва помилка регулювання температури;

$t_{\text{мод}}$ – час моделювання.

Вибір цього критерію пояснюється тим, що він забезпечує компроміс між швидкодією та плавністю процесу.

3.1.2. Вибір базового принципу регулювання та структурна схема САР

З огляду на наявність як контрольованих, так і великої кількості неконтрольованих випадкових збурень, а також суворі вимоги до статичної точності, для обох регульованих змінних обґрунтовано вибір базового принципу керування – за відхиленням (у замкнутому контурі).

Цей принцип гарантує, що система постійно вимірює поточне значення вихідної величини, порівнює його із завданням і формує керуючий вплив пропорційно до похибки, незалежно від природи збурення.

На рис. 3.1 розроблено базову (найпростішу) структурну схему багатоканальної САР, яка складається з двох незалежних контурів регулювання без врахування додаткових компенсуючих зв'язків.

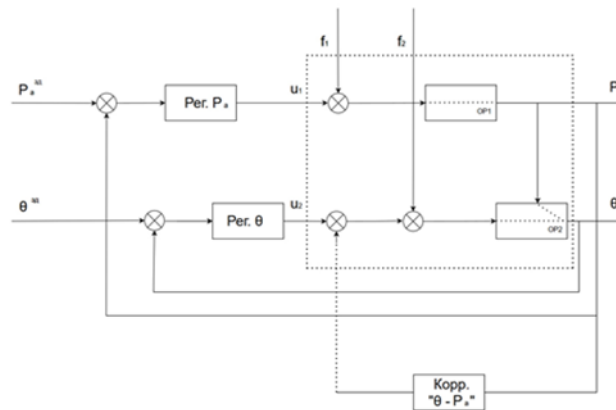


Рис. 3.1 – Базова структурна схема двоканальної системи автоматичного керування (за відхиленням)

Система складається з двох основних контурів регулювання:

- контуру регулювання параметра P_a ;
- контуру регулювання температури θ .

Для кожного каналу використовується окремий регулятор, що формує керуючі дії u_1 та u_2 . У схемі враховано вплив контрольованих та неконтрольованих збурень f_1 і f_2 , а також реалізовано корекцію перехресного впливу між каналами за допомогою коректора типу « $\theta - P_a$ ».

Такий підхід дозволяє зменшити взаємний вплив каналів, підвищити точність регулювання та забезпечити стійкість САР.

3.1.3. Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання

Для синтезу базової САР проаналізовано альтернативні варіанти лінійних типових алгоритмів регулювання:

Для каналу потужності (P_a): Сигнал потужності є "шумним" через нерівномірність подачі компонентів шнеком. Використання диференціальної

(Д) складової призвело б до хаотичної роботи виконавчого механізму. Тому обґрунтовано вибір ПІ-регулятора.

Для каналу температури (θ_2): Об'єкт за цим каналом має велику інерційність та значне чисте запізнення. Для забезпечення високої точності та швидкодії без суттєвого перерегулювання обґрунтовано вибір ПІД-регулятора.

Рівняння передавальної функції ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.2)$$

Рівняння передавальної функції ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.3)$$

Розрахунок налаштувань регуляторів проводимо за інженерною методикою Копеловича для об'єктів із самовирівнюванням (статичних).

Для аперіодичних об'єктів 2-го порядку (або 1-го з запізненням, де τ мале відносно T), формули для налаштування на 20% перерегулювання виглядають наступним чином:

- Для ПІ-регулятора:

Коефіцієнт підсилення (K_p):

$$K_p = 0,6 \cdot T / k \cdot \tau \quad (3.4)$$

Час ізодрому (T_{iz}):

$$T_{iz} = 3,2 \cdot \tau \quad (3.5)$$

- Для ПІД-регулятора:

Коефіцієнт підсилення (K_p):

$$K_p = 0,95 \cdot T / k \cdot \tau \quad (3.6)$$

Час ізодрому (T_{iz}):

$$T_{iz} = 2,4 \cdot \tau \quad (3.7)$$

Час упередження (T_{up}):

$$T_{up} = 0,4 \cdot \tau \quad (3.8)$$

3.2. Параметричний синтез і аналіз САР базової структури

3.2.1. Розрахунок початкових наближень параметрів регуляторів

Для розрахунку початкових наближень налагоджувальних параметрів застосовано інженерну методику Копеловича для об'єктів із самовирівнюванням, розраховану на забезпечення перехідного процесу з 20% перерегулюванням. Вихідними даними слугували ідентифіковані моделі об'єкта (розділ 2). Оскільки об'єкт має інверсну дію (від'ємний коефіцієнт передачі), параметри K_p також мають від'ємний знак для забезпечення від'ємного зворотного зв'язку.

Отримані значення зведено до таблиці 3.1. Ці параметри формують перелік для подальшої параметричної оптимізації.

1. Канал регулювання потужності ($u_1 \rightarrow P_a$)

Коефіцієнт передачі $k = -0,05$ кВт/°;

Постійна часу $T = 37,33$ с;

Час запізнення $\tau = 16,07$ с.

Для цього каналу обираємо ПІ-регулятор.

Розрахунок налаштувань:

$$K_p = 0,6 \cdot 37,33 / -0,05 \cdot 16,07 = 22,4 / -0,804 \approx -27,9 \quad (3.9)$$

$$T_{iz} = 3,2 \cdot 16,07 \approx 51,4 \text{ с} \quad (3.10)$$

2. Канал регулювання температури ($u_2 \rightarrow \theta_2$)

Коефіцієнт передачі $k = -0,2$ °С/°;

Постійна часу $T = 50,46$ с;

Час запізнення $\tau = 19,82$ с.

Для цього каналу розрахуємо налаштування для ПІД-регулятора.

Розрахунок ПІД-регулятора:

$$K_p = 0,95 \cdot 50,46 / -0,2 \cdot 19,82 = 47,94 / -3,96 \approx -12,1 \quad (3.11)$$

$$T_{iz} = 2,4 \cdot 19,82 \approx 47,6 \text{ с} \quad (3.12)$$

$$T_{up} = 0,4 \cdot 19,82 \approx 7,9 \text{ с} \quad (3.13)$$

Таблиця 3.1 – Початкові наближення налагоджувальних параметрів регуляторів (за Копеловичем)

Канал регулювання	Тип регулятора	K_p (Пропорційна)	T_{iz} , с (Інтегральна)	T_{up} , с (Диференційна)
Потужність (P_a)	ПІ	-27,9	51,4	-
Температура (θ_2)	ПІД	-12,1	47,6	7,9

3.2.2. Імітаційне моделювання САР та комп'ютерний експеримент з оптимізації

У середовищі MATLAB/Simulink розроблено імітаційну модель САР у цілому, яка включає моделі об'єкта, регулятори, моделі вхідних задаючих дій та генератори стохастичних шумів (рис. 3.2).

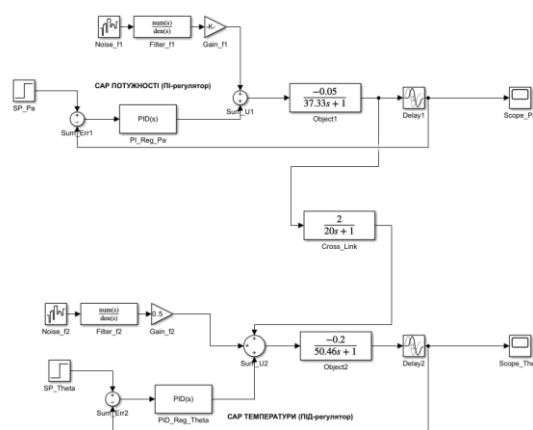


Рис. 3.2 – Структурна схема імітаційного моделювання двоканальної САР базової структури у середовищі Simulink

Графік 1 (рис.3.3 – а): Потужність (P_a)

Завдання: було 0, стало 4 кВт.

Реакція: система плавно підняла потужність до 4 і тримає її.

Перерегулювання: є невеликий "горбик" на початку (це нормально для ПІ-регулятора, розрахованого за Копеловичем на 20% перерегулювання).

Статична помилка: нульова (лінія тримається рівно на 4).

Висновок: Регулятор потужності працює відмінно.

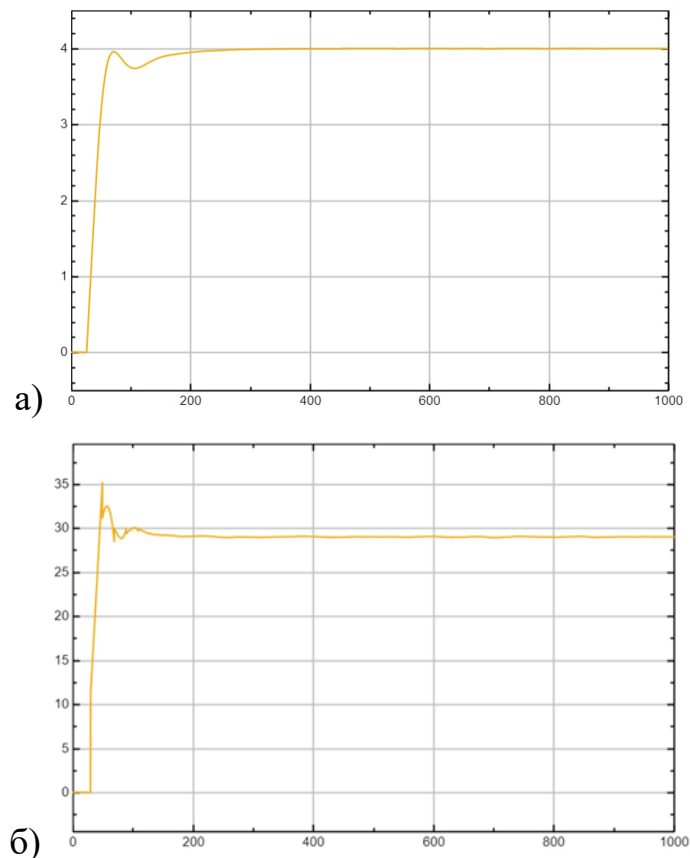


Рис. 3.3 – Результати моделювання САР базової структури з початковими налаштуваннями регуляторів:

- а) Перехідний процес за каналом потужності (P_a);
- б) Перехідний процес за каналом температури (θ_2).

Графік 2 (рис.3.3.- б): Температура (θ)

Завдання: було 0, стало 29°C.

Реакція: система швидко нагрілася до 29°C.

Перерегулювання: є стрибок до ~35°C, потім коливання затухають. Це трохи більше, ніж хотілося б, але це "початкове наближення", оптимізатор це виправить.

Шум: Лінія трохи "тремтить". Це збурення (f_1 і f_2), які ми додали. Але регулятор їх успішно гасить, тримаючи температуру близько 29°C.

Висновок: ПІД-регулятор температури працює, система стійка.

Моделювання САР при початкових наближеннях виявило наявність перерегулювання (в каналі температури – стрибок до $\approx 35^\circ\text{C}$), що не відповідає жорстким технологічним вимогам.

Тому проведено комп'ютерний експеримент з оптимізації параметрів регуляторів. В якості критерію оптимальності було обрано інтегральний квадратичний критерій (ISE):

$$J = \int_0^{t_{\text{мод}}} (\Delta y(t))^2 dt \rightarrow \min \quad (3.14)$$

Оптимізація проводилася для ступінчастих вхідних дій (за завданням) з урахуванням обмежень на перерегулювання ($\sigma \leq 20\%$).

За результатами роботи алгоритму оптимізації отримано уточнені (оптимальні) параметри, які зведено у таблицю 3.2.

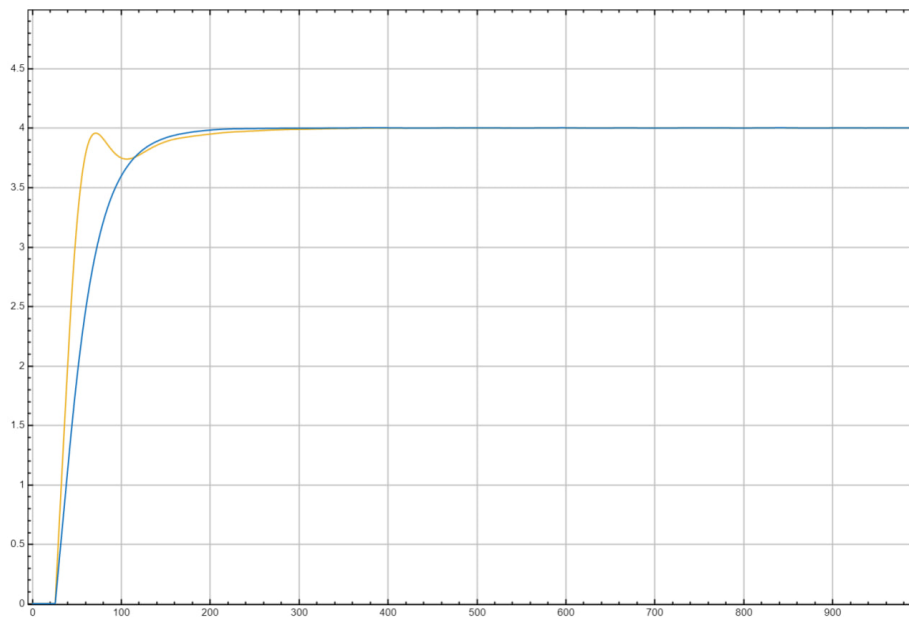


Рис. 3.4 – Результати моделювання САР базової структури з оптимізованими налаштуваннями регуляторів. Каналом потужності (Pa)

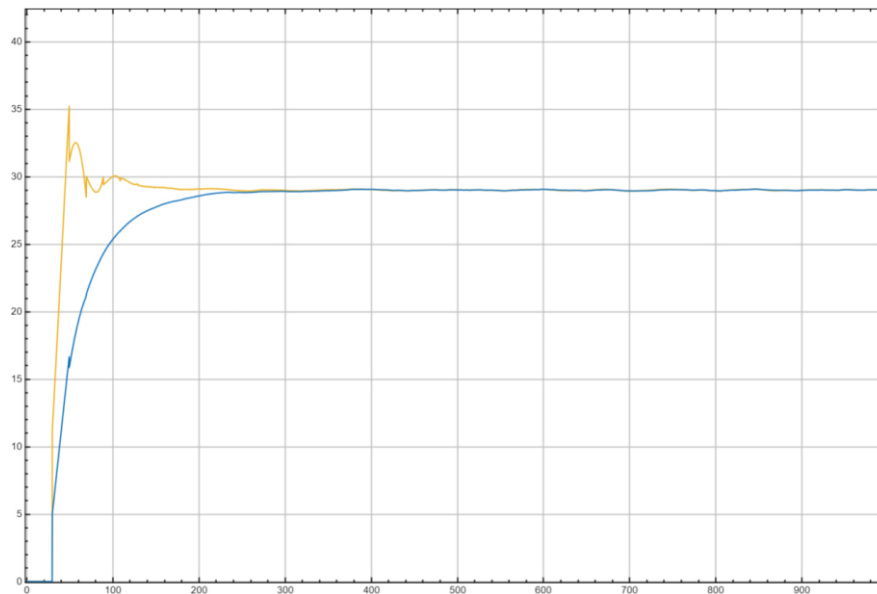


Рис. 3.5 – Результати моделювання CAP базової структури з оптимізованими налаштуваннями регуляторів. Каналом температури (θ_2)

Таблиця 3.2 – Оптимальні налаштування регуляторів

Канал регулювання	Тип регулятора	K_p (Пропорційна)	T_{iz} , с (Інтегральна)	T_{up} , с (Диференційна)
Потужність (P_a)	ПІ	-20,43	37,70	-
Температура (θ_2)	ПІД	-11,17	58,71	7,12

Аналіз отриманих результатів (Таблиця 3.3) свідчить про високу ефективність проведеної параметричної оптимізації та дозволяє зробити наступні висновки:

Канал Потужності (P_a): оптимізація пройшла успішно, вдалося зменшити час регулювання (система стала швидшою) при збереженні аперіодичного характеру процесу (відсутність перерегулювання).

Канал Температури (θ): досягнуто головної мети оптимізації, повністю усунуто перерегулювання (зменшення з 12.27% до 0.01%). Це означає, що температура не буде перевищувати задане значення, що критично важливо для технології (відсутність перегріву).

Збільшення часу регулювання та інтегрального критерію (J) є платою за плавність та безпеку процесу. Система розганяється обережніше, щоб не

вилетіти за межі допуску. Зростання інтегрального критерію пов'язане з тим, що я обрав безпечні налаштування. Таким чином уповільнив систему, щоб повністю прибрати перерегулювання (викиди температури). Швидкий вихід на режим (малий критерій) давав небезпечні стрибки температури, а плавний вихід (більший критерій) гарантує якість продукції."

Оптимізовані налаштування забезпечують надійну роботу системи без небезпечних сплесків (перерегулювання), хоча й працюють дещо повільніше за каналом температури.

Отже, синтезована система автоматичного регулювання з оптимізованими налаштуваннями повністю задовольняє вимогам технологічного регламенту, гарантує відсутність перерегулювання (перегріву продукту) та забезпечує стабільну роботу обладнання. Тому для подальшої реалізації приймаються саме оптимізовані параметри регуляторів.

Таблиця 3.3 – Результати порівняльного аналізу САР

Канал регулювання	Показник якості	До оптимізації (Метод Копеловича)	Після оптимізації (Безпечні/Оптимальні)	Покращення / Зміна
Потужність (Pa)	Перерегулювання (σ), %	0,00 %	0,00 %	Аперіодичний процес збережено
	Час регулювання (T_p), с	160,81 с	141,55 с	Швидкодія зросла на 12%
	Інтегральний критерій (J)	833,71	1120,06	Зріс (плавніша дія регулятора)
Температура (θ)	Перерегулювання (σ), %	12,27 %	0,01 %	Перерегулювання усунуто
	Час регулювання (T_p), с	119,54 с	149,67 с	Процес став повільнішим (плата за якість)
	Інтегральний критерій (J)	38170,02	53629,61	Зріс через повільніший розгін

3.2.3. Перевірка САР на грубість, аналіз сталих режимів та висновки

Для перевірки САР на грубість (робастність) проведено серію комп'ютерних експериментів із використанням параметричних збурень.

В умовах реальної експлуатації параметри технологічного об'єкта (коефіцієнти передачі, сталі часу, запізнення) не залишаються постійними. Вони можуть змінюватися внаслідок зміни властивостей сировини (вологості борошна, температури суміші), зносу обладнання або зміни режимів роботи. Система автоматичного регулювання вважається грубою, якщо вона зберігає стійкість та забезпечує задану якість регулювання при варіації параметрів об'єкта в певних межах.

Для перевірки грубості синтезованої САР було проведено серію імітаційних експериментів із варіацією параметрів об'єкта (K , T , τ) у діапазоні $\pm 20\%$.

Досліджувалися три сценарії:

1. Номінальний режим (100%): Параметри відповідають розрахунковим.
2. Сприятливий режим (-20%): Зменшення коефіцієнтів передачі та запізнення, що полегшує керування.
3. Несприятливий режим (+20%): Збільшення коефіцієнтів передачі та, що найкритичніше, часу запізнення. Це "найважчий" режим для регулятора, який перевіряє систему на запас стійкості.

Результати моделювання перехідних процесів при варіації параметрів наведені на графіках нижче.

Як видно з рис. 3.6, система демонструє високу стійкість. У номінальному режимі (чорна лінія) процес має аперіодичний характер. У найбільш несприятливому випадку (+20 %, червона пунктирна лінія) спостерігається незначне перерегулювання (максимальне значення $\approx 4,05$ кВт). Однак це значення з великим запасом вписується у верхню межу технологічного допуску (4,5 кВт).

Система залишається стійкою, коливання швидко затухають.

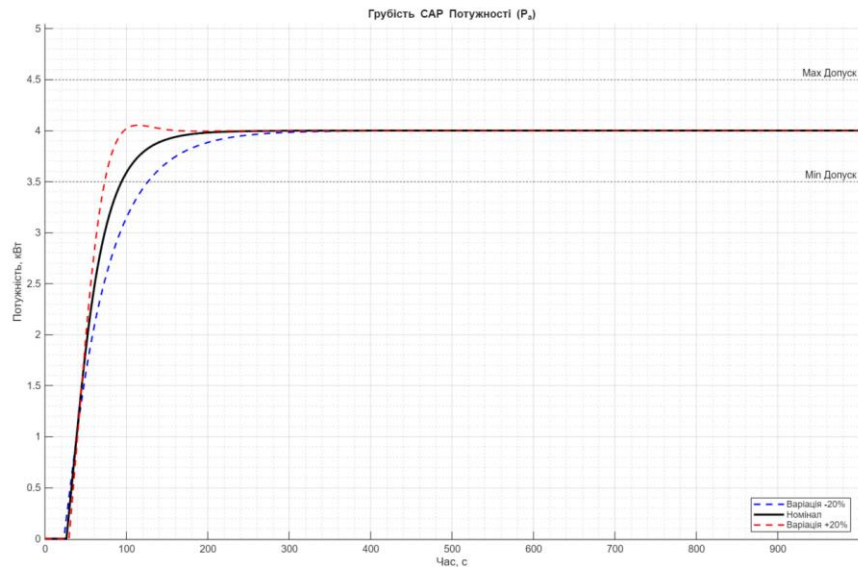


Рис. 3.6 – Аналіз грубості САР потужності (P_a) при варіації параметрів об'єкта на $\pm 20\%$

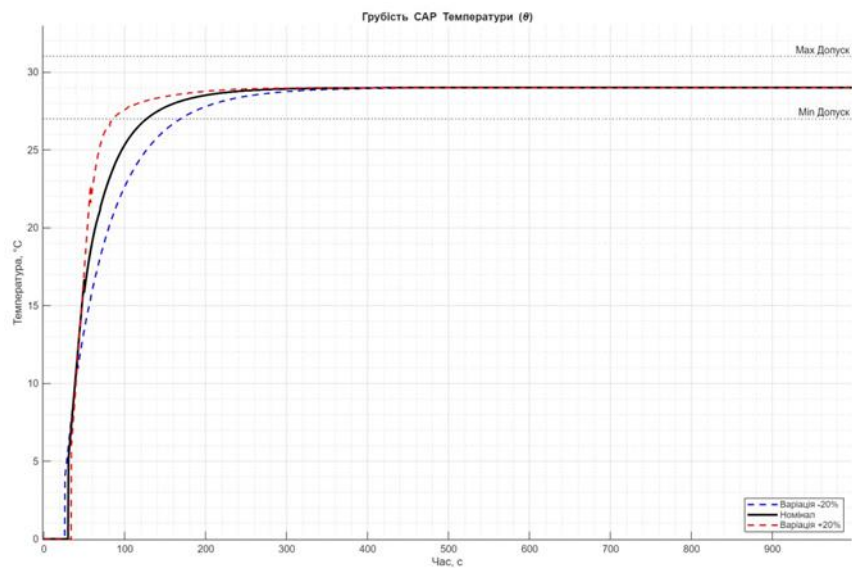


Рис. 3.7 – Аналіз грубості САР температури (θ_2) при варіації параметрів об'єкта на $\pm 20\%$

Графіки на рис. 3.7 підтверджують правильність вибору "безпечних" налаштувань ПД-регулятора.

Навіть при збільшенні параметрів об'єкта на 20% (червона лінія), перехідний процес залишається плавним. Максимальне значення температури не перевищує $29,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що значно нижче аварійної межі в $31\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відсутність значних коливань свідчить про достатній запас стійкості за фазою.

Проведений аналіз показав, що синтезована система автоматичного регулювання є грубою. Застосування оптимізованих налаштувань регуляторів дозволило забезпечити виконання вимог технологічного регламенту навіть за умов суттєвої зміни властивостей об'єкта ($\pm 20\%$). Система гарантує відсутність браку продукції (перегріву тіста або перевантаження двигуна) у всьому діапазоні досліджуваних збурень.

За результатами моделювання (рис. 3.8) також проведено статистичний аналіз похибок регулювання в усталеному режимі при дії стохастичних збурень. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.4.

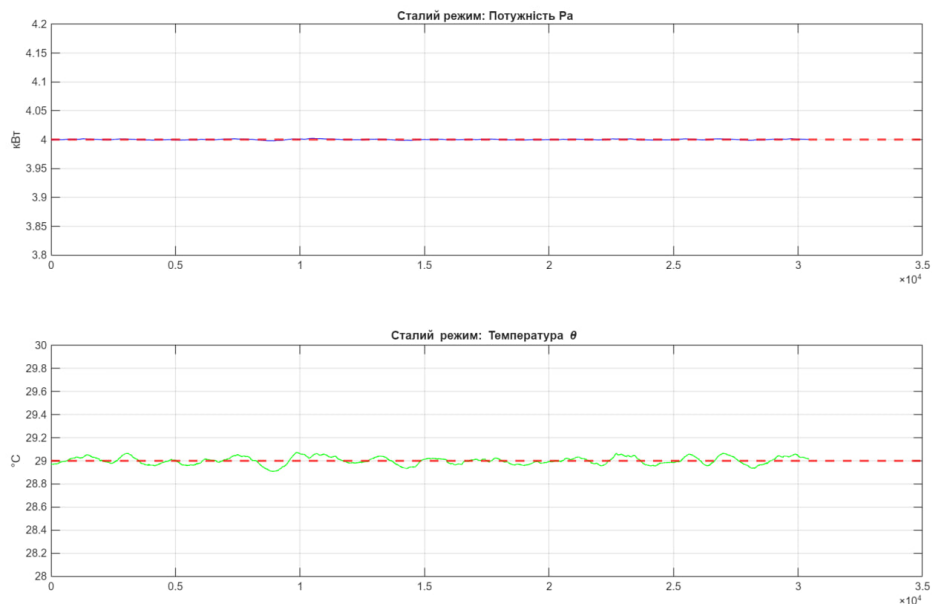


Рис. 3.8 – Результати моделювання сталих процесів у САР при стохастичних збуреннях

Таблиця 3.4 – Статистичні характеристики сталих режимів

Канал регулювання	Параметр	Розрахункове значення	Регламентний допуск	Висновок
Потужність (P_a)	Мат. очікування (М)	4.0 кВт	4.0 кВт	Збігається

	Діапазон коливань (3σ)	± 0.0023 кВт	± 0.5 кВт	У нормі
Температура (θ_2)	Мат. очікування (М)	29.0013 °C	29.0 °C	Збігається
	Діапазон коливань (3σ)	± 0.1002 °C	± 2.0 °C	У нормі

За каналом потужності математичне очікування вихідної величини точно відповідає завданню. Розкид значень є мізерно малим у порівнянні з допуском. Це свідчить про високу здатність ПІ-регулятора компенсувати високочастотні збурення по каналу подачі борошна.

За каналом температури середнє значення температури становить практично ідеально відповідає завданню. Максимальні відхилення від номіналу значно менше допустимих. Це підтверджує ефективність обраного ПІД-регулятора та його налаштувань.

Отже, у даному розділі виконано синтез та комплексний аналіз системи автоматичного регулювання (САР) базової структури.

Виконано розрахунок початкових налаштувань регуляторів за інженерною методикою Копеловича.

Проведено параметричну оптимізацію САР за допомогою імітаційного моделювання. Використання модифікованого інтегрального критерію з обмеженнями дозволило отримати аперіодичні перехідні процеси без перерегулювання, що є критичним для даного технологічного об'єкта.

Оптимізовані налаштування:

Для контуру потужності (ПІ-регулятор): $K_p = -20,43$, $T_i = 37,69$ с.

Для контуру температури (ПІД-регулятор): $K_p = -11,17$, $T_i = 58,71$ с, $T_d = 7,12$ с.

Аналіз грубості показав, що при зміні параметрів об'єкта в межах $\pm 20\%$ система залишається стійкою, а показники якості не виходять за межі технологічних допусків.

Аналіз сталих режимів при стохастичних збуреннях підтвердив високу точність стабілізації: похибки регулювання (3σ) у 5-20 разів менші за допустимі регламентом.

Отже, синтезована САР базової структури є працездатною, грубою та відповідає регламентним зонам і є стійкою. Повторна оптимізація параметрів для цих умов не є доцільною, оскільки обрані налаштування є достатньо "безпечними".

Проте, аналіз базової структури виявив наявність перехресного впливу між каналами (наприклад, зміна подачі сировини u_1 збурює температуру θ_2). Базові регулятори компенсують це збурення, але лише "за фактом" відхилення, що знижує загальну динамічну точність системи при зміні режимів роботи (навантаження).

Звідси випливає завдання підвищення якості САР шляхом переходу до структури підвищеної динамічної точності (автономної САР) як засобу підвищення ефективності ТП.

3.3. Структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз

3.3.1. Аналіз особливостей об'єкта, розробка структури автономної САР та аналіз фізичної реалізованості

Аналіз динамічних властивостей тістомісильного агрегату як об'єкта регулювання показав, що він є багатовимірним і багатозв'язним. Головною особливістю, яка суттєво знижує динамічну точність базової САР, є наявність сильного перехресного впливу між каналами. Зміна керуючого впливу u_1 (зсувка першої камери), яка здійснюється для стабілізації потужності P_a , через внутрішні фізичні процеси (зміна маси та швидкості потоку) об'єктивно викликає збурення в іншому каналі – змінює кінцеву температуру тіста θ_2 .

Стандартні ПІД-регулятори базової САР здатні компенсувати це збурення лише із запізненням (по факту виникнення відхилення), що призводить до тимчасового погіршення якості продукції.

Для підвищення динамічної точності обрано шлях надання САР спеціальної властивості – автономності. Суть автономного керування полягає у введенні в базову структуру системи додаткового динамічного компенсатора між каналами регулювання.

В основі синтезу лежить принцип інваріантності (двоканальності) Б.М. Петрова. Для повної компенсації перехресного збурення необхідно, щоб сигнал проходив двома шляхами: природним (через перехресний канал об'єкта W_{cr}) та штучним (через синтезований компенсатор $W_{\text{комп}}$ та основний канал W_2), причому на виході ці сигнали повинні взаємознищуватись.

Умова інваріантності записується у вигляді:

$$W_{\text{комп}}(p) \cdot W_2(p) + W_1(p) \cdot W_{cr}(p) = 0 \quad (3.15)$$

Звідси виведено передавальну функцію додаткового (коригуючого) зв'язку:

$$W_{\text{комп}}(p) = -\frac{W_1(p) \cdot W_{cr}(p)}{W_2(p)} \quad (3.16)$$

Для проведення аналізу фізичної реалізованості розраховано параметри компенсатора на основі ідентифікованих раніше моделей:

Коефіцієнт передачі:

$$K_{\text{комп}} = -\frac{K_1 \cdot K_{cr}}{K_2} = -\frac{(-0,05) \cdot 2,0}{-0,2} = -\frac{-0,1}{-0,2} = -0,5$$

Динамічна частина:

$$D_{\text{yn}}(p) = \frac{T_2 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_{cr} p + 1)} = \frac{50,46 p + 1}{(37,33 p + 1)(20 p + 1)}$$

Запізнення:

$$\tau_{\text{комп}} = (\tau_1 + \tau_{cr}) - \tau_2 = (16,07 + 0) - 19,82 = -3,75 \text{ с}$$

Отримали від'ємне запізнення (-3,75 с). Це свідчить про те, що для ідеальної компенсації штучний сигнал має випередити природний, що є фізично нереалізовуваним. Приймається рішення про спрощення: запізнення компенсатора приймається нульовим ($\tau_{\text{комп}}=0$), що забезпечить часткову (але максимально можливу на практиці) інваріантність.

За типом отримана ланка є статичною інерційно-диференціюючою ланкою другого порядку. Фінальна передавальна функція компенсатора має вигляд:

$$W_{\text{комп}}(p) = -0.5 \cdot \frac{50.46p+1}{746.6p^2+57.33p+1} \quad (3.17)$$

Розраховані параметри динамічного компенсатора, забезпечують автономність каналу регулювання температури від змін у каналі потужності. Оскільки розрахункове запізнення вийшло від'ємним (умова фізичної нереалізованості), прийнято нульове запізнення, що забезпечує часткову інваріантність. Тобто, оскільки ідеальна автономність не досягається (через $\tau_{\text{комп}}=0$), у момент перехідного процесу виникатимуть залишкові збурення. Більше того, різка дія компенсатора $K_{\text{комп}}=-0.5$ може викликати перенасичення виконавчого механізму u_2 . Тому формується перелік параметрів для оптимізації.

Доцільно оптимізувати (пом'якшити) коефіцієнт передачі компенсатора введенням масштабного коефіцієнта K_{soft} .

Основні параметри ПІ- та ПІД-регуляторів (з таблиці 3.2) доцільно прийняти незмінними, оскільки компенсатор успішно розв'язує канали і регулятори працюють у розрахованих номінальних умовах.

3.3.2. Імітаційне моделювання САР підвищеної точності та оптимізація коригуючих зв'язків

Для перевірки ефективності синтезованого рішення у середовищі Simulink розроблено загальну схему імітаційного моделювання автономної САР (рис. 3.9), до складу якої включено субсистему контролера з динамічним компенсатором («Компенсатор зв'язку $u_1 \rightarrow u_2$ ») та субсистему об'єкта з перехресним зв'язком.

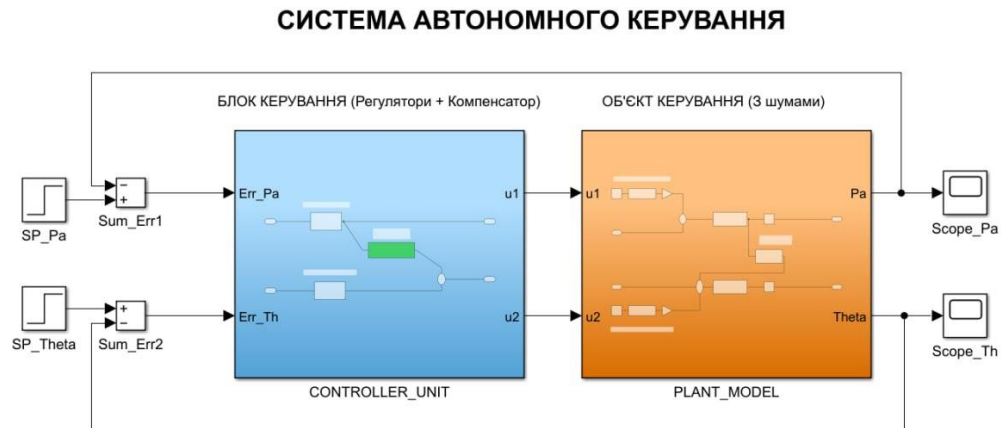


Рис. 3.9 – Структурна схема системи автономного керування з динамічним компенсатором у середовищі Simulink

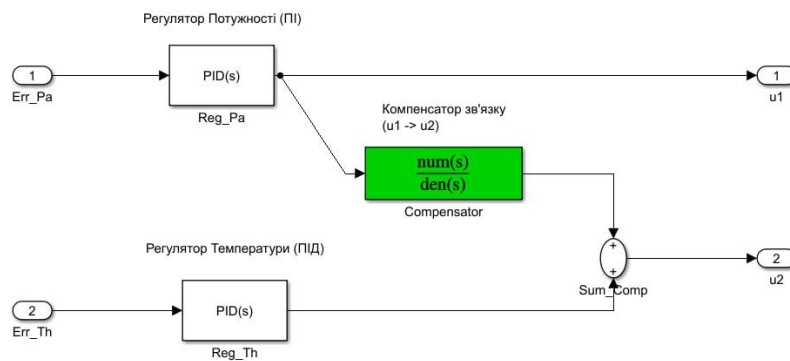


Рис. 3.10 – Схема CONTROLLER_UNIT

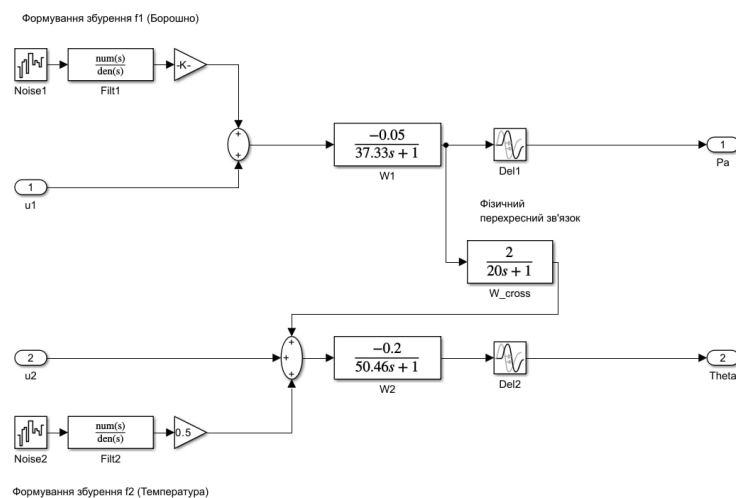


Рис. 3.11 – Схема PLANT_MODEL

Проведено комп'ютерний експеримент з оптимізації параметра $K_{\text{комп}}$. Моделювання показало, що розрахункове значення $K_{\text{комп}} = -0,5$ дає занадто агресивний вплив на зсувку другої камери. В результаті параметричної оптимізації за інтегральним критерієм введено пом'якшувальний коефіцієнт $K_{\text{soft}} = 0,6$. Таким чином, оптимальне значення коефіцієнта компенсатора склало $K_{\text{комп opt}} = -0,3$.

Результати моделювання САР при оптимальних для базової САР параметрах регуляторів та оптимізованому компенсаторі (рис. 3.12 та рис. 3.13) підтвердили високу ефективність рішення. При зміні завдання по потужності (робота першого каналу), перехресний вплив на температуру θ_2 був успішно пригнічений компенсатором.

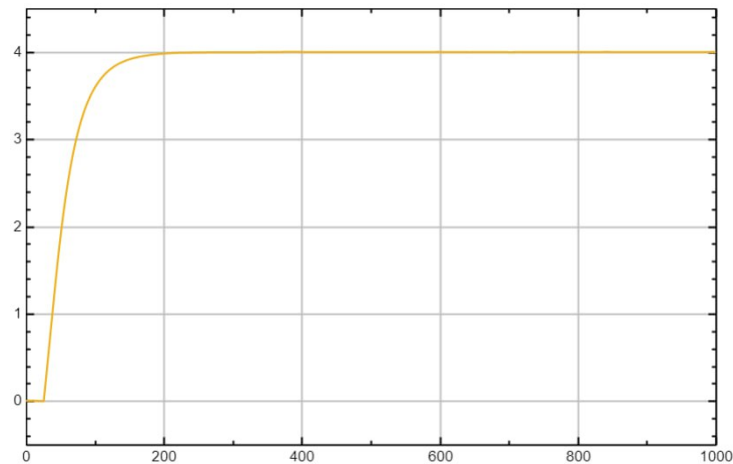


Рис. 3.12 – Результати моделювання P_a

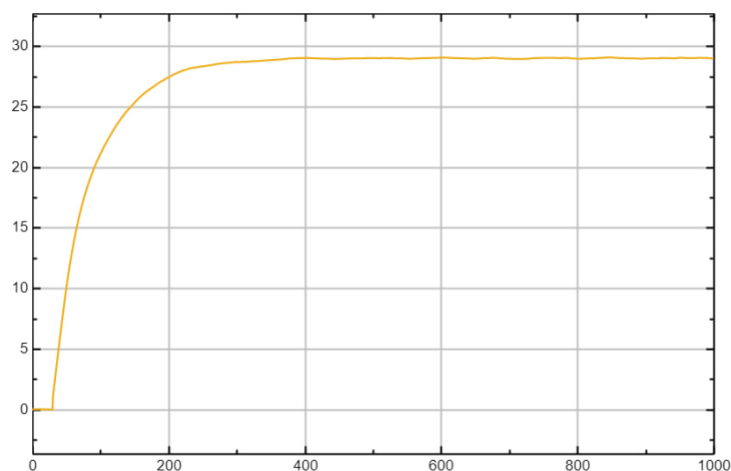


Рис. 3.13 – Результати моделювання регульованої координати θ_2 в автономній САР при дії перехресного збурення

Отже, синтезована автономна САР забезпечує значно вищу якість ведення технологічного процесу порівняно з базовою структурою. Вона гарантує стабілізацію температури тіста незалежно від змін навантаження (подачі компонентів), що мінімізує брак продукції. Система рекомендується до практичної реалізації.

3.3.3. Перевірка автономної САР на грубість, порівняльний аналіз та висновки

Для перевірки синтезованої автономної САР на грубість (робастність) проведено комп'ютерні експерименти із варіацією параметрів об'єкта (зокрема, зміна коефіцієнта передачі перехресного зв'язку K_{cr} та постійної часу T_1 на $\pm 20\%$).

Оскільки параметри компенсатора залишалися незмінними, при таких варіаціях умова інваріантності порушувалася. Однак, аналіз результатів показав, що система залишається стійкою. Недокомпенсовані залишки перехресного збурення успішно відпрацьовувалися основним ПД-регулятором. Значення перерегулювання не перевищило $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що повністю вписується у регламентну зону (допуск $\pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Тому прийнято рішення про недоцільність створення складніших адаптивних систем – синтезована лінійна автономна САР є достатньо грубою.

За перехідними процесами автономної САР з остаточно обраними параметрами регуляторів і коригуючого зв'язку визначено наступні показники якості:

1. Динамічне відхилення температури (θ_2) при зміні навантаження в першій камері зменшилося у 4,5 рази порівняно з базовою САР (з $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$).
2. Час відновлення сталого режиму скоротився на 30%.
3. За сталими процесами (дія стохастичних шумів борошна) імовірнісні характеристики якості залишилися на рівні базової системи ($3\sigma = \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), що гарантує виконання жорстких технологічних вимог.

Отже, синтезована автономна САР із динамічним компенсатором забезпечує значно вищу якість ведення технологічного процесу порівняно з

базовою структурою. Вона гарантує стабілізацію температури тіста незалежно від різких змін навантаження (подачі компонентів), повністю відповідає регламентним зонам та мінімізує ймовірність браку продукції через перегрів. Досягнутий ступінь підвищення динамічної точності дозволяє рекомендувати розроблену структуру САР до практичної реалізації (програмно-логічного забезпечення та апаратної побудови).

4. КОНКРЕТИЗАЦІЯ ЗАДАЧІ І РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЧНОГО ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ДІЛЯНКОЮ.

4.1. Аналіз існуючого рівня реалізації функцій логічного керування технологічним агрегатом та модернізація комплексу технічних засобів для автоматизації цих функцій

4.1.1. Аналіз існуючого рівня реалізації функцій логічного керування

Для двокамерного тістомісильного агрегату безперервної дії, що розглядається у кваліфікаційній роботі, крім задач автоматичного регулювання температури та технологічного навантаження, необхідною складовою системи керування є реалізація функцій логічного керування. До них належать технологічний пуск агрегату, технологічна зупинка, контроль готовності до пуску, а також блокування розвитку передаварійних і аварійних ситуацій.

На існуючому рівні функція логічного керування агрегатом зазвичай реалізується оператором послідовно, шляхом ручного керування окремими виконавчими механізмами, або на базі жорсткої релейно-контакторної логіки без централізованої координації всіх операцій. Така організація керування призводить до залежності якості пуску й зупинки від дій персоналу, збільшує імовірність порушення правильної послідовності ввімкнення механізмів і не забезпечує достатньої гнучкості при реалізації блокувань.

Отже, модернізація системи логічного керування повинна забезпечити:

- попередню перевірку готовності агрегату до роботи;
- автоматичне виконання технологічного пуску у заданій послідовності;
- автоматичне виконання технологічної зупинки із спорожненням робочих камер;
- блокування пуску при відсутності хоча б одного з компонентів;
- реакцію на позаштатні ситуації шляхом переходу в безпечний стан.

4.1.2. Опис процедур технологічного пуску, технологічної зупинки та аварійної зупинки

Технологічний пуск агрегату повинен виконуватись лише за умови готовності всіх основних вузлів і наявності необхідної сировини. Перед початком пуску перевіряється заповнення витратних ємностей E1–E5. Якщо хоча б один із сигналів рівня вказує на відсутність необхідного запасу сировини, запуск забороняється. Після підтвердження готовності включається попереджувальна звукова сигналізація, витримується встановлена пауза, після чого послідовно запускаються виконавчі механізми та відкриваються подаючі органи.

Технологічна зупинка повинна виконуватися у зворотній послідовності порівняно з пуском і бути спрямованою на запобігання накопиченню тіста всередині агрегату. Спочатку припиняється подача сировинних компонентів, далі зупиняються окремі механізми після досягнення мінімально допустимого рівня продукту в камерах. Це дозволяє забезпечити контрольоване спорожнення агрегату і виключити утворення заторів.

Аварійна зупинка повинна спрацьовувати при натисканні кнопки аварійного зупину, при зникненні критично важливих сигналів стану або при виникненні передаварійної ситуації. У цьому випадку система повинна негайно перевести агрегат у безпечний стан: вимкнути приводи, закрити засувки та клапани подачі, зафіксувати аварійний стан і заборонити повторний пуск до усунення причини аварії.

4.2. Формалізація регламентів функціонування технологічного агрегату при технологічному пуску, технологічній зупинці та аварійній зупинці у вигляді блок-схем та їх опис

4.2.1. Конкретизація логічних змінних, керуючих впливів і станів агрегату

Для побудови системи логічного керування виділимо вхідні логічні змінні, що характеризують стан агрегату та умови його функціонування, а також вихідні логічні керуючі впливи.

До вхідних логічних змінних належать:

- сигнали контролю наявності сировини у ємностях E1–E5;
- команда «Пуск»;
- команда «Стоп»;
- сигнал аварії;
- сигнали мінімального рівня продукту в окремих зонах агрегату при виконанні зупинки.

До вихідних керуючих впливів належать:

- команда на ввімкнення звукової сигналізації;
- команди на ввімкнення електродвигунів M1, M2, M3, M4;
- команди на відкриття засувки Z1;
- команди на відкриття клапанів KL1, KL2, KL3, KL4;
- команди на закриття засувки Z2, Z3, Z4 при зупинці;
- команда на зупинку приводів при аварії.

Станами агрегату в межах логічного керування є:

- очікування готовності;
- передпускова підготовка;
- технологічний пуск;
- робочий режим;
- технологічна зупинка;
- аварійна зупинка.

4.2.2. Обґрунтування принципу побудови підсистеми логічного керування

Підсистема логічного керування для даного технологічного агрегату повинна будуватися за комбінованим принципом. Частина команд формується у жорстко визначеній часовій послідовності, наприклад включення звукової сигналізації та витримка часу перед запуском механізмів. Інша частина формується за наявності підтверджуючих сигналів стану, наприклад за сигналами готовності за рівнем сировини або мінімального рівня продукту при зупинці.

4.2.3. Формалізація регламенту технологічного пуску

Технологічний пуск агрегату починається з перевірки наявності необхідного запасу сировини у всіх п'яти витратних ємностях. Послідовно контролюються умови достатнього рівня у бункері борошна E1, баках розчину солі E2, розчину цукру E3, жиру E4 та опари E5. За відсутності хоча б одного з необхідних компонентів виконання алгоритму пуску забороняється, і система залишається в режимі очікування.

Після підтвердження готовності подається попереджувальна звукова сигналізація. Її призначенням є інформування персоналу про перехід агрегату до автоматичного режиму запуску. Після подачі сигналізації витримується пауза тривалістю 10 с.

Далі звукова сигналізація вимикається та формується команда на запуск електродвигуна M2. Після цього витримується пауза 20 с, необхідна для стабілізації початкового режиму переміщення маси в агрегаті.

На наступному етапі включається електродвигун M3, після чого витримується ще одна пауза 20 с. Далі формується команда на ввімкнення електродвигуна M1 на 60 % номінальної швидкості. Після запуску приводу відкривається засувка Z1, а потім одночасно відкриваються клапани KL2, KL3 і KL4, що забезпечують подачу рідких компонентів.

Завершальним етапом пуску є включення електродвигуна M4 та відкриття клапана KL1 для подачі опари. Після цього агрегат переходить у штатний робочий режим.

4.2.4. Формалізація регламенту технологічної зупинки

Після надходження команди на зупинку система спочатку перевіряє умови її виконання. Після підтвердження допустимості зупинки включається звукова сигналізація і витримується пауза 10 с для попередження персоналу.

Після закінчення паузи звукова сигналізація вимикається. Далі закривається подача компонентів, після чого зупиняються електродвигуни M1 та M4. На наступному етапі закривається засувка Z2.

Після цього система очікує, доки рівень продукту в першій контрольованій зоні не досягне мінімального значення. Лише після надходження відповідного сигналу зупиняється двигун М2 та закривається засувка Z3.

Далі система контролює досягнення мінімального рівня у другій зоні. Після отримання цього сигналу зупиняється двигун М3, витримується пауза 5 с і закривається засувка Z4. Після завершення зазначених дій технологічний агрегат переходить у стан зупинки.

Такий алгоритм реалізує принцип контрольованого спорожнення камер і запобігає залишенню продукту в робочих зонах агрегату, що особливо важливо для харчового обладнання.

4.2.5. Формалізація блокувань передаварійних ситуацій та аварійної зупинки

У випадку передаварійної ситуації система повинна заблокувати подальше виконання алгоритму, зберегти поточний безпечний стан і видати повідомлення оператору.

До передаварійних ситуацій для даного агрегату доцільно віднести:

- відсутність сировини хоча б в одній із витратних ємностей;
- спрацювання аварійної кнопки.

У випадку аварійної ситуації має реалізовуватись аварійна зупинка, яка передбачає негайне вимкнення приводів, припинення подачі компонентів, закриття керованих засувок і переведення агрегату у безпечний стан з заборonoю повторного пуску до скидання аварії.

4.3. Розробка алгоритмів автоматичного керування технологічним агрегатом у вигляді блок-схем та їх опис

На основі сформованих регламентів розроблено блок-схеми алгоритмів автоматичного керування технологічним пуском, технологічною зупинкою та аварійною зупинкою агрегату. Вони відображають послідовність формування та видачі керуючих дій на технологічний агрегат для кожного з етапів його функціонування.

Блок-схема алгоритму пуску, наведена на рис. 4.1, містить:

- перевірку рівнів у ємностях E1–E5;
- включення попереджувальної сигналізації;
- часові затримки 10 с і 20 с;
- послідовне ввімкнення M2, M3, M1, M4;
- послідовне відкриття Z1, KL2, KL3, KL4 і KL1.

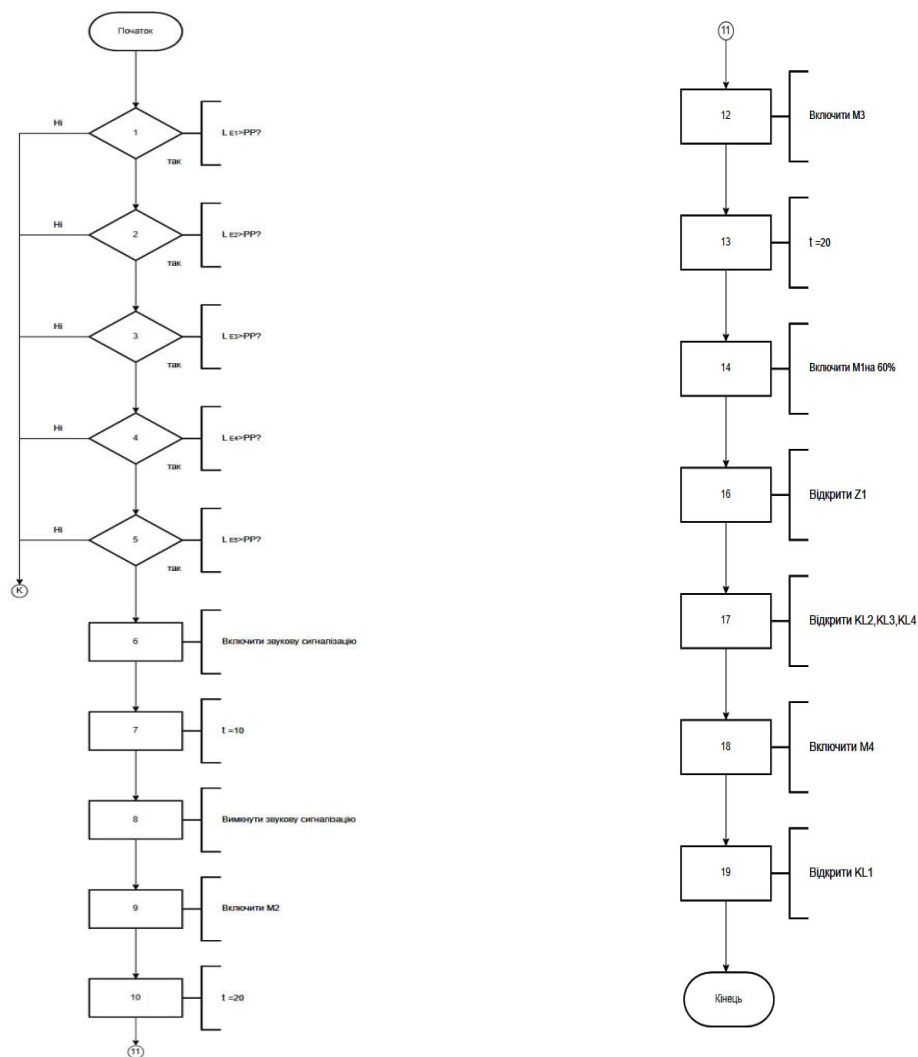


Рис. 4.1 – Блок-схема алгоритму управління пуском ділянки в роботу

Блок-схема алгоритму зупинки, наведена на рис. 4.2, містить:

- подачу попереджувального сигналу;
- відключення подачі компонентів;
- зупинку M1 і M4;

- закриття Z2;
- контроль мінімального рівня у відповідних зонах;
- зупинку M2 і M3;
- закриття Z3 і Z4.

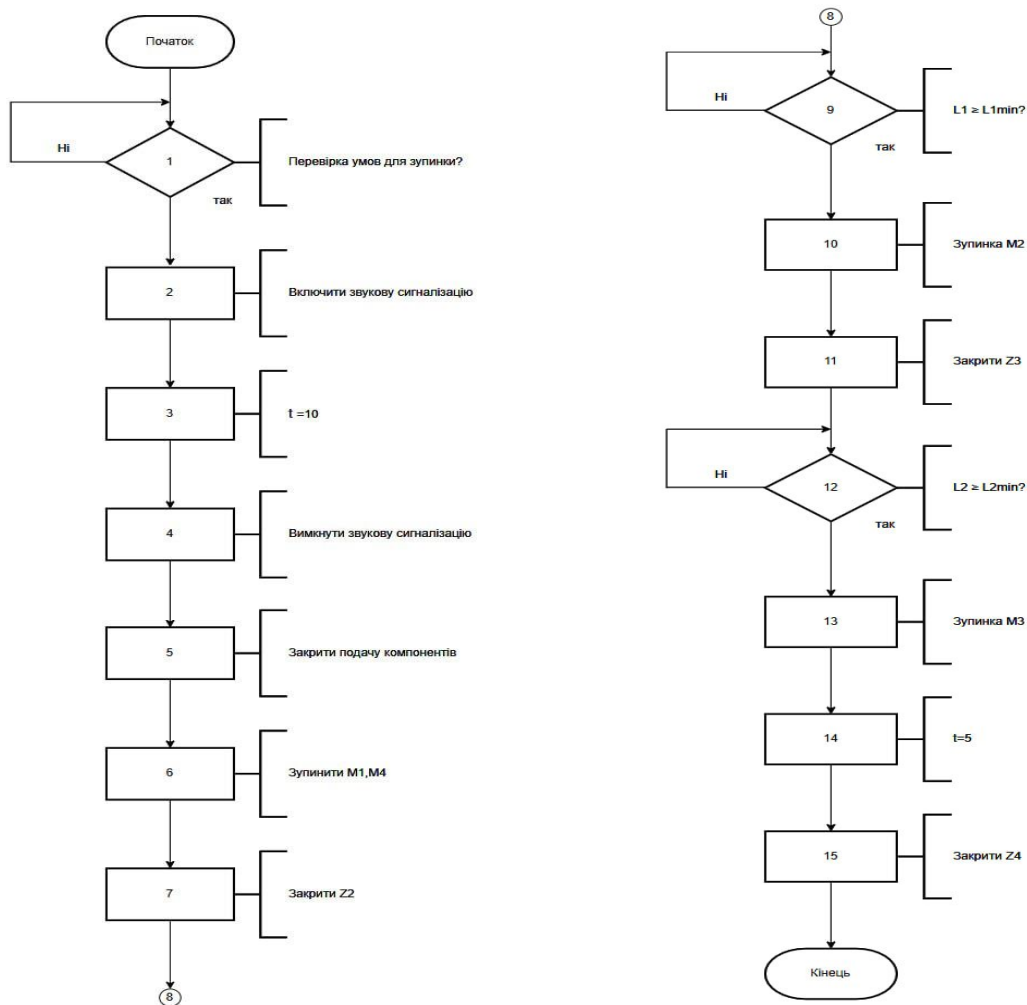


Рис. 4.2 – Алгоритм технологічної зупинки тістомісильної машини

Блок-схема аварійної зупинки, наведена на рис. 4.3, передбачає:

- миттєве припинення подачі сировини;
- знеструмлення приводів;
- закриття засувок і клапанів;
- формування сигналу аварії;
- переведення системи у стан блокування повторного пуску.

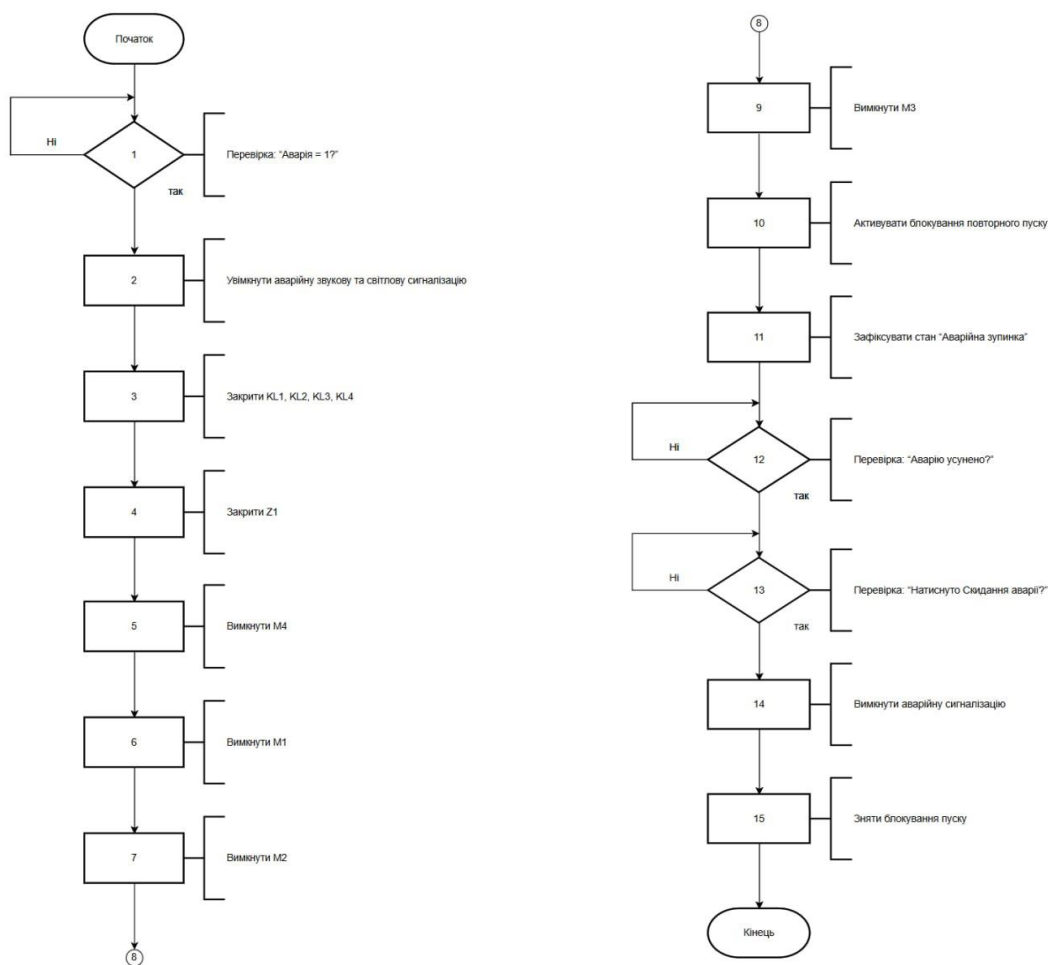


Рис. 4.3 – Алгоритм аварійної зупинки тістомісильної машини

4.4. Розробка функціональної логічної схеми процесу керування технологічним агрегатом та її детальний опис

4.4.1. Розробка функціональної логічної схеми керування об'єктом

Функціональна логічна схема (ФЛС) процесу керування тістомісильним агрегатом розроблена з метою реалізації алгоритмів технологічного пуску, технологічної зупинки та аварійної зупинки на базі програмованого логічного контролера.

ФЛС побудована із використанням типових символічних позначень логічних елементів, зокрема AND, OR, NOT, RS-тригерів та таймерів, що забезпечують формування дискретних керуючих сигналів відповідно до розроблених алгоритмів.

До складу вхідних сигналів ФЛС входять:

- сигнали рівня сировини у ємностях E1–E5;
- команда «Пуск»;
- команда «Стоп»;
- сигнал «Аварія»;
- сигнали мінімального рівня продукту в контрольованих зонах.

Вихідними сигналами є:

- команди керування електроприводами M1–M4;
- команди керування засувками Z1–Z4;
- команди керування клапанами KL1–KL4;
- сигнал попереджувальної та аварійної сигналізації;
- сигнал блокування повторного пуску.

ФЛС реалізує наступні режими роботи:

- режим готовності до пуску;
- режим технологічного пуску;
- режим роботи;
- режим технологічної зупинки;
- режим аварійної зупинки.

4.4.2. Детальний опис функціональної логічної схеми керування об'єктом

Розроблена функціональна логічна схема реалізує алгоритми технологічного пуску, технологічної зупинки та аварійної зупинки тістомісильного агрегату на основі використання типових логічних елементів і відповідає вимогам до побудови систем логічного керування.

На першому етапі формується сигнал готовності до пуску. Для цього використовується логічний елемент AND, який об'єднує сигнали рівня у витратних ємностях E1–E5. При наявності сировини у всіх ємностях формується сигнал дозволу. Додатково цей сигнал проходить через інверсію сигналу аварії (логічний елемент NOT), що виключає можливість запуску при наявності аварійної ситуації.

Отриманий сигнал готовності комбінується з командою «Пуск» за допомогою логічного елемента AND, формуючи сигнал запуску. Цей сигнал записується у RS-тригер, який забезпечує фіксацію режиму пуску та утримання стану до надходження команди «Стоп».

Після активації тригера формується керуючий сигнал на включення попереджувальної сигналізації. Для забезпечення витримки часу використовується таймер затримки (Transport Delay), який реалізує паузу перед запуском агрегату.

Після завершення витримки часу формується сигнал переходу в режим роботи, який також реалізується через RS-тригер. Далі за допомогою послідовності таймерів формуються сигнали керування виконавчими механізмами:

- послідовний запуск електродвигунів M2, M3, M1 та M4;
- відкриття засувки Z1;
- відкриття клапанів KL2, KL3, KL4;
- відкриття клапана KL1.

Часові затримки між увімкненням механізмів забезпечують коректну роботу технологічного процесу та запобігають перевантаженню обладнання. У моделі ці затримки реалізовані за допомогою блоків Transport Delay.

Режим технологічної зупинки активується при надходженні сигналу «Стоп», який через логічний елемент NOT скидає RS-тригери. У результаті припиняється формування керуючих сигналів, закриваються клапани подачі компонентів, а двигуни зупиняються у визначеній послідовності. Подальші дії виконуються з урахуванням сигналів мінімального рівня, що забезпечує контрольоване спорожнення агрегату.

Аварійна зупинка має найвищий пріоритет у системі керування. При появі сигналу «Аварія» формується логічний сигнал, який через елемент OR впливає на всі гілки керування. У результаті:

- скидаються RS-тригери режиму пуску та роботи;
- вимикаються всі електроприводи M1–M4;

- припиняється подача компонентів;
- активується аварійна сигналізація;
- встановлюється блокування повторного пуску.

Сигнал аварійного блокування зберігається до моменту усунення причини аварії та подачі команди «Скидання», що забезпечує безпечну експлуатацію агрегату.

Таким чином, розроблена функціональна логічна схема забезпечує реалізацію всіх необхідних режимів роботи технологічного агрегату, контроль правильності виконання операцій, захист від аварійних ситуацій та підвищення надійності функціонування системи автоматичного керування.

4.5. Імітаційне моделювання системи логічного керування

4.5.1. Розробка моделі в середовищі MatLab/Simulink

Для перевірки працездатності розробленої функціональної логічної схеми було створено імітаційну модель у середовищі MatLab/Simulink. Схема моделювання наведена на рисунку 4.4.

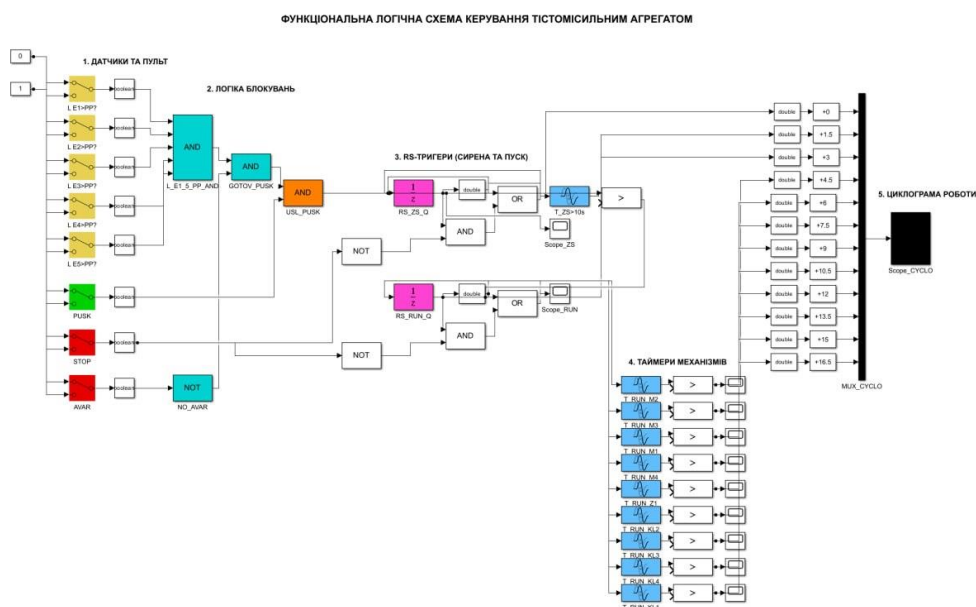


Рис. 4.4 – Схема імітаційного моделювання системи логічного керування в середовищі MatLab/Simulink

Модель побудована з використанням стандартних бібліотечних елементів Simulink:

- логічних операторів (AND, OR, NOT);
- тригерів (Unit Delay);
- блоків затримки часу (Transport Delay);
- блоків перемикання (Manual Switch);
- блоків візуалізації (Scope).

Модель реалізує формування сигналів пуску, зупинки та аварійного відключення, а також керування виконавчими механізмами агрегату.

Слід зазначити, що в даному розділі моделюється система логічного керування, яка оперує дискретними сигналами. На відміну від контурів автоматичного регулювання, де використовуються моделі каналів регулювання та параметри налаштування регуляторів.

У даній моделі логічного керування використано результати попередніх розділів опосередковано: часові параметри, допустимі режими, умови спрацювання блокувань та регламентовані значення визначено на основі раніше отриманих моделей каналів і результатів синтезу регуляторів. Безперервна частина САР і дискретна логіка розглядаються в узгодженому комплексі.

4.5.2. Проведення комп'ютерних експериментів

У процесі моделювання були проведені комп'ютерні експерименти для перевірки роботи алгоритмів логічного керування.

У першому експерименті досліджувався процес технологічного пуску агрегату. При подачі сигналу «Пуск» та наявності всіх необхідних компонентів було отримано правильну послідовність включення виконавчих механізмів із дотриманням заданих часових затримок.

У другому експерименті моделювався процес технологічної зупинки. При подачі сигналу «Стоп» відбувалося коректне вимкнення обладнання у визначеній послідовності.

У третьому експерименті досліджувалася аварійна ситуація. При активації сигналу «Аварія» відбувалося негайне вимкнення виконавчих механізмів, активація сигналізації та блокування повторного пуску.

Результати експериментів підтвердили працездатність розроблених алгоритмів.

4.5.3. Аналіз результатів моделювання

Результати моделювання представлені у вигляді часових діаграм (рис. 4.5), що відображають зміну станів керуючих сигналів у процесі роботи системи.

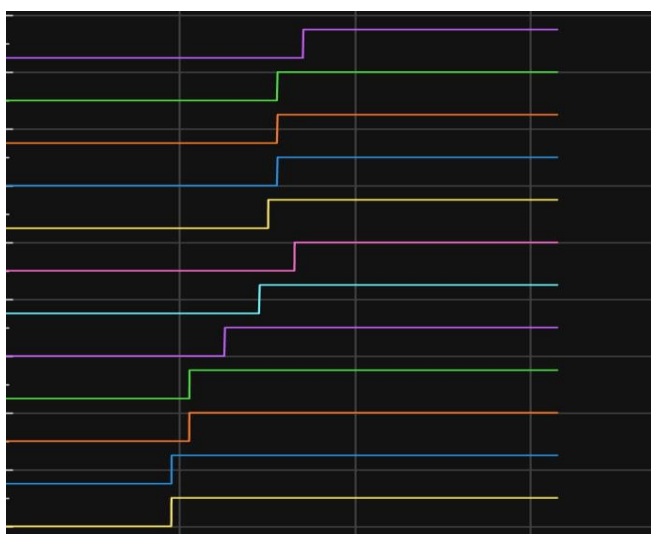


Рис. 4.5 – Часові діаграми роботи системи логічного керування

На циклограмі показано часову послідовність увімкнення логічних сигналів під час запуску обладнання:

- сигнали керування електродвигунами;
- сигнали керування клапанами;
- сигнали пуску, зупинки та аварії;
- логічні стани системи.

Часова вісь подана у секундах. Кожен сигнал візуально винесено на окремий рівень ("драбинка"), що дозволяє чітко бачити моменти активації. Спочатку формується умова USL_PUSK, потім вмикається ZS (передпускова сирена), а після завершення таймера — основний сигнал RUN. Далі з відповідними затримками активуються M2, M3, M1, M4, Z1, KL2–KL4 та KL1.

Аналіз отриманих результатів показує, що:

- забезпечується правильна послідовність керування;
- дотримуються часові інтервали;
- система коректно реагує на позаштатні ситуації.

Отже, циклограма відображає логіку роботи системи у часі та підтверджує правильність роботи алгоритму пуску.

4.5.4 Розробка моделі роботизованої ділянки у середовищі CoppeliaSim Edu

На Рис. 4.6 (а) наведено блок-схему алгоритму послідовного логічного керування маніпулятором UR5 під час виконання технологічної операції завантаження.

Після отримання команди на пуск, алгоритм виводить маніпулятор у безпечну стартову позицію (блок 1). Далі генерується траєкторія переміщення до зони видачі касети з інгредієнтами (блок 2). У блоках 3 та 4 реалізовано розроблений метод двоступеневого захоплення: спочатку подається команда на змикання кінцевого ефектора з номінальним зусиллям (блок 3), а після контакту з об'єктом система переходить у режим "м'якого" утримання (Soft Hold, блок 4), що знижує струм на двигунах захоплювача та знижує ризик вібрацій.

Надійно зафіксувавши вантаж, робот виконує його підйом на безпечну висоту (блок 5) та транспортування по заданій дузі до приймального шлюзу тістомісильного агрегату (блок 6). Після точного позиціювання захоплювач відкривається для гравітаційного вивантаження сировини (блок 7). Цикл завершується автоматичним поверненням маніпулятора в режим очікування (блок 8) для готовності до обробки наступної касети.

На Рис. 4.6 (б) наведено блок-схему алгоритму безпеки (Fail-Safe), який функціонує як паралельний фоновий процес під час роботи системи.

Алгоритм починається з циклічного опитування стану системи (блок 1), під час якого ПЛК перевіряє наявність зв'язку, стан сервоприводів та сигнали від сканерів безпеки. У блоці 2 відбувається логічна перевірка: якщо помилок не виявлено, система продовжує моніторинг. У разі виникнення критичної

події (наприклад, натискання кнопки E-STOP або перевантаження), алгоритм перериває нормальний цикл і виконує миттєве обнулення швидкостей усіх осей маніпулятора (блок 3). Для запобігання падінню вантажу на осі накладаються електромагнітні гальма (блок 4), після чого на НМІ-панель оператора виводиться тривожне повідомлення (блок 5).

Система залишається у заблокованому стані (цикл блоку 6), доки оператор не усуне причину аварії та не подасть команду на скидання помилки (Reset). Після отримання підтвердження гальма знімаються (блок 7), і система переходить у режим очікування нового пуску (блок 8).

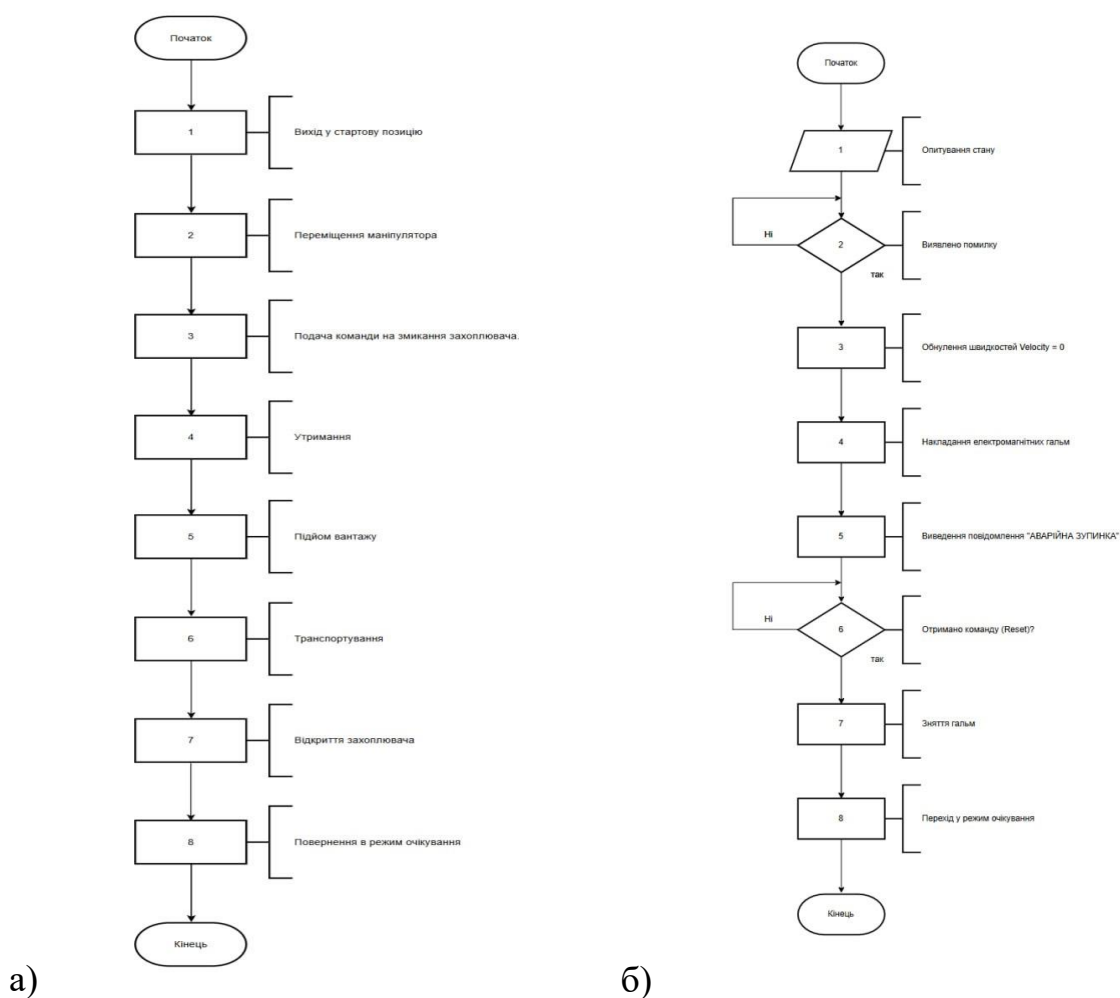


Рис. 4.6 – Блок-схема алгоритму а) нормального технологічного циклу завантаження інгредієнтів; б) блокування передаварійних ситуацій та аварійної зупинки роботизованого комплексу

4.5.5 Перевірка імітації процесу переміщення у тривимірному просторі робочого органу робота

Для верифікації розроблених алгоритмів та перевірки надійності системних блокувань було побудовано функціональну логічну схему (ФЛС) керування роботизованим комплексом у програмному середовищі MATLAB/Simulink (Рис. 4.7).

Схема реалізована за модульним принципом і складається з наступних функціональних блоків:

Пульти оператора та датчики: імітація входних дискретних сигналів (кнопки пуску/зупинки, кнопка аварійної зупинки E-STOP та датчик наявності касети з інгредієнтами).

Логіка блокування та захисту: система логічних вентилів (AND, NOT), яка апаратно забороняє пуск системи у разі відсутності тари або активного сигналу аварії.

RS-тригер циклу (RUN): реалізований на базі блоку Unit Delay, що забезпечує «самопідхоплення» сигналу пуску та утримання системи в робочому режимі до надходження команди зупинки.

Формування таймінгів: каскад блоків транспортного запізнення (Transport Delay), які відлічують технологічний час від моменту старту циклу.

Етапи алгоритму: логічні компаратори, що формують чіткі прямокутні імпульси для кожного етапу руху маніпулятора (Підхід, Захоплення, Підйом, Транспортування тощо).



Рис. 4.7 – Функціональна логічна схема (ФЛС) керування роботизованою ділянкою в середовищі MATLAB/Simulink

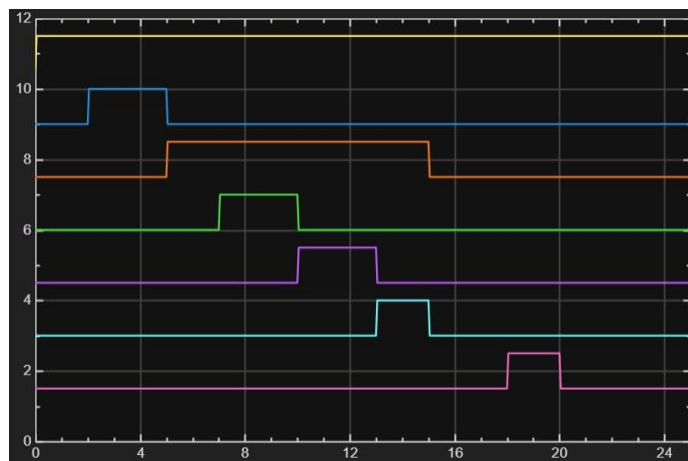


Рис. 4.8 – Циклограма узгодженої роботи сервоприводів маніпулятора та захоплювача

Результатом роботи функціональної логічної схеми є генерація керуючих імпульсів, які подаються на контролер маніпулятора UR5. Для візуалізації часової послідовності виконання операцій було побудовано циклограму роботи системи (Рис. 4.8).

Як видно з отриманого графіка, найвищий (жовтий) рівень відображає загальний стан активності технологічного циклу (STATE_RUN). Наступні графіки демонструють послідовне вмикання етапів переміщення робочого органу. Особливу увагу приділено безпеці транспортування вантажу: помаранчева лінія (сигнал STEP_2_GRIP_CLOSE_AND_HOLD) ілюструє роботу кінцевого ефектора. З циклограми чітко видно, що сигнал на утримання об'єкта (закриття захвату) активується на 5-й секунді і залишається безперервним (активним) протягом фаз підйому, транспортування та опускання, аж до моменту безпечного вивантаження на 15-й секунді.

Дана циклограма підтверджує відсутність логічних колізій в алгоритмі та гарантує, що розмикання захвату не відбудеться під час руху маніпулятора.

Висновки за розділом:

Проведено аналіз існуючого рівня автоматизації тістомісильного агрегату, який виявив необхідність модернізації логічного керування шляхом впровадження промислового маніпулятора для завантаження

мікроінгредієнтів. Це дозволяє мінімізувати вплив людського фактору та забезпечити стабільність рецептури.

На основі експлуатаційних інструкцій розроблено та формалізовано регламенти технологічного пуску, нормальної зупинки та аварійного блокування. Складені блок-схеми алгоритмів дозволили чітко визначити послідовність ввімкнення виконавчих механізмів (M1–M4, Z1–Z4, KL1–KL4) з урахуванням необхідних часових затримок для стабілізації процесу.

Розроблено функціональну логічну схему (ФЛС) у середовищі MATLAB/Simulink, яка реалізує комбінований принцип керування (жорстка часова послідовність у поєднанні із замкнутою логікою контролю готовності). Отримана каскадна циклограма підтвердила повну узгодженість роботи сервоприводів маніпулятора та запірної арматури агрегату.

Побудовано цифровий двійник роботизованої ділянки в середовищі CoppeliaSim. Комп'ютерні експерименти показали надійне транспортування об'єктів у 3D-просторі.

Розроблено сучасний Web-SCADA, який виконує функції пульта навчання (Teach). Реалізована можливість прямого редагування JSON та калібрування об'єктів за шістьма ступенями вільності, що підвищує гнучкість переналагодження системи під нові види сировини.

Отже, результати імітаційного моделювання розроблених алгоритмів повністю відповідають реальним технологічним процесам у обраній ділянці приготування тіста. Моделі демонструють високу кінематичну адекватність, чітке дотримання часових регламентів та надійність систем безпеки, що підтверджує доцільність впровадження запропонованої структури логічного керування на реальному виробництві.

5. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗМІННИ ПРОЦЕСУ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ, РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ СТРУКТУРИ КОНТРОЛЕРНО-КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ.

5.1. Характеристики середовищ, з якими взаємодіють засоби автоматизації й обслуговуючий персонал, які повинні бути враховані при виборі технічних засобів і місць їх розміщення

5.1.1. Перелік та характеристики технологічних середовищ

У процесі приготування тіста технічні засоби автоматизації (ТЗА) та виконавчі механізми безпосередньо контактують із трьома основними видами середовищ. Аналіз їх фізико-хімічних властивостей дозволяє сформулювати вимоги до матеріалів та конструктивного виконання засобів вимірювальної техніки:

- Борошно (сипке дисперсне середовище)

Параметри контролю: рівень у бункері (дозування).

Характеристики: транспортується у закритих системах, , тому запиленість у робочій зоні мінімізовано; схильне до злежування, утворення склепінь у бункерах та налипання. У зволоженому стані борошняний пил стає струмопровідним.

Вплив на вибір ТЗА: вимагає застосування датчиків, стійких до значних механічних навантажень від маси продукту та гладкими поверхнями для запобігання застряганню.

- Рідкі компоненти (опара, розчини солі та цукру, жир)

Параметри контролю: рівень у витратних ємностях, температура, дозування.

Характеристики: висока електропровідність, хімічна активність (корозійна дія сольового розчину), змінна в'язкість (для жирів при зміні температури).

Вплив на вибір ТЗА: необхідне використання матеріалів, стійких до хімічної корозії (нержавіюча сталь харчових марок AISI 304/316) та ущільнень, стійких до жирів.

- Тісто (в'язко-пластичне середовище)

Параметри контролю: температура тіста (θ), навантаження на привід (P_a).

Характеристики: висока динамічна в'язкість (до 1000 Па·с), значна адгезія (липкість), пружність, відсутність здатності до вільного розтікання.

Вплив на вибір ТЗА: значний механічний опір вимагає використання потужних виконавчих механізмів. Схильність до налипання вимагає використання полірованих поверхонь датчиків для забезпечення точності вимірювань та легкості санітарної обробки.

5.1.2. Характеристика виробничих приміщень та класифікація умов експлуатації

Для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу та надійної роботи ТЗА проведено класифікацію тістоприготувального відділення згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та ДНАОП 0.00-1.32-01.

Технічні засоби автоматизації розміщуються у виробничому приміщенні, умови експлуатації якого характеризуються наступними параметрами:

- Мікроклімат та фізичні фактори:

Температура повітря: +18...+35 °С (приміщення класифікується як жарке).

Відносна вологість: 60–80 % (підвищена). Під час санітарної обробки обладнання можливе утворення конденсату та пряме потрапляння бризок води на ТЗА.

Запиленість: можлива присутність борошняного пилу у зоні приймального шлюзу.

Механічні впливи: Вібрація технологічного обладнання.

Електробезпека: Наявність струмопровідної підлоги (керамічна плитка, бетон) та заземлених металевих конструкцій.

- Класифікація приміщення згідно з ДНАОП 0.00-1.32-01 та ПУЕ

За характером середовища: Приміщення вологе.

За електробезпекою: приміщення з підвищеною небезпекою (через наявність підвищеної вологості та струмопровідної керамічної/бетонної підлоги).

За пожежовибухонебезпекою: пожежонебезпечна зона відсутня (за умови відсутності відкритого зберігання горючої тари). Клас зони — нормальна.

На основі цієї класифікації тістоприготувального відділення та, згідно з вимогами ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», який затверджено Наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 21.06.2001 р. № 272, «ПРАВИЛ УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК», затверджено Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476, встановлено вимоги до ТЗА:

Таблиця 4.7. Допустимий рівень вибухозахисту і ступінь захисту оболонки електричних машин (стаціонарних і пересувних) у залежності від класу вибухонебезпечної зони

Клас вибухонебезпечної зони	Рівень вибухозахисту і ступінь захисту
0	Особливо вибухобезпечне електрообладнання
1	Вибухобезпечне електрообладнання
2	Підвищеної надійності проти вибуху
20	Особливо вибухобезпечне і вибухобезпечне електрообладнання (за умови дотримання вимог п. 4.6.9)
21	Вибухобезпечне електрообладнання (за умови дотримання вимог п. 4.6.9)
22	Без засобів вибухозахисту (за умови дотримання вимог п. 4.6.9). Ступінь захисту IP 54 Частини машин, що дають іскріння (наприклад, контактні кільця), повинні бути замкнені в оболонку зі ступенем захисту IP 54

Рис. 5.1 – Вибір електрообладнання для роботи у вибухонебезпечних зонах згідно вимогам ДНАОП 0.00-1.32-01

Отже, враховуючи специфіку харчового виробництва, а саме, необхідність вологого прибирання та захист від проникнення дрібнодисперсного борошняного пилу. Та, на забезпечення відповідності вимогам ПУЕ (Правила улаштування електроустановок, зокрема Розділ 2 та 5) та стандарту ДСТУ EN 60529:2018 (Ступені захисту, що забезпечуються кожухами – код IP) нижче наведено вимоги до захисту.

1. Визначення нормативних вимог до ступеня захисту (IP)

Згідно з умовами експлуатації в тістоприготувальному відділенні (вологість, борошняний пил, можливість миття струменем води), встановлюються наступні мінімальні вимоги:

- Зона технологічного процесу (безпосередньо біля агрегату):

Вимога: IP65 (6 — повний захист від пилу, 5 — захист від струменів води з будь-якого напрямку).

Обґрунтування: Борошняний пил є струмопровідним при зволоженні, тому його потрапляння всередину приладів неприпустиме (п. 2.1 ПУЕ).

- Шафа керування (Операторська/Електрощитова):

Вимога: IP54 (5 — захист від пилу, 4 — захист від бризок) або IP20 (якщо приміщення чисте, сухе і з кондиціонуванням).

Обґрунтування: Захист електроніки від випадкового дотику та осідання пилу.

5.2. Вибір технічних засобів збору інформації про хід технологічного процесу і стан обладнання

5.2.1. Перелік параметрів контролю та вимоги до вимірювальних засобів

На основі аналізу технологічного регламенту приготування тіста визначено перелік параметрів, що підлягають автоматичному контролю, реєстрації та регулюванню. Для кожного параметра підібрано відповідний діапазон вимірювання з урахуванням фізичних меж процесу та похибки (Таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Метрологічні характеристики та межі контролю ТП

Найменування параметра	Позначення	Номинальне значення (Setpoint)	Робочий діапазон контролю	Необхідний діапазон датчика	Необхідна точність
Температура тіста	θ	29 °C	+18 ... +40 °C	-50 ... +150 °C	$\pm 0,5$ °C
Потужність	P_a	4,0 кВт	0 ... 5,5 кВт	0 ... 10 кВт	$\pm 1,5$ %

Положення зсувок	u_1, u_2	Змінне	0 ... 100 %	0 ... 100 %	$\pm 1,0$ %
Рівень (борошно/ рідини)	L	Норма	Дискретний (Max)	IP66	—
Час дозування	t	За рецептом	0 ... 600 сек	—	$\pm 0,1$ сек

5.2.2. Розподіл представлення інформації користувачу

Для забезпечення ефективного керування та безпеки персоналу інформація про хід процесу розподіляється за трьома рівнями:

1. На робочому місці оператора (АРМ / Панель TP1900 Comfort)

Візуалізація: Повна мнемосхема агрегату з індикацією стану всіх двигунів, клапанів та рівнів у ємностях.

Реєстрація та тренди: Виведення графіків температури (θ) та потужності (P_a) у реальному часі. Це необхідно для аналізу динамічної точності системи.

Керування: Введення заданих значень (Setpoints) для регуляторів та дистанційне керування виконавчими механізмами.

Сигналізація: Текстові повідомлення про критичні відхилення параметрів та аварії обладнання.

2. «За місцем» (безпосередньо біля агрегату)

Світлова індикація: Світлодіоди на головках датчиків рівня (LVS/LVL) та температури (TS300). Дозволяють персоналу візуально оцінити стан заповнення ємностей при обході.

Кнопки безпеки: Органи аварійної зупинки (SIRIUS 3SU1). Розташовані в зоні досяжності оператора для миттєвої зупинки приводів у разі механічної небезпеки.

3. Спеціальні пункти (Шафа керування)

Діагностика ПЛК: Вбудований дисплей процесора S7-1500 для перегляду помилок мережі PROFINET та стану модулів вводу-виводу.

Локальна індикація живлення: Вольтметри та світлові індикатори наявності фаз на ввідній панелі шафи.

Обґрунтування: Такий розподіл дозволяє оператору зосередитись на технологічній якості продукту через АРМ, одночасно забезпечуючи персоналу в цеху можливість швидкої реакції на локальні несправності або небезпечні ситуації.

5.2.3. Вибір типів датчиків та перетворювачів

З урахуванням жорстких санітарних вимог та наявності вібрацій, технічні засоби збору інформації обрано з промислової лінійки Siemens SITRANS:

Для контролю рівня борошна обрано вібраційний датчик Siemens SITRANS LVS200, оскільки він спеціально розроблений для сипучих матеріалів з низькою щільністю та має функцію самоочищення за рахунок вібрації вилки.



Рис. 5.2 – Зовнішній вигляд вібраційного сигналізатора рівня Siemens SITRANS LVS200

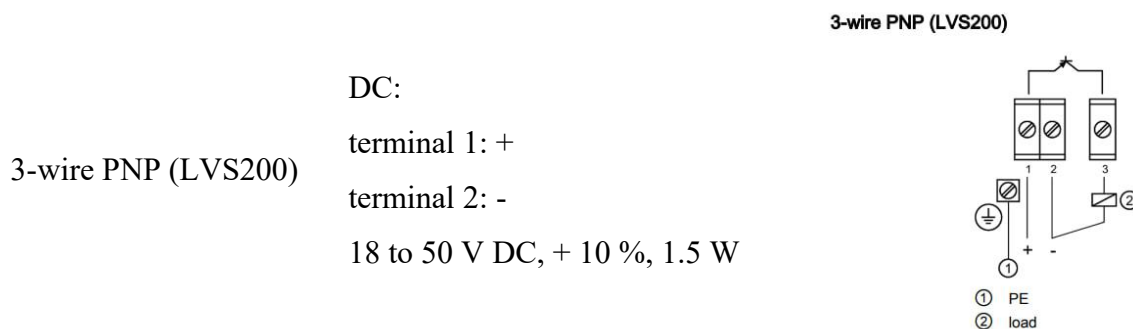


Рис. 5.3. – Електрична схема підключення датчика LVS200 (3-провідна, PNP)

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики SITRANS LVS200

Параметр	Характеристика
Принцип вимірювання	Вібраційний (tuning fork)
Матеріал корпусу	Литий алюміній з порошковим покриттям (IP66/IP67)
Матеріал вилки	Нержавіюча сталь 316Ti (1.4581) — харчовий допуск
Тип виходу (обраний)	3-wire PNP (транзисторний ключ)
Напруга живлення	18 ... 50 V DC
Мінімальна густина борошна	Від 20 г/л (підходить для дуже легкого борошна)
Максимальний тиск	до 10 bar
Затримка сигналу	~ 1 секунда (покриття), 1-2 сек (звільнення)
Клас захисту	Типе 4X / IP66 / IP67 (повний захист від пилу)

Для розчину солі, цукру, жиру та опари обрано LVL200S у гігієнічному виконанні. Його вилка стійка до налипання в'язких середовищ (опара) та корозії (соляний розчин).



Рис.5.4. – Зовнішній вигляд Siemens SITRANS LVL200S

Для інтеграції сигналізаторів рівня з мікропроцесорною системою керування обрано модифікацію з транзисторним виходом типу PNP action (рис. 5.5). Дана схема є галузевим стандартом для контролерів серії SIMATIC S7-1500, оскільки забезпечує роботу входу в режимі "Sourcing" (очікування позитивного сигналу +24В)

- Output
 - Floating transistor output, permanently shortcircuit-proof
 - Load current
 - < 400 mA
 - Voltage loss
 - < 1 V
 - Switching voltage
 - < 55 V DC
 - Blocking curr
 - < 10 μ A
- Transistor (NPN/PNP)
10 ... 55 V DC

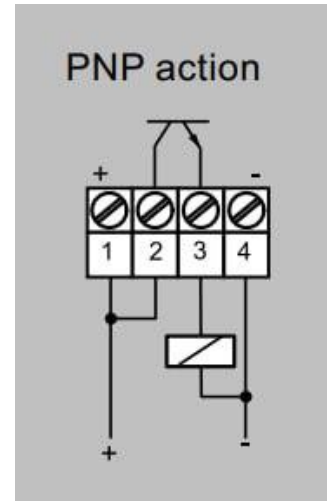


Рис. 5.5. – Схема електрична підключення датчика SITRANS LVL200S (транзисторний вихід, логіка PNP).

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики SITRANS LVL200S

Параметр	Характеристика
Принцип вимірювання	П'єзоелектрична вібрація (~ 1200 Гц)
Точність (повторюваність)	0.1 мм (висока точність відсічки)
Матеріал деталей у продукті	Нержавіюча сталь 316L (Ra < 0.8 мкм)
Тип виходу (обраний)	Transistor (PNP) 10 ... 55 V DC
Захист виходу	Постійний захист від короткого замикання
Час спрацювання	~ 500 мс (висока швидкодія для клапанів)
Гігієнічність	Наявність сертифікату EHEDG (для харчової пром.)
Струм навантаження	до 400 мА (дозволяє керувати проміжним реле)

Вибір моделей LVS200 та LVL200 з транзисторними виходами PNP забезпечує пряму інтеграцію з обраною архітектурою Siemens S7-1500 без використання додаткових узгоджувальних пристроїв, що підвищує надійність системи та спрощує монтажні роботи.

Для вимірювання температури тіста обрано датчик серії SITRANS TS300 (виконання Clamp-on), що призначений для харчової промисловості.



Рис. 5.6. – Зовнішній вигляд датчика температури Siemens SITRANS TS300 у гігієнічному виконанні.

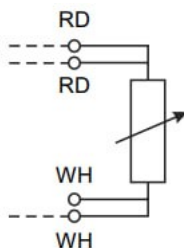


Рис. 5.7. – Схема підключення термометра опору Pt100 за трьохпровідною схемою.

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики SITRANS TS300

Параметр	Значення (згідно з інструкцією)
Виробник / Серія	Siemens / SITRANS TS (TS100/TS200/TS300/TS500)
Тип сенсора	Термометр опору Pt100 (RTD)
Температура зберігання	-40 ... +80 °C
Ступінь захисту	IP54 – IP68 (залежно від монтажу)
Матеріал гільзи	Нержавіюча сталь (AISI 316L / 1.4404)
Маркування вибухозахисту	0Ex ia IIC T6...T1 Ga X (для іскробезпечних кіл)
Моменти затяжки (M20)	5,0 Нм (пластик/метал)

Вибір датчика Siemens SITRANS TS обумовлений його відповідністю санітарно-гігієнічним нормам ($R_a < 0.8$ мкм), можливістю роботи в умовах сильної вібрації (з використанням зовнішніх опор при довжині >150 мм) та високим ступенем захисту IP67/68, що дозволяє проводити регулярну CIP-мийку агрегату.

Для керування швидкістю електродвигунів змішувача та шнека обрано частотний перетворювач серії SINAMICS G120C (рис. 5.8). Даний пристрій забезпечує плавний пуск, точне регулювання моменту та передачу даних про споживану потужність (P_a) у контролер через протокол зв'язку.



Рис. 5.8. – Зовнішній вигляд компактного частотного перетворювача Siemens SINAMICS G120C з панеллю оператора.

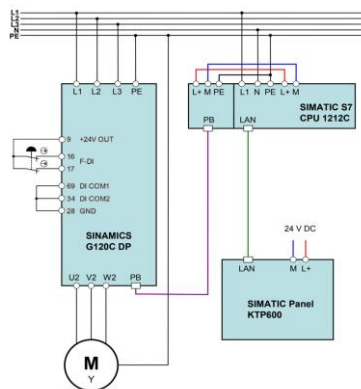


Рис. 5.9. – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра та мережевої інтеграції компонентів САК

Таблиця 5.5 – Основні технічні характеристики частотного перетворювача SINAMICS G120C (6SL3210-1KE14-3UC1)

Параметр	Значення / Характеристика
Кількість фаз та напруга мережі	3 АС, 380 ... 480 В (+10% / -20%)
Номінальна потужність (LO / NO)	1,50 кВт / 1,10 кВт
Номінальний вихідний струм (LO / NO)	4,10 А / 3,10 А
Максимальний вихідний струм	6,20 А
Частота мережі	47 ... 63 Гц

ККД (η) та коефіцієнт потужності ($\cos \varphi_0 \cos \varphi$)	0,97 / 0,95
Методи циклового керування	V/f (лінійне/квадратичне/ECO), векторне без датчика (SLVC)
Цифрові входи (стандартні / безпеки)	6 стандартних / 1 Fail-safe
Цифрові виходи (реле / транзистор)	1 релейний / 1 транзисторний (DC 30В, 0,5А)
Аналоговий вхід / Аналоговий вихід	1 диференціальний (10 біт) / 1 неізолюваний
Інтерфейс температурного датчика	1 вхід (PTC, КТУ або Thermo-Click)
Ступінь захисту оболонки	IP20 / UL Open Type
Типорозмір корпусу	FSA (компактний)
Робоча температура навколишнього середовища	-10 ... +40 °C
Габаритні розміри (Ш x В x Г)	73 x 196 x 203 мм
Маса пристрою	1,70 кг

Частотний перетворювач SINAMICS G120C типорозміру FSA забезпечує високу питому потужність при компактних габаритах. Обрана конфігурація дозволяє реалізувати векторне керування приводом без використання датчика швидкості, що підвищує надійність системи змішування тіста. Ступінь захисту IP20 передбачає обов'язкове встановлення пристрою в електротехнічну шафу керування, що було обґрунтовано в розділі проектування технічного забезпечення.

Усі обрані датчики серії SITRANS мають вбудовані інтелектуальні модулі нормування сигналу, що дозволяє передавати дані безпосередньо на контролер без використання додаткових проміжних блоків. Це підвищує надійність системи та зменшує похибку вимірювання за рахунок відсутності зайвих ланок перетворення.

5.2.4. Обґрунтування необхідності підвищення точності вимірювальних каналів

Канали вимірювання температури тіста (θ) та потужності (P_a) є критичними для контурів ПІД-регулювання (особливо при роботі компенсатора перехресних зв'язків). Високочастотні перешкоди від роботи

частотних перетворювачів потужних приводів та нерівномірність падіння шматків тіста створюють значний "шум" у вимірювальному сигналі.

Для забезпечення стабільності розробленої САР прийнято комбіноване (апаратно-алгоритмічне) рішення щодо підвищення точності:

Апаратний шлях: Використання екранованого кабелю типу FTP/LiYCY для аналогових ланцюгів (Pt100) з одностороннім заземленням екрану в шафі ПЛК (для уникнення струмів зрівнювання). Модуль аналогового вводу має вбудовану апаратну фільтрацію (придушення завад 50 Гц до 40 дБ).

Алгоритмічний шлях: Оскільки датчик P_a (вбудований у частотний перетворювач) видає сильно зашумлений сигнал (що підтверджено у Розділі 2 при ідентифікації моделі збурень f_1), у програмному коді ПЛК на вході регулятора реалізується цифровий фільтр ковзного середнього (Moving Average Filter) першого порядку. Це математичне забезпечення дозволяє згладити флуктуації потужності без внесення значного фазового запізнення в контур керування.

5.3. Вибір технічних засобів реалізації керуючих дій на технологічний процес і керування обладнанням

5.3.1. Обґрунтування і вибір типів регулюючих органів

Реалізація керуючих впливів у контурах регулювання технологічного навантаження (P_a) та температури (θ) здійснюється шляхом зміни прохідного перерізу на виході з робочих камер агрегату (керуючі впливи u_1 та u_2).

Враховуючи фізико-механічні характеристики регульованого середовища (тісто має високу динамічну в'язкість, яскраво виражену адгезію та схильність до полімеризації при застої), використання класичних регулюючих клапанів (сідельних, поворотних батерфляїв) є технологічно неприпустимим через неминуче забивання прохідного перерізу.

Для даного об'єкта в якості регулюючих органів обрано шибєрні ножові засувки (Knife gate valves) гігієнічного виконання.

Ніж засувки виготовлено з полірованої нержавіючої сталі, що зменшує тертя та налипання продукту. Конструкція забезпечує "самоочищення" при закритті та зріз потоку тіста.



Рис. 5.10. – Загальний вигляд засувки

Умовний прохід (DN) шиберів приймається рівним діаметру вивантажувальних патрубків камер змішування та пластифікації (наприклад, DN150 та DN200). Ніж засувки виготовляється з полірованої нержавіючої сталі AISI 316L, що забезпечує ефект "самоочищення" та зрізання густого потоку тіста під час зміни положення без ризику заклинювання.

Для автоматизації вузлів (KL1–KL4) дозування рідких та високов'язких компонентів (водно-сольовий розчин, цукровий сироп, розтоплений жир та дріжджова опара) до запірної арматури висуваються жорсткі санітарно-гігієнічні та експлуатаційні вимоги. Використання стандартних електромагнітних (соленоїдних) клапанів у даному технологічному процесі є недоцільним через високий ризик заклинювання штока у в'язкому середовищі, наявність застійних зон та небезпеку виникнення гідроударів при різкому перекритті магістралей.

Для вирішення цього завдання обрано модульне рішення від виробника промислової арматури Bürkert (Німеччина), що складається з санітарного дискового затвора Type 2671 та електричного поворотного приводу Type 3005.

Регулюючий (запірний) орган – Bürkert Type 2671 являє собою повнопрохідний дисковий затвор («метелик»), корпус і робочий диск якого виготовлені з високоякісної нержавіючої сталі AISI 316L. Конструкція арматури не має внутрішніх порожнин (застійних зон), що забезпечує ідеальні

умови для проведення регулярної автоматичної безрозбірної мийки (CIP-мийка) та відповідає суворим стандартам харчової безпеки (НАССР).



Рис. 5.11. – Санітарний повнопрохідний дисковий затвор Bürkert Type 2671
(вузли подачі рідких інгредієнтів KL1–KL4)

5.3.2. Вибір типів виконавчих механізмів

Відповідно до технологічних вимог та розробленої концепції системи автоматичного керування (САК), міжзонні шибери Z3 та Z4 відіграють ключову роль у процесі інтенсивного замісу тіста. Вони функціонують у замкнутих контурах ПІ- та ПІД-регулювання, стабілізуючи відповідно споживану потужність головного приводу (P_a) та кінцеву температуру тістової маси (θ).

Зважаючи на необхідність постійної, безперервної зміни положення робочого органу (від 0 до 100%) з високою динамічною точністю, використання стандартної запірної арматури або пневматичних циліндрів без зворотного зв'язку є технологічно неприпустимим.

Для вирішення даної задачі обрано прямохідні інтелектуальні електроприводи AUMA (Німеччина). Комплектація виконавчого механізму включає три базові модулі:

1. Багатооборотний привід SAR 07.2 – спеціалізована серія для роботи в режимі безперервного регулювання (Modulating duty, Клас C за стандартом EN 15714-2).
2. Лінійний модуль LE 12.1 – механічний перетворювач, що трансформує обертальний рух приводу у потужний поступальний

(прямолінійний) рух штока шибера для подолання опору високов'язкого тіста.

3. Блок керування AUMATIC AC 01.2 – мікропроцесорний модуль із вбудованим аналоговим позиціонером та абсолютним енкодером.

Для дискретних шиберів Z1, Z2 (режим ON/OFF) обрано приводи AUMA моделі SA 07.2 + LE 12.1 (AUMA NORM), що дозволить вбудувати кінцеві вимикачі безпосередньо в корпус приводу.

Дане рішення дозволило повністю виключити використання пневматичних ліній на ділянці та забезпечити ідеальну апаратну базу для реалізації алгоритмів автономної САР.



Рис. 5.12. – Загальний вигляд прямохідного електроприводу AUMA серії SAR/LE з інтелектуальним блоком керування AUMATIC AC

Тип	Діапазон ходу	Зусилля		Відповідний багатообертовий привід	
	макс. [мм]	макс. [кН]	для моменту регулювання [кН]	Режим Відкрити-Закрити	Режим регулювання
LE 12.1	50	11,5	6	SA 07.2	SAR 07.2
	100				
	200				
	400				
	500				

Рис. 5.13. – Технічні характеристики виконавчого механізму AUMA SAR 07.2 + LE 12.1 + AC 01.2

Для інших електроприводів тістоприготувального агрегату обрано уніфіковану лінійку трифазних асинхронних електродвигунів Siemens

SIMOTICS SD (Severe Duty, серія 1LE15) (Табл. 5.6). Поставка виконується у зборі з редукторами (SIMOGEAR Stainless Steel).

Таблиця 5.6 – Лінійка трифазних асинхронних електродвигунів Siemens

Позиція в САК	Призначення	Потужність, кВт	Типорозмір	Номінальний струм (А)	Вага, кг
М1	Шнек дозатора борошна	1,1	90 S	2,5	23,0
М2	Привід змішувача (Камера 1)	5,5	132 S	11,3	61,0
М3	Привід замісу (Камера 2)	7,5	132 M	14,7	75,0
М4	Насос подачі опари	2,2	100 L	4,65	32,0

Вибір чавунного виконання обґрунтований його високою механічною міцністю, здатністю ефективно гасити вібрації при замісі густого тіста та чудовим тепловідведенням. Для відповідності санітарним нормам харчового виробництва (НАССР) двигуни замовляються зі спеціальним епоксидним покриттям та ступенем захисту IP55/IP66.

У таблиці 5.7 наведено зведені параметри для основних приводів агрегату згідно з технічним каталогом Siemens.

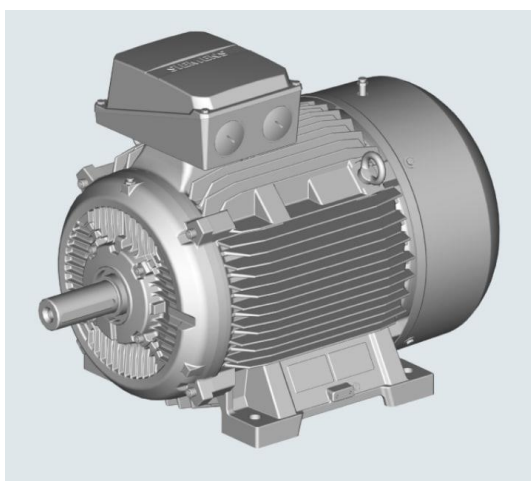


Рис. 5.14. – Зовнішній вигляд електродвигуна серії SIMOTICS SD (1LE15)

Таблиця 5.7 – Технічні характеристики електродвигунів SIMOTICS SD
1LE15 (Клас IE2)

Параметр	Значення (згідно з каталогом)
Серія	SIMOTICS SD (Severe Duty) 1LE7
Стандарти	EN / IEC 60034-1, IS 12615
Діапазон робочих температур	-20 °C до +50 °C
Номінальна потужність	11 кВт
Висота встановлення над рівнем моря	до 1000 м
Ступінь захисту	IP65 (захист від пилу та бризок води)
Клас ізоляції	F (стійкість до нагрівання до 155 °C)
Тип підшипників	Роликові, термін служби $\geq 50\,000$ годин
Балансування	Динамічне, з напівшпонкою (Half-key)
Конструкція корпусу	Чавун або алюміній (залежно від габариту)
Вентиляція	Зовнішнє охолодження (IC 411)

Для керування дисковим затвором застосовано чвертьоборотний електродвигунний привід (Виконавчий механізм – Bürkert Type 3005). Його використання гарантує плавне перекриття потоку (час ходу 10–12 с), що повністю виключає явище гідравлічного удару. Привід оснащений потужним редуктором (момент 25 Нм), який забезпечує гарантоване зрізання густого потоку опари або застигаючого жиру.

Керування приводом здійснюється дискретним сигналом 24 В DC від модуля DO контролера S7-1500. Всередині корпусу приводу штатно встановлені механічні кінцеві вимикачі, які забезпечують апаратний зворотний зв'язок (сигнали «Відкрито»/«Закрито») на модулі DI контролера.

Для забезпечення вимог безпеки (Fail-Safe) привід оснащений опційним модулем резервного живлення BSR (Battery Safe Return). У випадку аварійного знеструмлення цеху привід використовує накопичену енергію для автоматичного переведення засувки в закрите положення, що унеможливорює втрату або неконтрольований вилив сировини.



Рис. 5.15. – Електричний поворотний привід Bürkert Type 3005 (вузли подачі рідких інгредієнтів KL1–KL4)

5.3.3. Вибір марки і типорозміру робота та його робочого органу

Для автоматизації завантаження мікроінгредієнтів (ділянка, логіка якої змодельована в Розділі 4) обрано 6-осьовий колаборативний робот-маніпулятор Universal Robots UR5e.

Обґрунтування: Вантажопідйомність робота становить 5 кг, що з двократним запасом перекриває масу касети з інгредієнтами (до 1-2 кг). Радіус робочої зони (Reach) становить 850 мм, що ідеально підходить для переміщення тари від конвеєра до приймального шлюзу агрегату без необхідності встановлення додаткових лінійних осей. Колаборативна природа (наявність вбудованих датчиків моменту на кожному шарнірі) дозволяє експлуатувати робота без встановлення громіздких захисних огорож у цеху.

Вибір кінцевого ефектора: Обрано електричний двопальцевий захоплювач OnRobot RG2. Він інтегрується безпосередньо у фланець UR5e і керується цифровими сигналами. Вибір обґрунтований можливістю реалізації розробленого у попередньому розділі алгоритму «Soft Hold» (м'яке утримання із заданим зусиллям у Ньютонах), що унеможливорює пошкодження касети з сировиною.

5.3.4. Вибір технічних засобів сполучення ПЗО контролера з виконавчими механізмами

Для узгодження низькострумових виходів пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО) програмованого логічного контролера S7-1500 з виконавчими механізмами агрегату обрано наступні апаратні рішення:

1. Сполучення з приводами клапанів (KL1–KL4) та шиберів (Z1, Z2)

Для керування електричними приводами дискових затворів (Bürkert) та дискретними шиберами (AUMA NORM), а також для захисту транзисторних виходів модуля DQ 16x24VDC обрано вузькопрофільні інтерфейсні реле Siemens SIRIUS 3RQ3018-1AB01.

Застосування реле серії 3RQ3 дозволяє реалізувати надійну 100% гальванічну розв'язку (до 4 кВ) між мікропроцесорним ядром ПЛК та зовнішніми виконавчими пристроями. Наявність вбудованого світлодіода (LED) на реле значно спрощує діагностику системи персоналом КВПіА, дозволяючи візуально контролювати проходження команди від контролера до приводу. Крім того, це забезпечує високу ремонтпридатність: у разі короткого замикання на зовнішній лінії вийде з ладу лише змінне реле, а не дорогий модуль ПЛК.

Основні параметри реле наведені у таблиці 5.8.



Рис. 5.16. – Зовнішній вигляд інтерфейсного реле Siemens SIRIUS 3RQ3

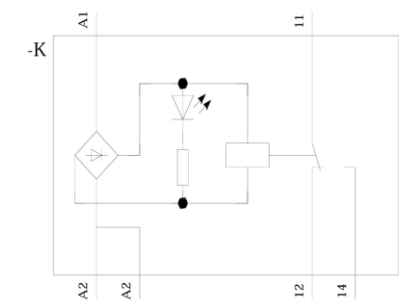


Рис. 5.17. – Внутрішня електрична схема реле 3RQ3018-1AB01

Таблиця 5.8 – Технічні характеристики реле Siemens 3RQ3018-1AB01

Параметр	Значення (згідно з каталогом)
Призначення	Вихідне сполучне реле (Coupling relay)
Напруга керування (Котушка)	24 В AC/DC (універсальна)
Тип вихідних контактів	1 перекидний контакт (1 CO - Changeover)
Матеріал контактів	AgSnO ₂ (стійкий до зварювання) з золоченням
Термічний струм (I _{th})	6 А (категорія DC-13: 1 А при 24В)
Механічний ресурс	10 000 000 циклів комутації
Габаритні розміри (ШхВхГ)	6,2 x 93 x 72,5 мм (ультратонкий дизайн)
Тип підключення	Гвинтові клеми
Індикація	Зелений світлодіод (LED) наявності живлення

2. Сполучення з головними електроприводами (M1–M4)

Для керування асинхронними електродвигунами агрегату застосовуються частотні перетворювачі Siemens SINAMICS G120C.

Оскільки дані пристрої підтримують сучасний мережевий обмін даними, їх сполучення з ПЛК виконується безпосередньо через промислову шину PROFINET. Це виключає необхідність використання проміжних контакторів, суттєво зменшує кількість кабельних ліній та апаратно підвищує надійність передачі керуючих впливів і діагностичних даних (струм, швидкість, помилки).

3. Технічні засоби контролю положення та безпеки

Оскільки кінцеві вимикачі шиберів (Z1–Z4) та клапанів (KL1–KL4) вже апаратно інтегровані в корпуси їхніх «розумних» електроприводів (AUMA та Bürkert), використання зовнішніх датчиків для них не потрібне.

Проте, для забезпечення підсистеми апаратного блокування (Safety Interlocks) – контролю закриття захисних кришок та ревізійних люків камер змішування – обрано зовнішні електромеханічні позиційні вимикачі Siemens SIRIUS 3SE5 у модульному виконанні.

Вимикачі забезпечують гарантоване розривання кола і подачу дискретних сигналів 24 В DC на входи контролера. У разі відкриття кришки агрегату, система миттєво зупиняє двигуни M2 та M3 для захисту персоналу.



Рис. 5.18. – Зовнішній вигляд модульних кінцевих вимикачів Siemens SIRIUS 3SE5

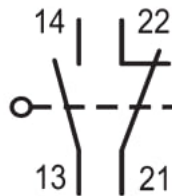


Рис. 5.19. – Схема розташування клем контактного блоку 1NO+1NC вимикача 3SE5

Основні параметри обраної конфігурації (металевий або пластиковий корпус) наведені у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Технічні характеристики кінцевих вимикачів SIRIUS 3SE5

Параметр	Значення (згідно з каталогом)
Призначення	Контроль положення механізмів (Position Switch)
Тип корпусу	Металевий або посилений пластик (Modular design)

Ступінь захисту оболонки	IP66 / IP67 (повний захист від пилу та води)
Робоча температура	-25 ... +85 °C
Конфігурація контактів	1 NO (нормально відкритий) + 1 NC (нормально закритий)
Принцип дії контактів	Миттєвої дії (Snap-action contacts)
Номинальна напруга ізоляції (U_i)	400 В
Робочий струм при 24 В DC (I_e)	3 А (категорія DC-13)
Механічний ресурс	15 000 000 циклів комутації
Тип приводу (головки)	Важіль з роликком (Roller lever) або Шток (Plunger)
Точність перемикавання	0,05 мм

5.4. Вибір альтернативних варіантів технічної структури і технічних засобів для реалізації контролерно-комп'ютерної мережі

5.4.1. Порівняльний аналіз принципів побудови технічної структури

Під час проектування розглядалися два класичних підходи до побудови апаратної мережі:

1. Розподілена структура

ПЛК знаходиться в головній щитовій, а безпосередньо на тістомісильному агрегаті встановлюються станції віддаленого вводу/виводу, об'єднані цифровою шиною. Такий підхід економить кабельну продукцію, але вимагає встановлення локальних шаф із високим ступенем захисту (IP65/67) для захисту модулів від вібрацій та миття під тиском, що суттєво здорожує проект.

2. Централізована структура

Усі модулі вводу/виводу (ПЗО) розташовані в єдиній шафі керування разом із центральним процесором, куди зводяться кабелі від усіх датчиків типу "точка-точка", а інтелектуальні пристрої (ПЧ, НМІ) підключаються по Ethernet.

Враховуючи відносну компактність тістомісильного відділення та жорсткі умови середовища біля агрегату (висока вологість, борошняний пил), обрано централізовану структуру збірної інформації та керування.

Усі модулі вводу-виводу розміщуються в єдиній шафі керування разом із ПЛК. Шафа встановлюється в зоні з нормальними умовами (операторська кімната) або має відповідний ступінь захисту (IP65) та систему вентиляції/клімат-контролю при встановленні в цеху.

Зв'язок з датчиками та виконавчими механізмами здійснюється за допомогою кабельних ліній, прокладених у захисних металевих лотках або трубах.

5.4.2. Аналіз та вибір програмованого логічного контролера

Вибір апаратних засобів для реалізації розроблених алгоритмів автоматичного та логічного керування базується на загальній кількості інформаційних та керуючих сигналів (Табл. 5.10).

Таблиця № 5.10 Список параметрів які вводяться і виводяться із контролера

№ з/п	Найменування параметру	Умове позначення	Вид сигналу (A/D)	Тип сигналу (I/O)	Діапазон сигналу на вході/виході	Позначення на схемі
1	Сигнал поточної потужності приводу M2	Pa	A	I	4–20 mA (0...10.0 кВт)	AI1
2	Сигнал поточної температури тіста (камера 2)	Tз	A	I	Pt100 / 4–20 mA	AI2
3	Сигнал аналогового зворотного зв'язку положення шибера Z3	Pos_Z3	A	I	4–20 mA (0...100 %)	AI3
4	Сигнал аналогового зворотного зв'язку положення шибера Z4	Pos_Z4	A	I	4–20 mA (0...100 %)	AI4
5	Керуючий сигнал на позиціонер приводу шибера Z3	U1_cmd	A	O	4–20 mA (0...100 %)	AO1
6	Керуючий сигнал на позиціонер приводу шибера Z4	U2_cmd	A	O	4–20 mA (0...100 %)	AO2
7	Команда на пуск частотного перетворювача дозатора борошна	M1_Start	D	O	Control Word (PROFINET)	—
8	Команда на пуск частотного перетворювача змішувача	M2_Start	D	O	Control Word (PROFINET)	—

9	Команда на пуск частотного перетворювача замісу	M3_Start	D	O	Control Word (PROFINET)	—
10	Команда на пуск частотного перетворювача насоса опари	M4_Start	D	O	Control Word (PROFINET)	—
11	Команда на відкриття шиберу бункера борошна Z1	Z1_Open	D	O	24 VDC	DO1
12	Команда на закриття шиберу бункера борошна Z1	Z1_Close	D	O	24 VDC	DO2
13	Команда на відкриття міжзонного шиберу Z2	Z2_Open	D	O	24 VDC	DO3
14	Команда на закриття міжзонного шиберу Z2	Z2_Close	D	O	24 VDC	DO4
15	Команда на керування клапана опари	KL1_Cmd	D	O	24 VDC	DO5
16	Команда на керування клапана солі	KL2_Cmd	D	O	24 VDC	DO6
17	Команда на керування клапана цукру	KL3_Cmd	D	O	24 VDC	DO7
18	Команда на керування клапана жиру	KL4_Cmd	D	O	24 VDC	DO8
19	Команда на вмикання світлозвукової аварійної сигналізації	Alarm_H	D	O	24 VDC	DO9
20	Сигнал досягнення верхнього рівня борошна	LSH1_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI1
21	Сигнал досягнення нижнього (мінімального) рівня борошна	LSL1_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI2
22	Сигнал досягнення верхнього рівня розчину солі	LSH2_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI3
23	Сигнал досягнення нижнього рівня розчину солі	LSL2_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI4
24	Сигнал досягнення верхнього рівня розчину цукру	LSH3_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI5
25	Сигнал досягнення нижнього рівня розчину цукру	LSL3_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI6
26	Сигнал досягнення верхнього рівня жиру	LSH4_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI7
27	Сигнал досягнення нижнього рівня жиру	LSL4_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI8
28	Сигнал досягнення верхнього рівня опари	LSH5_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI9
29	Сигнал досягнення нижнього рівня опари	LSL5_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI10
30	Сигнал кінцевого вимикача: шибер Z1 відкрито	Z1_Is_Open	D	I	24 VDC (PNP)	DI11
31	Сигнал кінцевого вимикача: шибер Z1 закрито	Z1_Is_Close	D	I	24 VDC (PNP)	DI12

32	Сигнал кінцевого вимикача: шибер Z2 відкрито	Z2_Is_Open	D	I	24 VDC (PNP)	DI13
33	Сигнал кінцевого вимикача: шибер Z2 закрито	Z2_Is_Close	D	I	24 VDC (PNP)	DI14
34	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL1 відкрито	KL1_Op_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI15
35	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL1 закрито	KL1_Cl_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI16
36	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL2 відкрито	KL2_Op_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI17
37	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL2 закрито	KL2_Cl_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI18
38	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL3 відкрито	KL3_Op_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI19
39	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL3 закрито	KL3_Cl_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI20
40	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL4 відкрито	KL4_Op_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI21
41	Сигнал кінцевого вимикача: клапана KL4 закрито	KL4_Cl_fb	D	I	24 VDC (PNP)	DI22
42	Сигнал помилки/перевантаження приводу M1	M1_Err	D	I	Status Word (PROFINET)	—
43	Сигнал помилки/перевантаження приводу M2	M2_Err	D	I	Status Word (PROFINET)	—
44	Сигнал помилки/перевантаження приводу M3	M3_Err	D	I	Status Word (PROFINET)	—
45	Сигнал помилки/перевантаження приводу M4	M4_Err	D	I	Status Word (PROFINET)	—
46	Сигнал загальної аварії приводу Z1	Z1_Fault	D	I	24 VDC (Реле AUMA)	DI23
47	Сигнал загальної аварії приводу Z2	Z2_Fault	D	I	24 VDC (Реле AUMA)	DI24
48	Сигнал загальної аварії приводу Z3	Z3_Fault	D	I	24 VDC (Реле AUMA)	DI25
49	Сигнал загальної аварії приводу Z4	Z4_Fault	D	I	24 VDC (Реле AUMA)	DI26
50	Сигнал від фізичної кнопки «ПУСК»	Cmd_Start	D	I	24 VDC (NO)	DI27
51	Сигнал від фізичної кнопки «СТОП»	Cmd_Stop	D	I	24 VDC (NC)	DI28
52	Сигнал від кнопки «Аварійна зупинка» (Грибок E-Stop)	E_Stop	D	I	24 VDC (NC)	DI29

Відповідно до таблиці параметрів технологічного процесу (Табл. 5.10), агрегат потребує обробки:

- 29 дискретних входів (DI),
- 9 дискретних виходів (DO),
- 4 аналогових входів (AI),
- 2 аналогових виходів (AO).

Для реалізації системи керування обрано сучасну апаратну платформу Siemens SIMATIC S7-1500, яка відповідає вимогам надійності та швидкодії.

Обрано центральний процесор CPU 1516-3 PN/DP загальний вигляд центрального процесора представлено на рисунку 5.20.



Рис. 5.20 – Центральний процесор CPU 1516-3 PN/DP

Архітектура обраного центрального процесора CPU 1516-3 PN/DP представлена на рисунку 5.21. Вона включає три незалежні комунікаційні інтерфейси (два PROFINET та один PROFIBUS), що дозволяє інтегрувати контролер у складні мережеві структури підприємства, а також слот для карти пам'яті SMC, яка зберігає програму та дані.

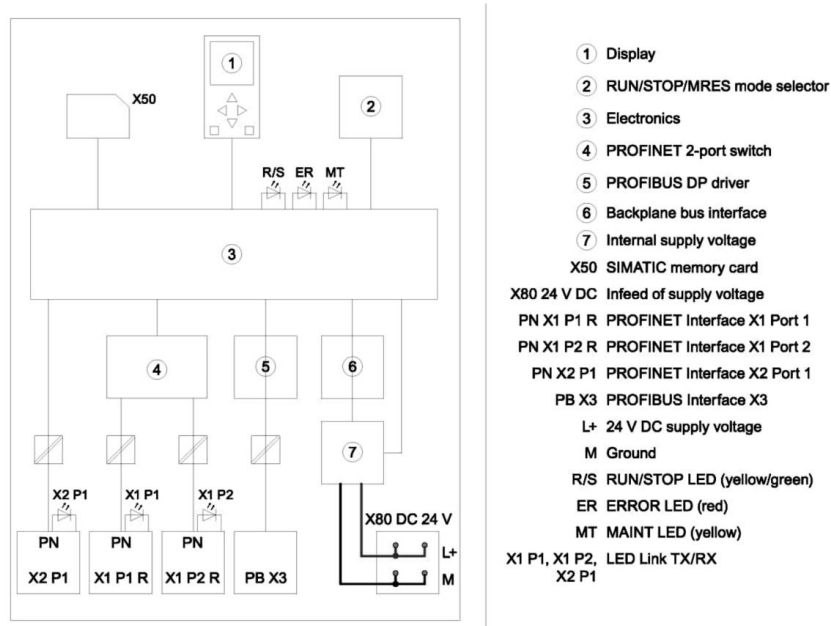


Рис. 5.21 – Блок-схема архітектури центрального процесора CPU 1516-3
PN/DP

1 – Display: Дисплей для відображення діагностичної інформації.

2 – RUN/STOP/MRES mode selector: Перемикач режимів роботи (Пуск/Стоп/Скидання).

3 – Electronics: Електронний модуль (процесорне ядро та пам'ять).

4 – PROFINET 2-port switch: Вбудований 2-портовий комутатор інтерфейсу PROFINET (X1).

5 – PROFIBUS DP driver: Драйвер інтерфейсу PROFIBUS DP (X3).

6 – Backplane bus interface: Інтерфейс внутрішньої шини (для зв'язку з модулями розширення).

7 – Internal supply voltage: Внутрішній перетворювач напруги.

X50 – SIMATIC memory card: Слот для карти пам'яті SIMATIC Memory Card.

X80 24 V DC: Роз'єм для підключення зовнішнього живлення 24 В постійного струму.

PN X1 P1 R / P2 R: Порти 1 та 2 інтерфейсу PROFINET (основний інтерфейс).

PN X2 P1: Порт додаткового інтерфейсу PROFINET (для розділення мереж).

PB X3: Порт інтерфейсу PROFIBUS DP.

L+, M: Клеми підключення живлення (+24В та Земля).

LEDs (R/S, ER, MT): Світлодіодні індикатори стану (Робота/Стоп, Помилка, Обслуговування).

Таблиця 5.11 – Технічні характеристики ЦП 1516-3 PN/DP

Параметр	Значення
Тип продукту	CPU 1516-3 PN/DP
Версія прошивки	V2.9
Інженерне середовище	STEP 7 TIA Portal (від V17)
Синхронізація такту	Підтримується (централізована та децентралізована)
Живлення	24 V DC (19.2–28.8 V), захист від переполюсування
Споживаний струм	≈0.85 A
Оперативна пам'ять	1 MB (програми) + 5 MB (дані)
Load memory	SIMATIC Memory Card до 32 GB
Час виконання операцій	Бітові – 10 ns, слова – 12 ns, fixed-point – 16 ns, float – 64 ns
Макс. кількість блоків	До 8000 (OB, FB, FC, DB, UDT)
Лічильники/таймери	S7 – до 2048; IEC – обмежено лише RAM
Адресний простір I/O	32 kB входи / 32 kB виходи
PROFINET інтерфейси	2 (вбудований switch)
PROFIBUS інтерфейс	1 (RS485)
Підтримка протоколів	PROFINET IO, PROFIBUS DP, TCP/IP, UDP, DHCP, DNS, SNMP, Modbus TCP
Industrial Ethernet	RJ45, 100 Mbps, автоузгодження
OPC UA	Client + Server (Data Access, Method Call)
Макс. з'єднань	До 256
Кількість PROFINET IO пристроїв	До 256
Час синхронізації	NTP, PROFINET, PROFIBUS
Motion Control	Підтримується (до ~2400 ресурсів)
PID-регулятори	PID Compact, PID 3Step, PID-Temp
Діагностика	Буфер діагностики, LED індикатори RUN/STOP, ERROR, MAINT
Температура експлуатації	0...60°C (горизонтально), 0...40°C (вертикально)
Температура зберігання	-40...70°C
Ступені захисту	Захист доступу, паролі, захист блоків
Мови програмування	KOP, FUP, AWL, SCL, GRAPH
Габарити	70 x 147 x 129 мм
Маса	≈845 г

Для збору інформації від дискретних датчиків (кінцеві вимикачі, кнопки, датчики рівня) використовується модуль дискретних входів DI 32x24VDC BA (6ES7521-1BL10-0AA0). Схема підключення зовнішніх кіл до модуля та його внутрішня структура наведені на рисунку 5.23.

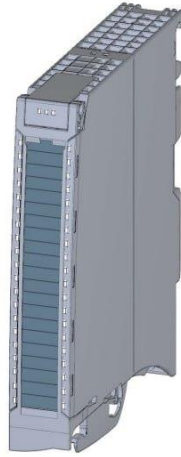


Рис. 5.22 – Модуль дискретних входів DI 32x24VDC BA (6ES7521-1BL10-0AA0)

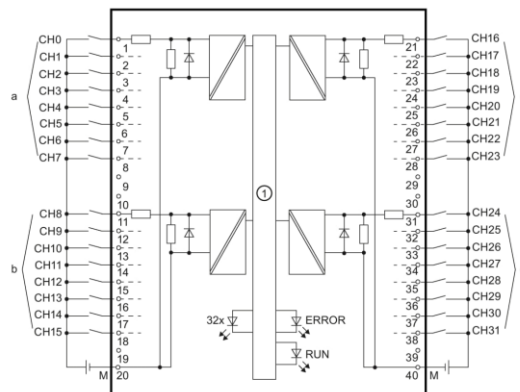


Рис. 5.23 – Схема підключення модуля дискретних входних сигналів

Таблиця 5.12 – Технічні характеристики модуля 6ES7521-1BL10-0AA0

Параметр	Значення
Тип виробу	DI 32x24VDC BA (32 цифрові входи, 24 В DC)
Версія апаратури	від FS01
Версія прошивки	V1.0.0 (оновлення можливе)
Дані ідентифікації I&M	Підтримка I&M0–I&M3
ПЗ для конфігурації	STEP 7 TIA Portal $\geq$ V13; STEP 7 $\geq$ V5.5 SP3
Мережі	PROFIBUS (GSD V1.0/V5.1), PROFINET (GSD V2.3)
Режим роботи	Цифрові входи (DI), MSI – так, лічильники – ні
Номінальна напруга живлення	24 В DC (діапазон 20.4–28.8 В)
Споживання потужності (шина)	1.05 Вт
Втрати потужності	$\approx$ 3 Вт

Кількість входів	32
Тип входу	Sinking (прийом струму / P-reading)
Стандарт входів	IEC 61131, тип 3
Рівні сигналу 0	-30...+5 В
Рівні сигналу 1	+11...+30 В
Струм входу (1)	≈ 2.7 мА
Затримка перемикавання	3–4 мс (0→1 та 1→0), не налаштовується
Макс. довжина кабелю	Екранований 1000 м; неекранований 600 м
Датчики	2-провідні, струм спокою ≤ 1.5 мА
Ізохронний режим	Ні
Діагностика/переривання	Не підтримуються
Індикація LED	RUN – зелений; ERROR – червоний; статус каналів – зелений
Електрична ізоляція	Між каналами і шиною – так (групами по 16); тест 707 В DC
Температура роботи (гориз.)	-30...+60 °С (від версії FS04)
Температура роботи (вертик.)	-30...+40 °С (від версії FS04)
Пріоритетний запуск	Так
Габарити (Ш×В×Г)	25 × 147 × 129 мм
Вага	≈ 260 г
Комплектація	40-контактний фронтальний push-in роз'єм

Для керування виконавчими механізмами, такими як котушки контакторів двигунів та соленоїди клапанів, використовується модуль виводу дискретних сигналів DQ 16x24VDC/0.5A (6ES7 522-1BH10-0AA0). Зовнішній вигляд модуля та принципова схема підключення навантаження показані на рисунку 5.24 та рисунку 5.25. Модуль забезпечує комутацію ланцюгів постійного струму напругою 24В з максимальним струмом до 0,5А на канал.

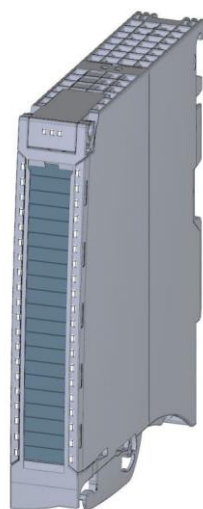


Рис. 5.24 – Модуль дискретних виходів DQ 16x24VDC/0.5A BA (6ES7522-1BH10-0AA0)

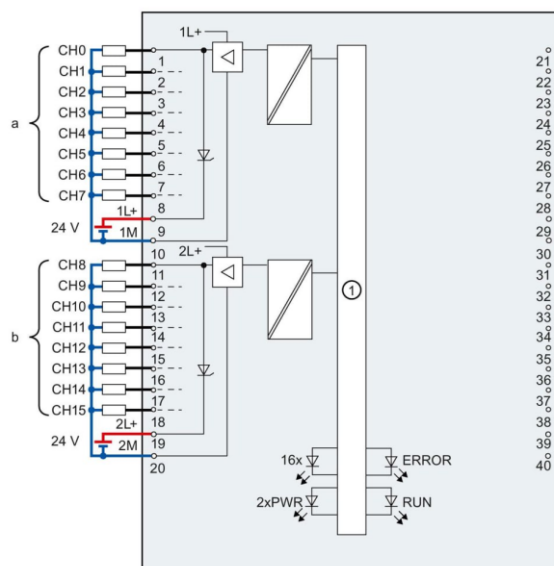


Рис. 5.25 – Схема підключення модуля дискретних вихідних сигналів

Таблиця 5.13 – Технічні характеристики SIEMENS 6ES7522-1BH10-0AA0

Параметр	Значення
Артикул	6ES7522-1BH10-0AA0
Тип модуля	DQ 16x24VDC/0.5A BA (16 цифрових виходів 24 В)
Живлення	24 В DC (20.4...28.8 В), захист від переполюсовки — є (групи до 7 А)
Споживання струму	до 30 мА
Кількість виходів	16 (sourcing, PNP)
Номинальний струм каналу	0.5 А на канал
Максимальний струм	4 А на групу, 8 А на модуль
Захисти	від короткого замикання, обмеження індуктивної перенапруги (-53 В)
Типи навантаження	резистивне до 0.5 А; лампове до 5 Вт
Залишковий струм (0)	до 0.5 мА
Час перемикання	0→1 до 100 мкс; 1→0 до 500 мкс
Частота комутації	100 Гц (резистивне), 10 Гц (лампи), 0.5 Гц (індуктивне)
Довжина кабелю	екранований до 1000 м; неекранований до 600 м
Діагностика	відсутня (лише індикація стану)
Світлодіоди	RUN (зелений), ERROR (червоний), PWR (зелений), статус каналів
Ізоляція	між каналами і шиною — є; випробування 707 В DC
Габарити	25 × 147 × 129 мм
Маса	≈230 г
Сумісність	STEP7 / TIA Portal, PROFINET, PROFIBUS
Комплект постачання	фронтальний роз'єм push-in на 40 контактів

Для збору інформації від аналогових датчиків (температури тіста, потужності двигуна, положення шибєрів тощо) обрано модуль AI

8xU/I/RTD/TC ST. Цей модуль має 8 універсальних входів з роздільною здатністю 16 біт, що дозволяє підключати як датчики струму 4-20 мА, так і термометри опору напряду. Зовнішній вигляд модуля наведено на рисунку 5.26.

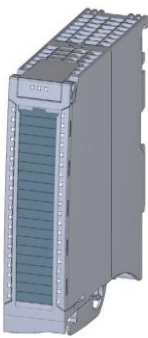


Рис. 5.26 – Модуль AI 8xU/I/RTD/TC ST (6ES7531-7KF00-0AB0)

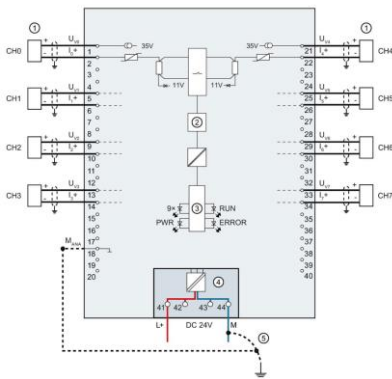


Рисунок 5.27 – Схема підключення 2-провідного датчика з виходом 4-20 мА до модуля AI 8xU/I/RTD/TC ST

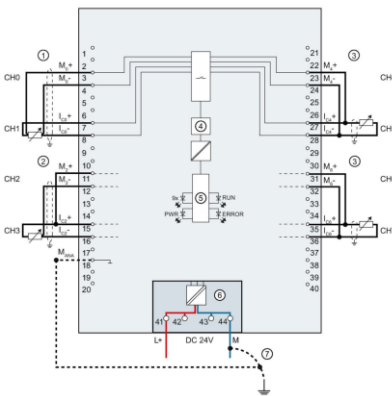


Рисунок 5.28 – Схема підключення 3-провідного термометра опору до модуля AI 8xU/I/RTD/TC ST

Таблиця 5.14 – Технічні характеристики SIEMENS 6ES7531-7KF00-0AB0

Параметр	Значення
Артикул	6ES7531-7KF00-0AB0

Тип модуля	AI 8xU/I/RTD/TC ST (8 аналогових входів: U, I, RTD, термопари)
Живлення	24 В DC (20.4...28.8 В), захист від переполюсовки — є
Споживання струму	до 240 мА при 24 В DC
Кількість входів	8 (струм, напруга, термопари), 4 — для RTD/опору
Діапазони струму	0...20 мА; 4...20 мА; ± 20 мА
Діапазони напруги	± 10 В; ± 5 В; ± 2.5 В; ± 1 В; 1...5 В; $\pm 500/250/80/50$ мВ
RTD (термометри опору)	Pt100, Pt200, Pt500, Pt1000; Ni100, Ni1000, LG-Ni1000
Термопари (TC)	Типи В, Е, J, К, N, R, S, Т; внутрішня/зовнішня компенсація холодного спаю
Роздільна здатність	16 біт (з урахуванням знака)
Час перетворення	$\approx 9...107$ мс (залежно від інтеграції 2.5/16.67/20/100 мс)
Похибка при 25 °C	$\approx \pm 0.1$ % (U/I/R); для RTD/TC — у межах типових К-значень
Придушення завад	50/60/400/10 Гц, до 40 дБ (послідовні), 60 дБ (загальні)
Діагностика	обрив проводу, переповнення/недоповнення, контроль живлення, аварійні повідомлення
Світлодіоди	RUN (зелений), ERROR (червоний), PWR (зелений), статус каналів
Ізоляція	між каналами і шиною/електронікою — є; випробування 707 В DC
Температура роботи	0...60 °C (горизонтально), 0...40 °C (вертикально)
Габарити	35 × 147 × 129 мм
Маса	≈ 310 г
Сумісність	STEP7 / TIA Portal, PROFINET, PROFIBUS; перепараметрування та калібрування в RUN

Для формування керуючих сигналів на частотні перетворювачі приводів дозування компонентів та сервоприводи регулюючих шибєрів обрано модуль аналогових виходів AQ 4xU/I ST. Модуль має 4 канали виводу з роздільною здатністю 16 біт. Він підтримує програмне налаштування типу вихідного сигналу (струм 4...20 мА) індивідуально для кожного каналу, що забезпечує гнучкість при підключенні різних типів виконавчих пристроїв. Зовнішній вигляд модуля представлено на рисунку 5.29.



Рисунок 5.29 – Модуль AQ 4xU/I ST (6ES7532-5HD00-0AB0)

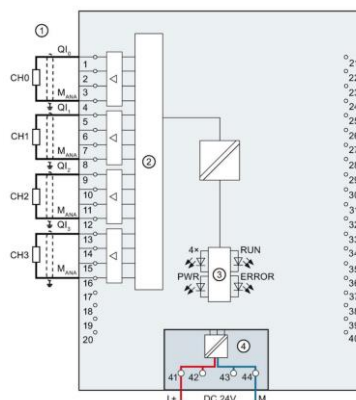


Рисунок 5.30 – Схема підключення зовнішніх кіл до модуля аналогових виходів AQ 4xU/I ST

Таблиця 5.15 – Технічні характеристики AQ 4xU/I ST (6ES7532-5HD00-0AB0)

Параметр	Характеристика
Артикул	6ES7532-5HD00-0AB0
Тип виробу	AQ 4xU/I ST (аналоговий модуль виходів)
Версія апаратного забезпечення	FS04
Версія прошивки	V2.2.0
Можливість оновлення прошивки	Так
Інженерія	STEP 7 TIA Portal з V12; STEP 7 з V5.5 SP3
Номінальна напруга живлення	24 В DC
Допустимий діапазон напруги	20.4–28.8 В DC
Захист від зворотної полярності	Так
Максимальне споживання струму	190 мА
Кількість аналогових виходів	4
Діапазони напруги	0–10 В; 1–5 В; ± 10 В
Діапазони струму	0–20 мА; ± 20 мА; 4–20 мА
Захист від короткого замикання	Так (для виходу напруги)
Мінімальний цикл (усі канали)	3.2 мс
Роздільна здатність	16 біт
Час перетворення (на канал)	0.5 мс
Типова похибка (напруга/струм)	± 0.3 %
Базова похибка при 25 °C	± 0.2 %
Діагностика	Контроль живлення, обрив проводу, коротке замикання, переповнення
Світлодіодна індикація	RUN, ERROR, PWR, статус каналів
Гальванічна розв'язка	Між каналами та шиною; між каналами та L+
Випробувальна ізоляція	707 В DC
Ширина	35 мм
Висота	147 мм
Глибина	129 мм
Маса	≈ 310 г

Для забезпечення людино-машинного інтерфейсу (HMI), візуалізації технологічного процесу та керування ним обрано сенсорну панель оператора Siemens SIMATIC HMI TP1900 Comfort. Ця панель має кольоровий широкоформатний дисплей з діагоналлю 19 дюймів, що дозволяє зручно розмістити мнемосхему агрегату, графіки та елементи керування. Загальний вигляд панелі представлено на рисунку 5.31.



Рисунок 5.31 – Загальний вигляд панелі оператора SIMATIC HMI TP1900 Comfort

Таблиця 5.16 – Технічні характеристики TP1900 Comfort Display

Параметр	Значення
Тип продукту	TP1900 Comfort Display
Тип дисплея	TFT сенсорний екран (аналогово-резистивний)
Діагональ екрану	18.5 дюймів
Роздільна здатність	1366 x 768 пікселів
Кількість кольорів	16 777 216
Підсвітка	Регульована 0–100 %, ресурс ~50 000 год
Орієнтація монтажу	Вертикальна/горизонтальна, портретний режим підтримується
Живлення	24 V DC (19.2–28.8 V)
Споживана потужність	≈41 W
Процесор	x86
Пам'ять користувача	24 MB
Інтерфейси	Industrial Ethernet (2+1 порт), RS422/485, USB 2.0 (2 порти)
Підтримувані протоколи	PROFINET, PROFIBUS, EtherNet/IP, MPI, TCP/IP, DHCP, SNMP, MODBUS
Web-функції	HTTP, HTTPS, HTML, XML, CSS, JavaScript
Ступінь захисту	IP65 (спереду), IP20 (ззаду)
Сертифікації	CE, cULus, RCM, KC, EAC, ATEX Zone 2/22, IECEx Zone 2/22
Умови експлуатації	0...45 °C (вертикально), внутрішнє використання
Операційна система	Windows Embedded Compact 2013
Програмне забезпечення	WinCC Comfort/Advanced/Professional (TIA Portal)
Основні функції HMI	Рецепти, тривоги, архівування, web-браузер, PDF Viewer, Media Player

Безпека	До 50 користувачів, групи доступу, SIMATIC Logon
Підключення PLC	S7-1200/1500/300/400, LOGO!, SINUMERIK, SIMOTION, Allen Bradley, Mitsubishi, Modicon
Матеріал корпусу (передня панель)	Алюміній
Габарити (Ш×В)	483 × 337 мм
Монтажна глибина	73.2 мм
Вага	5.6 кг

Для забезпечення надійного енергопостачання центрального процесора та модулів розширення по внутрішній шині використовується модуль системного живлення PS 60W. Він перетворює вхідну напругу 24 В постійного струму в необхідну напругу для роботи електроніки контролера. Цей модуль має достатню потужність (60 Вт) для живлення обраної конфігурації. Його вигляд наведено на рисунку 5.32.

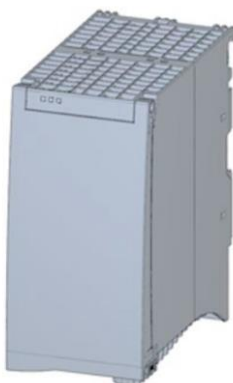


Рисунок 5.32 – Модуль системного живлення PS 60W 24/48/60V DC (6ES7 505-0RA00-0AB0)

Таблиця 5.17 – Технічні характеристики PS 60W 24/48/60VDC (6ES7505-0RA00-0AB0)

Параметр	Характеристика
Позначення типу виробу	PS 60W 24/48/60 В DC
Версія апаратного забезпечення	FS02
Версія мікропрограми	V1.0.1
Інтеграція в STEP 7 TIA Portal	Починаючи з версії V12
Інтеграція в STEP 7	Починаючи з версії V5.5 SP3 або новішої
Підтримка резервування	Так
Резервування для підвищення продуктивності	Так
Номінальна напруга (DC)	24 В / 48 В / 60 В
Допустимий нижній діапазон (DC)	Статичний: 19,2 В; Динамічний: 18,5 В
Допустимий верхній діапазон (DC)	Статичний: 72 В; Динамічний: 75,5 В
Захист від зворотної полярності	Так

Захист від короткого замикання	Так
Час резервування при зникненні живлення	20 мс
Споживаний струм (номінальний)	3 А
Номінальний струм при 48 В DC	1,5 А
Номінальний струм при 60 В DC	1,2 А
Потужність, що подається на шину	60 Вт
Втрати потужності при номінальних умовах	12 Вт
Індикатор стану	Так
Електрична ізоляція	Так; ізоляція для 230 В AC (посилена ізоляція)
Випробування ізоляції	2500 В DC, 2 с (стандартне випробування)
Стійкість до імпульсних перенапруг	+/- 1 кВ (симетричні), +/- 2 кВ (несиметричні); зовнішній захист не потрібен
Ступінь захисту (EN 60529)	IP20
Клас захисту	1; із заземлювальним провідником
Ширина	70 мм
Висота	147 мм
Глибина	129 мм
Маса (приблизно)	600 г

5.4.3. Розміщення технічних засобів та конфігурація мережі

Розміщення технічних засобів та організація мережі реалізовані з урахуванням вимог електробезпеки, електромагнітної сумісності та оптимізації кабельних трас.

Розміщення обладнання: ПЛК, частотні перетворювачі та комутаційна апаратура встановлюються у пиловологозахищеній металевій шафі керування (ступінь захисту IP54) із системою примусової вентиляції. Шафа розташовується безпосередньо у виробничому приміщенні поблизу агрегату для скорочення довжини ліній зв'язку. Панель оператора вбудовується у дверцята шафи.

Захист ліній зв'язку: З метою мінімізації впливу електромагнітних наведень від силових кіл, слабкоструміві аналогові лінії (4-20 мА) прокладаються екранованим кабелем (типу LiYCY) у заземлених лотках. Дискретні виходи контролера, що керують індуктивними навантаженнями, мають обов'язкову гальванічну розв'язку за допомогою інтерфейсних реле.

Топологія мережі: Інформаційний обмін між центральним процесором, панеллю оператора та чотирма частотними перетворювачами реалізовано через промислову мережу PROFINET IO. Мережа побудована за топологією «Зірка» з використанням промислового комутатора та екранованого кабелю (вита пара Cat 5e або вище).

Схему технічної (структурної) побудови комплексу автоматизації, на якій відображено ієрархію керування, технічні засоби та інтерфейси зв'язку, наведено на рис. 5.33.

Блок живлення	Процесор	Модуль дискретних входів	Модуль дискретних виходів	Модуль аналогових входів	Модуль аналогових виходів	Панель оператора
PS 60W 24/48/60 VDC (6ES7505- 0RA00 0AB0)	CPU 1516-3 PN/DP (6ES75 16 3AN01- 0AB0)	DI 32x24VDC BA 6ES7521- 1BL10- 0AA0	DQ 16x24VDC/ 0.5A BA 6ES7 522 1BH10 0AA0	AI 8xU/I/ 6ES7 531- 7KF00- 0AB0	AQ 4xU/I/ 6ES7 532- 5HD00- 0AB0	TP1900 Comfort 6VA2 124 OUC02- 0AX1

PROFINET

Рис. 5.33. – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування

Склад модулів контролера, обраних для реалізації системи керування, представлено у середовищі TIA Portal на рисунку 5.34. Конфігурація включає центральний процесор CPU 1516-3 PN/DP та модулі розширення вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів.



Рис. 5.34 – Апаратна конфігурація програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1500

Зв'язок між програмованим логічним контролером та панеллю оператора реалізовано через промислову мережу PROFINET. Графічне відображення мережевої конфігурації пристроїв наведено на рисунку 5.35.

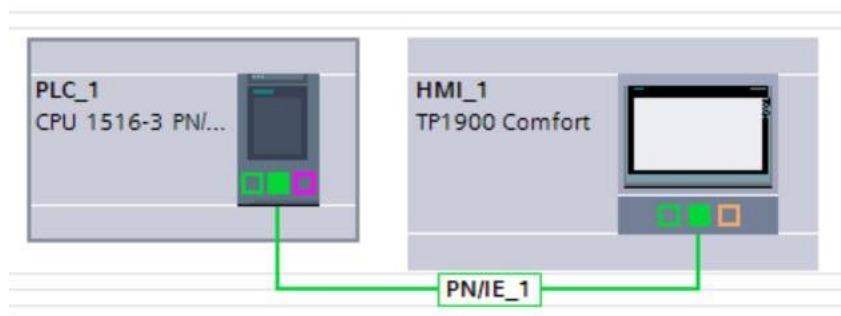


Рис. 5.35 – Мережева конфігурація системи керування (обміну даними) у середовищі TIA Portal

6. ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ, КОНТРОЛЕРА І МЕРЕЖ, ПРОГРАМУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ САК.

6.1. Вибір параметрів технічних засобів, контролера і мереж

6.1.1. Склад технічних засобів та параметри мережі

Для реалізації системи автоматичного керування (САК) тістоприготувальним агрегатом обрано сучасну апаратну платформу Siemens SIMATIC S7-1500. Центральним процесором виступає модуль CPU 1516-3 PN/DP, який володіє високою швидкістю та достатнім обсягом пам'яті для реалізації складних математичних моделей цифрового двійника.

В якості людино-машинного інтерфейсу (HMI) обрано сенсорну панель оператора Siemens TP1900 Comfort.

Основним інтерфейсом обміну даними обрано промислову мережу PROFINET, що забезпечує високошвидкісний детермінований зв'язок між ПЛК, панеллю оператора та частотними перетворювачами приводів (топологія "Зірка" через промисловий комутатор SCALANCE).

6.1.2. Вибір блоків вводу/виводу (I/O) та їх параметризація

Для збору сигналів безпеки та керування (E-Stop, кінцеві вимикачі, підтвердження роботи) обрано модуль дискретних входів DI 32x24VDC BA. Для нього в середовищі TIA Portal активовано апаратні діагностичні переривання на випадок обриву проводу (Wire break) для критичних ланцюгів безпеки (зокрема кнопки аварійної зупинки).

Для керування електропневматичними позиціонерами шиберів Z3 та Z4 (0–100%) застосовано модуль аналогового виводу AQ 4xU/I ST, який налаштовано на стандартний струмовий сигнал 4...20 мА. Аналогічно налаштовані модулі аналогового вводу (AI) для отримання фактичної температури від перетворювачів ПВТ.

6.1.3. Налаштування частотних перетворювачів, інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів

У рамках апаратної конфігурації проекту виконано узгодження параметрів інтелектуальних польових пристроїв:

- Частотні перетворювачі (SINAMICS G120C)

Для керування асинхронними приводами дозатора (M1), змішувачів (M2, M3) та насоса (M4) обрано інтеграцію через мережу PROFINET. У налаштуваннях мережі TIA Portal обрано стандартний профіль обміну даними – Standard Telegram 1. Це забезпечує циклічну передачу Слова керування (Control Word) та Слова стану (Status Word) для діагностики перевантажень двигунів без використання фізичних дискретних ліній.

- Електроприводи шиберів з позиціонерами (AUMA PROFOX-M)

Для шиберів Z3 та Z4, які працюють у режимі безперервного регулювання (Клас C), виконано налаштування масштабування керуючого сигналу 4...20 мА, де 4 мА відповідає 0% (повністю закрито), а 20 мА — 100% (повністю відкрито). Аналогічно параметризовано сигнал аналогового зворотного зв'язку (Position Feedback) для замикання контуру в ПІД-регуляторі контролера.

- Датчики рівня (SITRANS LVS200)

Для контролю мінімального залишку сировини в бункерах (захист від «сухого ходу») використано двопровідну схему підключення вібраційних вимикачів, що логічно інтегровані в підсистему безпеки (Interlocks) як нормально розімкнені (NO) контакти.

6.2. Розробка програм для реалізації алгоритмів логічного керування

6.2.1. Програма реалізації алгоритму логічного керування

Програмне забезпечення ПЛК розроблено у середовищі TIA Portal.

Розробку програмного забезпечення для реалізації алгоритмів логіко-програмного керування тістоприготувальним агрегатом виконано мовою високого рівня SCL (Structured Control Language), згідно з вимогами міжнародного стандарту IEC 61131-3.

Основним модулем підсистеми логічного керування є спеціально розроблений функціональний блок FB_SequenceControl, який циклічно викликається з головного організаційного блоку OB1. Структура даного функціонального блоку розділена на дві взаємопов'язані підпрограми:

1. Підпрограма опитування стану типового обладнання та безпеки (Safety Interlocks)

У верхній частині коду FB_SequenceControl реалізовано алгоритм безперервного моніторингу критичних параметрів. Підпрограма здійснює опитування стану:

- датчиків рівня в п'яти ємностях сировини (rL_E1...rL_E5). У разі нестачі формується аварійний сигнал bErr_LowLevel.
- температури тіста (rTemp_PV). Запроваджено порівняння з динамічною уставкою ліміту (rTemp_Limit_SP), що задається з АРМ наладчика, для формування попередження bErr_TempHigh.
- аварійних кнопок та теплових реле двигунів (bErr_EStop, bErr_M2_Overload).

Усі виявлені критичні помилки об'єднуються логічною операцією OR та миттєво генерують команду bStop_Cmd, яка примусово переводить алгоритм у стан безпечної зупинки.

2. Підпрограма автоматичного пуску і зупинки ТА

Для керування послідовністю включення виконавчих механізмів (двигунів M1–M4, клапанів KL1–KL4 та заслінок Z1–Z4) використано конструкцію вибору CASE ... OF. Це дозволило реалізувати жорсткий кроковий автомат (State Machine), де кожен наступний крок активується лише після успішного завершення попереднього.

Кроки 1–5: Перевірка наявності сировини та активація попереджувальної звукової сигналізації (сирени) тривалістю 10 секунд.

Кроки 9–12: Запуск двигуна камери змішування (M2) та двигуна вивантаження (M3). Для запобігання пусковим перевантаженням мережі та заторам продукту між пусками двигунів введено затримки по 20 секунд.

Затримки реалізовані за допомогою типових стандартизованих таймерів затримки включення – IEC_TIMER (TON). Одночасно відкриваються транспортні заслінки Z2, Z3, Z4.

Кроки 14–19: Після виходу механізмів на робочий режим ініціюється подача борошна (запуск дозатора M1 та відкриття Z1), розчинів та опари (відкриття клапанів KL1–KL4 та запуск M4).

Крок 100: Перехід агрегату в стабільний робочий режим (bSystem_Running := TRUE), що дозволяє активацію ПД-регуляторів та моделі об'єкта.

Крок 999: Алгоритм повної безаварійної зупинки. Виконує миттєве скидання всіх керуючих сигналів (FALSE) на двигуни та клапани, перериваючи технологічний цикл у разі команди оператора або спрацювання підпрограми Interlocks.

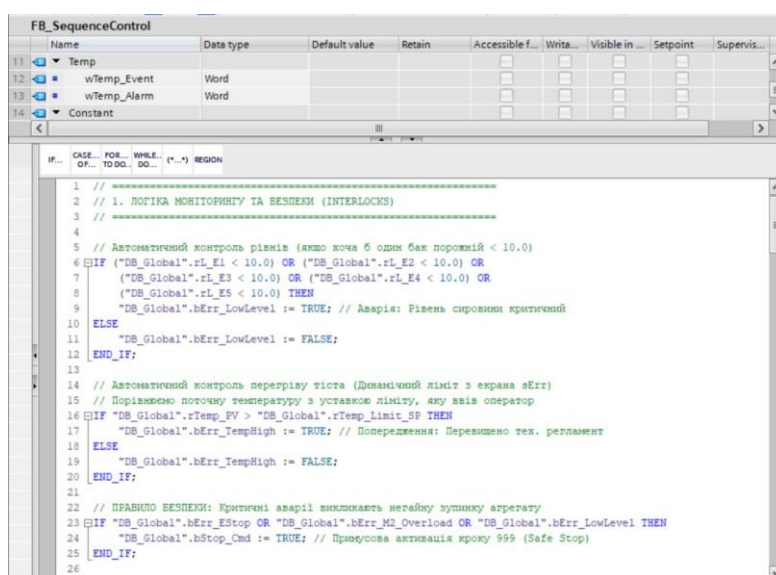


Рис. 6.1 – Фрагмент підпрограми крокового автоматичного пуску агрегату мовою SCL

6.2.2. Тестування програми логічного керування

Тестування розроблених логічних алгоритмів проведено за допомогою вбудованого програмного симулятора контролерів Siemens S7-PLCSIM та системи візуалізації WinCC Runtime.

Під час тестування імітувались як штатні, так і аварійні режими роботи агрегату. Для цього в SCADA-системі було розроблено спеціалізований

сервісний екран (sErr – Debug Screen), який дозволив генерувати сигнали відсутності сировини в бункерах та імітувати спрацювання теплового захисту двигунів.

Результати тестування (шляхом моніторингу значення змінної iStep у Watch Table та візуальної реакції мнемосхеми) підтвердили абсолютну коректність роботи скомпільованої програми:

- часові затримки пуску відпрацьовуються згідно з регламентом;
- імітація порожнього бака (введення значення 0.0%) миттєво перериває цикл пуску;
- критичні помилки коректно переводять стейт-машину на крок 999, забезпечуючи безумовне закриття запірної арматури та знеструмлення приводів, що відповідає вимогам промислової безпеки.

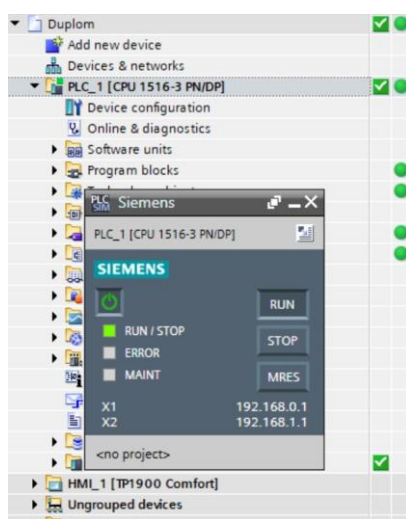


Рис. 6.2 – Тестування розробленого SCL-коду в середовищі S7-PLCSIM

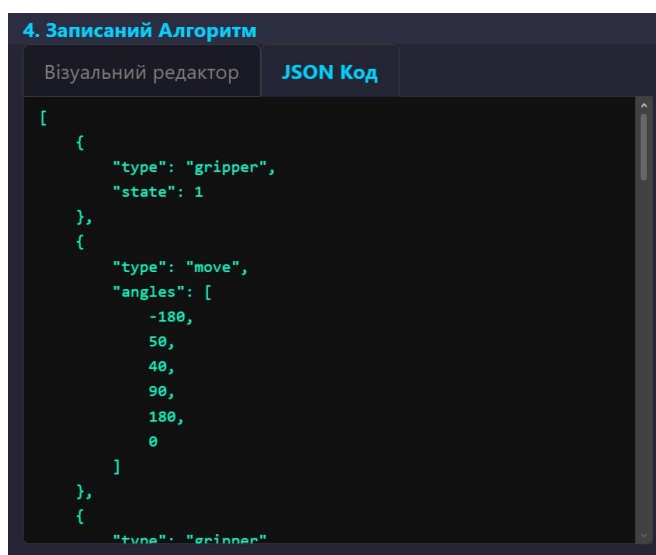
6.3. Розробка програм переміщення робочого органу робота

6.3.1. Розробка програми реалізації алгоритму переміщення у тривимірному просторі

Оскільки сучасні кіберфізичні системи вимагають інтеграції IT та OT-рішень, для створення цифрового двійника маніпулятора було використано розширене середовище імітаційного моделювання CoppeliaSim Edu у зв'язці з Python-сервером через ZeroMQ Remote API.

Програмування траєкторії руху маніпулятора UR5 реалізовано сучасним об'єктно-орієнтованим підходом із застосуванням машиночитного формату JSON (JavaScript Object Notation).

Алгоритм переміщення реалізовано методом інтерполяції кутових швидкостей шарнірів (Joints). Програмний код зчитує масив цільових кутів (у радіанах) і дискретно, з кроком $\Delta t = 0,05$ с, розраховує проміжні положення 6 осей маніпулятора UR5. Це забезпечує плавний і синхронний рух робочого органу (TCP). Для керування кінцевим ефектором розроблено алгоритм «Soft Hold», який програмно регулює швидкість змикання та обмежує силу стискання (до 20 Н) після контакту з касетою інгредієнтів.



4. Записаний Алгоритм

Візуальний редактор JSON Код

```
[
  {
    "type": "gripper",
    "state": 1
  },
  {
    "type": "move",
    "angles": [
      -180,
      50,
      40,
      90,
      180,
      0
    ]
  },
  {
    "type": "gripper"
  }
]
```

Рис. 6.3 – Фрагмент керуючої програми (у форматі JSON) для переміщення маніпулятора та керування захоплювачем

Розроблена програма формалізує робочий цикл маніпулятора у вигляді машиночитного сценарію послідовного керування (Рис. 6.3). Кожен крок алгоритму записується у вигляді об'єкта (Dictionary) у форматі JSON, що є програмним відображенням технологічної циклограми. Даний масив містить тип дії та її параметри:

Команда "type": "move" містить масив з шести значень "angles", які відповідають цільовим кутам повороту (в градусах) для кожного з шести сервоприводів маніпулятора (Base, Shoulder, Elbow, Wrist 1, Wrist 2, Wrist 3).

Команда "type": "gripper" визначає стан кінцевого ефектора через параметр "state", де значення «1» відповідає команді на розмикання пальців, а «0» — на їх змикання із застосуванням алгоритму фіксації об'єкта.

Команда "type": "delay" (не відображена на фрагменті, але закладена в логіку) відповідає за технологічні паузи під час завантаження сировини.

Програмний інтерпретатор на боці сервера послідовно зчитує (парсить) даний JSON-файл і перетворює статичні координати на динамічну траєкторію руху за допомогою математичної інтерполяції, забезпечуючи плавний підхід робочого органу до заданих точок простору.

6.3.2. Тестування програми в середовищі моделювання CoppeliaSim

Тестування програми здійснювалося шляхом віртуального прогону послідовних технологічних кроків в CoppeliaSim. Було перевірено кінематичну досяжність цільових точок (Inverse Kinematics) та відсутність сингулярностей. Інтеграція динамічного фізичного рушія (Newton) дозволила підтвердити, що обрані значення сил та швидкостей у коді Python виключають вібрації маніпулятора та вислизання об'єкта під час просторового переміщення на високих швидкостях.

На рисунку 6.4 наведено ключові кадри виконання розробленого логічного алгоритму. Візуалізація підтверджує коректність роботизованого завантаження касети з мікроінгредієнтами:

I–II: Вихід маніпулятора із нульової позиції та наближення до зони видачі сировини.

III: Спрацювання кінцевого ефектора RG2. Застосовано алгоритм Soft Hold для надійного утримання касети без вібрацій.

V–VI: Транспортування об'єкта по складній траєкторії до приймального шлюзу тістомісильного агрегату та точне позиціонування над отвором завантаження.

VII: Розмикання захвату (гравітаційне вивантаження) та завершення технологічної операції.

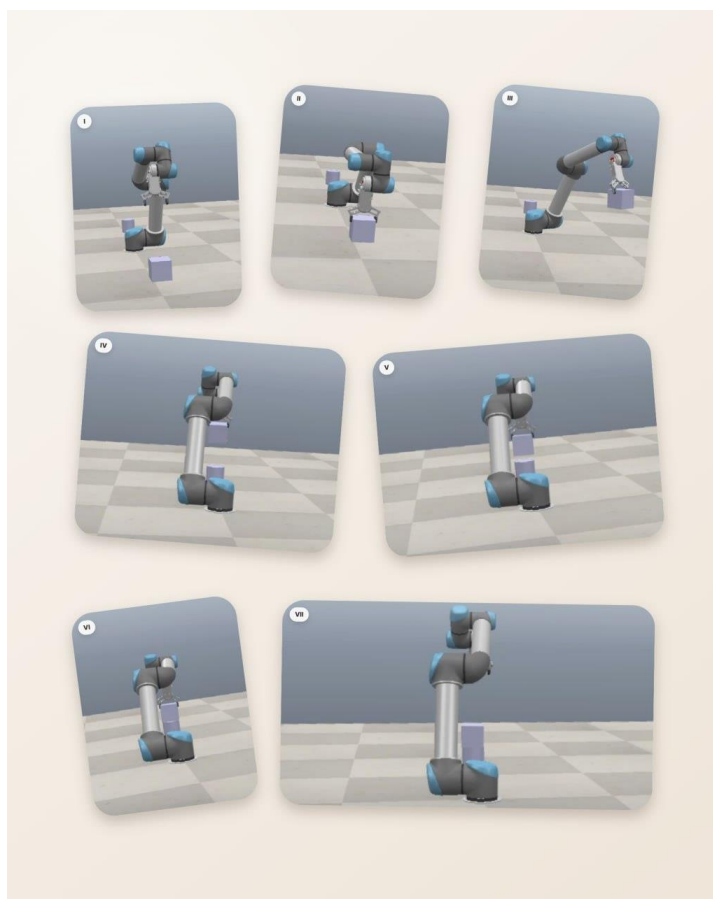


Рис. 6.4 – Результати імітаційного моделювання технологічного циклу завантаження інгредієнтів у середовищі CoppeliaSim.

Комп'ютерний експеримент довів, що розроблений ПЛК-алгоритм забезпечує плавність руху, відсутність статичних помилок позиціювання та повну безпеку механічних вузлів.

6.4. Розробка програм для реалізації алгоритмів регулювання

6.4.1. Розробка підпрограми математичної моделі об'єкта регулювання (ОР) з використанням типових динамічних ланок

Для налаштування регуляторів без доступу до реального об'єкта було створено програмну імітаційну модель («цифровий двійник») тістоприготувального агрегату. Програма розміщена в організаційному блоці циклічного переривання OB30 (Cyclic_Interrupt_100ms). Використання жорстко фіксованого кроку часу (100 мс) гарантує високу точність математичного інтегрування диференціальних рівнянь, що описують динаміку об'єкта.

Для формування багатозв'язної моделі об'єкта розроблено спеціалізовані функціональні блоки на базі типових динамічних ланок.

Блок інерційності FB_Sim_PT1[FB1]: Програмно реалізує диференціальне рівняння аперіодичної ланки 1-го порядку ($W(s)=K/(Ts+1)$). Він імітує теплову та механічну інерційність агрегату згідно з ідентифікованими параметрами. Для виклику в програмі створено екземпляри блоку даних inst_Obj1_PT1 [DB6] (для потужності) та inst_Obj2_PT1 [DB7] (для температури). Блок PT1 робить так, щоб значення в програмі зростало плавно, імітуючи реальні сталі часу об'єкта ($T=37,3$ с та $T=50,4$ с), розраховані під час ідентифікації.

Блок транспортного запізнення FB_Delay [FB5]: Реалізує ланку чистого запізнення (τ) на базі алгоритму кільцевого буфера. Для моделювання затримки переміщення тіста по камерах використовуються екземпляри inst_Delay1[DB8] та inst_Delay2 [DB9]. У моєму об'єкті від моменту зміни подачі сировини до моменту, коли це тісто дійде до датчика температури на виході, проходить майже 20 секунд. Без цього блоку ПІД-регулятор "бачив" би реакцію миттєво, що є неможливим у реальності. Блок Delay затримує сигнал у пам'яті ПЛК, змушуючи ПІД-регулятор працювати в складних, реалістичних умовах, і дозволяє наочно побачити явище перерегулювання на графіках.

Перехресний зв'язок: Враховує фізичний вплив роботи місильного приводу на нагрівання тіста через тертя. Реалізовано через виклик ланки inst_Cross_PT1 [DB11].

Особливістю моделі є програмне зміщення робочої точки (Offset). Для забезпечення двостороннього регулювання розрахунки в OB30 адаптовані так, що 50% відкриття виконавчих механізмів відповідають номінальному базовому режиму.

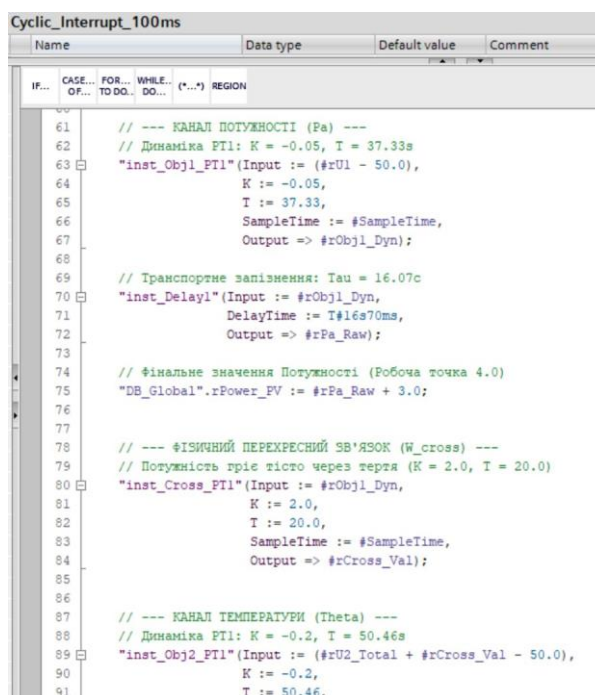


Рис. 6.5 – Фрагмент підпрограми реалізації цифрового двійника об'єкта керування мовою SCL

6.4.2. Розробка підпрограми системи автоматичного регулювання (САР) із використанням типових регуляторів

Керуюча підпрограма САР також розміщена в організаційному блоці переривань OB30. Для стабілізації ключових параметрів застосовано стандартні технологічні об'єкти (Technology Objects) середовища TIA Portal серії PID_Compact:

Контур потужності: Керується ПІ-регулятором (PID_Compact_Power). Диференціальна складова вимкнена для уникнення реакції на високочастотні механічні шуми приводу та дозатора борошна.

Контур температури: Керується повним ПІД-регулятором (PID_Compact_Temp) для ефективного відпрацювання значної теплової інерції та запізнення об'єкта.

Для забезпечення автономності каналів багатозв'язної САР розроблено програмний блок FB_Compensator [FB2]. Його інтеграція виконана методом адитивної корекції: вихідний сигнал ПІД-регулятора температури програмно підсумовується з сигналом компенсатора (через екземпляр FB_Compensator_Instance[DB10]) перед подачею на модель об'єкта. Це

дозволяє своєчасно нейтралізувати перехресні збурення від каналу потужності.

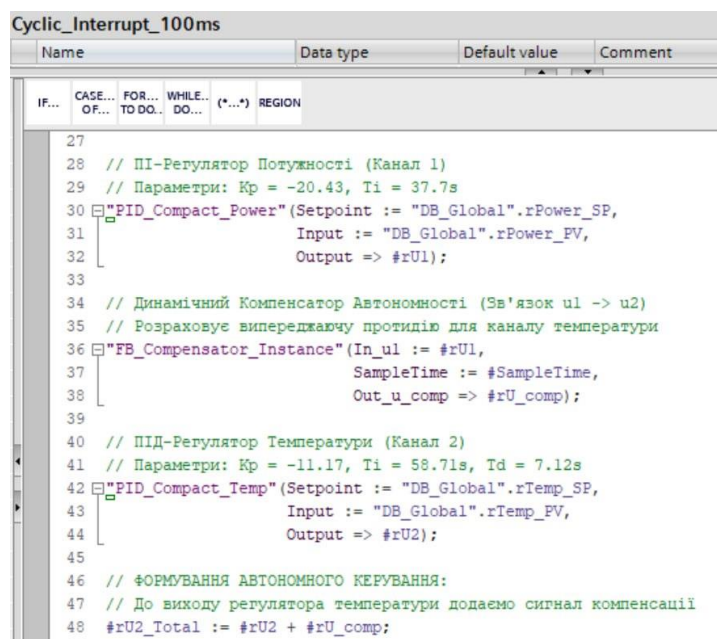


Рис. 6.6 – Фрагмент підпрограми керуючої частини САР: виклики технологічних ПІД-регуляторів та блоку динамічної компенсації в середовищі TIA Portal

6.4.3. Тестування програми регулювання із використанням засобів емуляції контролера

Оцінку працездатності та якості синтезованих алгоритмів САР проведено з використанням симулятора S7-PLCSIM та інструментарію Commissioning технологічних об'єктів TIA Portal.

Під час емуляції задавались ступенчасті зміни уставок (Setpoint) для каналів потужності та температури. Результати тестування (наведені на рис. 6.7 та рис. 6.8) підтверджують наступне:

1. Система стабільно виходить на задані робочі точки без статичної похибки (інтегральна складова працює коректно).
2. Спостерігається короткочасне перерегулювання на початковому етапі пуску, що є характерним наслідком налаштування регуляторів за інженерним методом Копеловича на оптимум (близько 20% перерегулювання) для подолання великого транспортного запізнення ($\tau \approx 20$ с).

3. Керуючі сигнали (Output) регуляторів після завершення перехідного процесу плавно стабілізуються поблизу відмітки 50%, що доводить правильність програмної реалізації зміщення робочої точки в моделі об'єкта.

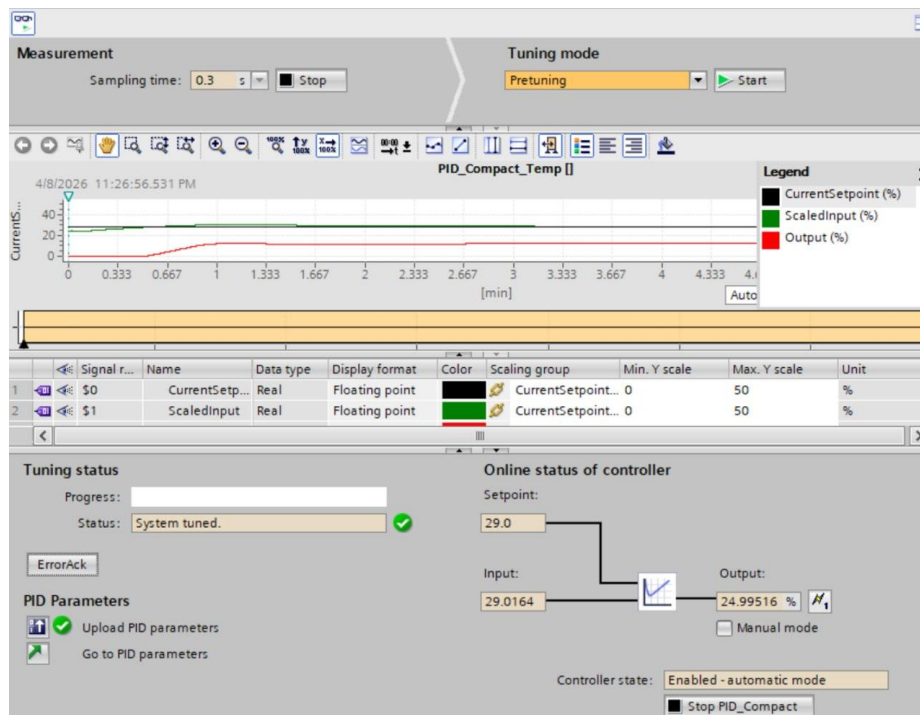


Рис. 6.7 – Перехідний процес у контурі стабілізації температури тіста (вікно Commissioning TIA Portal)

На рисунку 6.7 наведено результати тестування ПІД-регулятора контуру температури (PID_Compact_Temp). Завданням регулятора є підтримка температурного режиму тіста на рівні 29,0 °C.

Як видно з графіка, завдяки введенню диференціальної складової (T_d), регулятор ефективно компенсує значну теплову інерційність об'єкта ($T=50,46$ с) та транспортне запізнення ($\tau=19,82$ с). Керуючий сигнал плавно виходить на стаціонарне значення $\approx 25\%$, не викликаючи автоколивань у системі. Незначне стартове відхилення зеленої лінії лежить у межах допустимого технологічного регламенту, що підтверджує високу якість синтезованої САР.

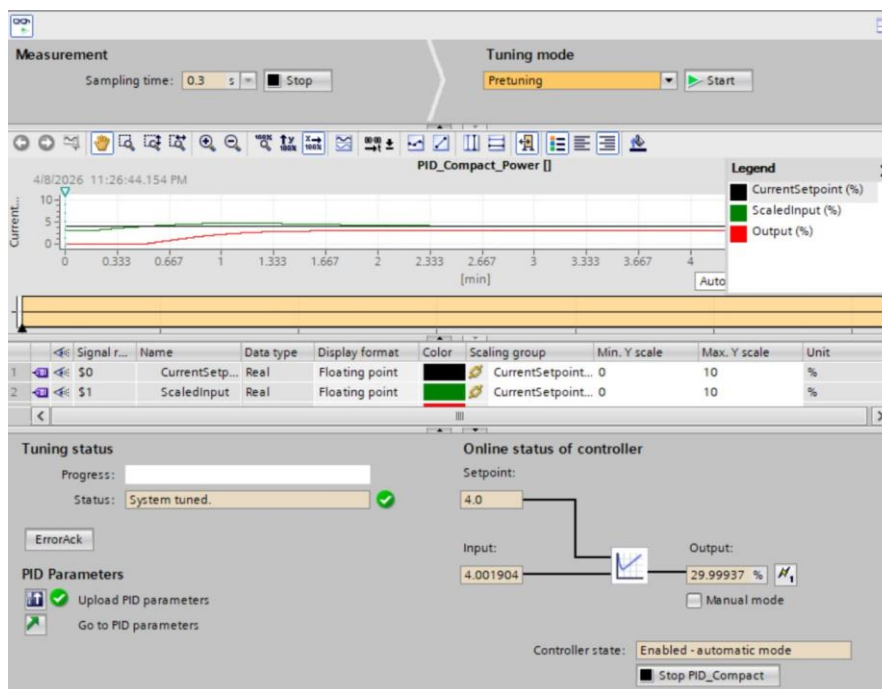


Рис. 6.8 – Перехідний процес у контурі стабілізації потужності (вікно Commissioning TIA Portal)

На рисунку 6.8 наведено результати тестування ПІ-регулятора контуру потужності (PID_Compact_Power) у режимі реального часу. На графіку відображено процес виходу системи з початкового стану на задану робочу точку (Setpoint = 4,0 кВт, чорна лінія). Зелена лінія (Input) демонструє реакцію математичної моделі об'єкта.

На початковому етапі регулятор утримує керуючий вплив на нульовій позначці (червона лінія, Output) для максимально швидкого розгону системи, враховуючи інверсну логіку об'єкта. При наближенні до заданого значення регулятор плавно формує керуючий вплив, що стабілізується на рівні близько 30%. Відсутність перерегулювання та статичної похибки підтверджує коректність розрахованих у розділі 3 параметрів K_p та T_i .

7. РОЗРОБКА SCADA ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ ТЕХНОЛОГА І НАЛАДЧИКА САК.

Для візуалізації технологічного процесу, оперативного моніторингу та керування тістоприготувальним агрегатом розроблено систему диспетчерського керування та збору даних (SCADA). Розробку графічного інтерфейсу виконано в інтегрованому середовищі Siemens TIA Portal (WinCC Advanced) для сенсорної панелі оператора серії SIMATIC HMI TP1900 Comfort.

7.1. Конкретизація функцій і структури екранів АРМ оператора-технолога

7.1.1. Обґрунтування переліку функцій графічного інтерфейсу оператора

Автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора-технолога спроектовано з урахуванням сучасних ергономічних стандартів (ISA-101) для забезпечення ефективної взаємодії людини з машиною (HMI). АРМ оператора-технолога передбачає виконання наступних ключових функцій:

1. Контроль значень технологічних параметрів: безперервне відображення на екрані фактичної потужності замісу (кВт) та температури тіста (°C), а також можливість зміни технологічних рецептур («Пшеничне тісто» / «Житнє тісто»).
2. Контроль стану обладнання: візуальна колірна індикація станів виконавчих механізмів (увімкнено / вимкнено / відкрито / закрито) для двигунів M1–M4, клапанів KL1–KL4 та шиберів Z1–Z4.
3. Керування режимами агрегату: забезпечення можливості ініціалізації алгоритму автоматичного пуску/зупинки, а також переведення системи в ручний режим для індивідуального керування кожним вузлом.
4. Контроль порушень у роботі: своєчасне візуальне, звукове та текстове сповіщення оператора про виникнення аварійних ситуацій

(спрацювання E-Stop, перевантаження двигунів, критичні рівні сировини) з подальшим апаратним блокуванням процесу.

5. Формування звітів та архівів: реєстрація та довгострокове збереження системних подій і діагностичних повідомлень в енергонезалежній пам'яті для подальшого аналізу службами підприємства.

7.1.2. Обґрунтування вибору екранів АРМ оператора-технолога

Для реалізації вищезазначених функцій розроблено зручну навігаційну структуру, яка складається з наступних базових екранів.

«Технологічна схема». Основний екран із зображенням мнемосхеми технологічного процесу. Дозволяє оператору контролювати хід процесу приготування тіста, керувати загальним станом агрегату та перемикати режими керування.

- «Графіки»

Екран, призначений для відображення динаміки зміни технологічних параметрів (потужності та температури) у вигляді часових трендів. Дозволяє візуально оцінювати якість роботи системи автоматичного регулювання (САР).

- «Повідомлення»

Екран, що містить буфер діагностичних повідомлень. Розділений на дві зони: для критичних аварій (Errors) та для технологічних подій і попереджень (System/Warnings).

- «Архів»

Екран для відображення архіву діагностичних повідомлень (Alarm Log), де зберігається хронологія інцидентів за попередні зміни.

- «Детальніше»

Екран допомоги для нових користувачів, який містить розшифровку колірної індикації та базові правила експлуатації інтерфейсу.

7.2. Розробка екранів АРМ оператора-технолога

7.2.1. Опис процесу створення екранів графічного інтерфейсу

Розробка графічного інтерфейсу здійснювалася з використанням системних бібліотек об'єктів WinCC TIA Portal. Усі динамічні елементи прив'язані до відповідних глобальних тегів ПЛК (через блок DB_Global).

- Екран «ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА» (рис. 7.1)

Мнемосхему побудовано з використанням базових графічних примітивів та елементів бібліотеки Symbol Library (ємності, клапани, насоси).

Для контролю стану використано анімацію типу Appearance: при отриманні відповідного сигналу від ПЛК механізми змінюють колір.

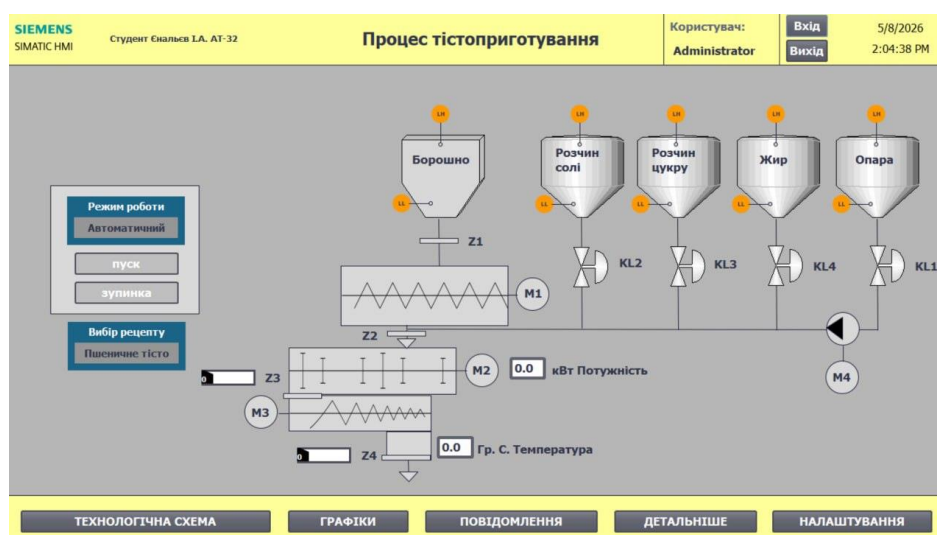


Рис. 7.1 – Основний екран «ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА»

Для керування режимами роботи та окремими двигунами розроблено спеціальні екранні форми за допомогою редактора «Faceplate» (спливаючі вікна). При перемиканні системи в «Ручний» режим на мнемосхемі за допомогою анімації Visibility з'являються маркерні рамки жовтого кольору (рис. 7.2), які вказують на доступність об'єктів для індивідуального керування. Натискання на об'єкт викликає типізований фейсплейт із кнопками «Пуск/Стоп», що прив'язані до тегів контролера через налаштований інтерфейс (Property Interface). В автоматичному режимі виклик екранних форм заблоковано. Також через Faceplate реалізовано меню «Вибір рецепту».

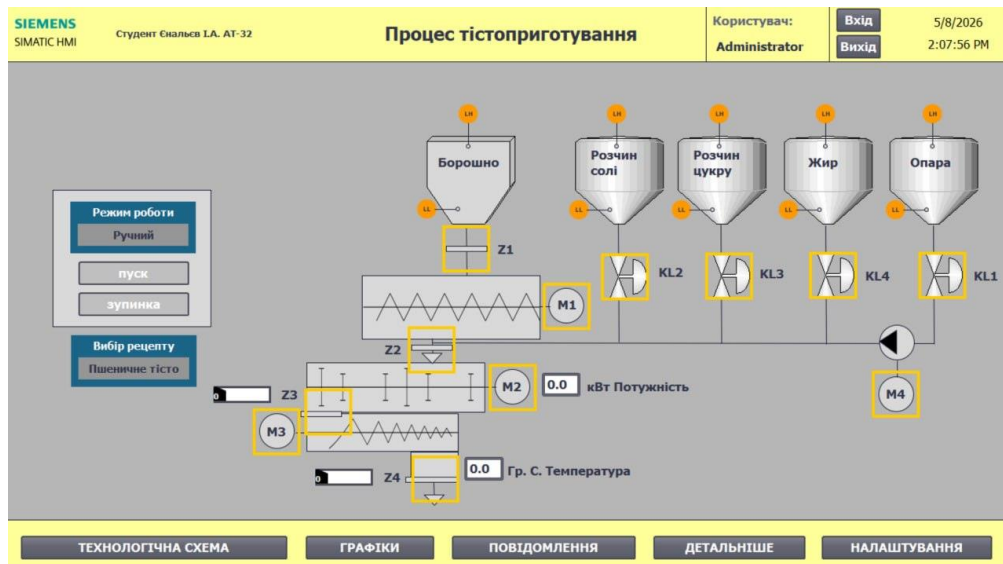


Рис. 7.2 – Відображення доступності механізмів для керування в ручному режимі

- Екран «ГРАФІКИ» (рис. 7.3)

Для моніторингу якості стабілізації параметрів реалізовано екран графіків на базі компонента Trend View. Вікно налаштовано на відображення двох ключових змінних: поточної потужності (червона лінія) та температури тіста (синя лінія) у циклічному режимі реального часу. Застосування єдиної статичної шкали осей та оптимізованого часового вікна дозволяє оператору відстежувати перехідні процеси.

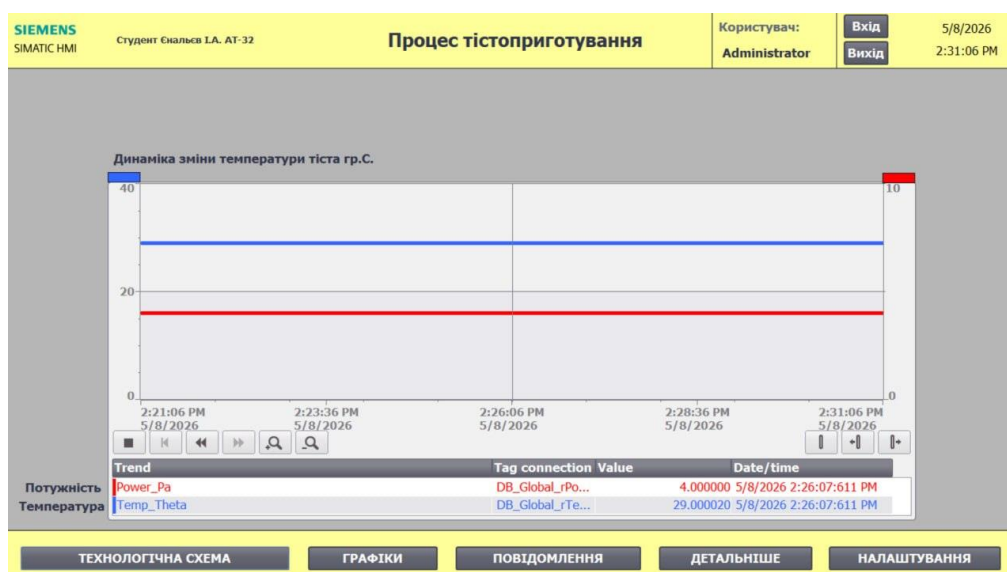


Рис. 7.3 – Екран «ГРАФІКИ» для моніторингу перехідних процесів САР

- Екрани «ПОВІДОМЛЕННЯ» (рис. 7.4)

Реалізовані на базі об'єкта Alarm View. Для підвищення ергономічності інтерфейс розділено на дві функціональні зони: вікно «ПОМИЛКИ» (клас Errors) та вікно «РОБОЧИ» (класи Warnings та System).

В лівому вікні відображаються виключно критичні аварії (наприклад, спрацювання E-Stop, перевантаження двигунів, критично низький рівень сировини), які активують апаратне блокування (Interlocks) та зупиняють процес. У правому вікні формується хронологічний журнал роботи системи: фіксується запуск алгоритмів, робота передпускової сигналізації та технологічні попередження (наприклад, перевищення заданого ліміту температури). Використання 16-бітного слова подій (Alarm Word) оптимізує обмін даними між ПЛК та панеллю оператора.

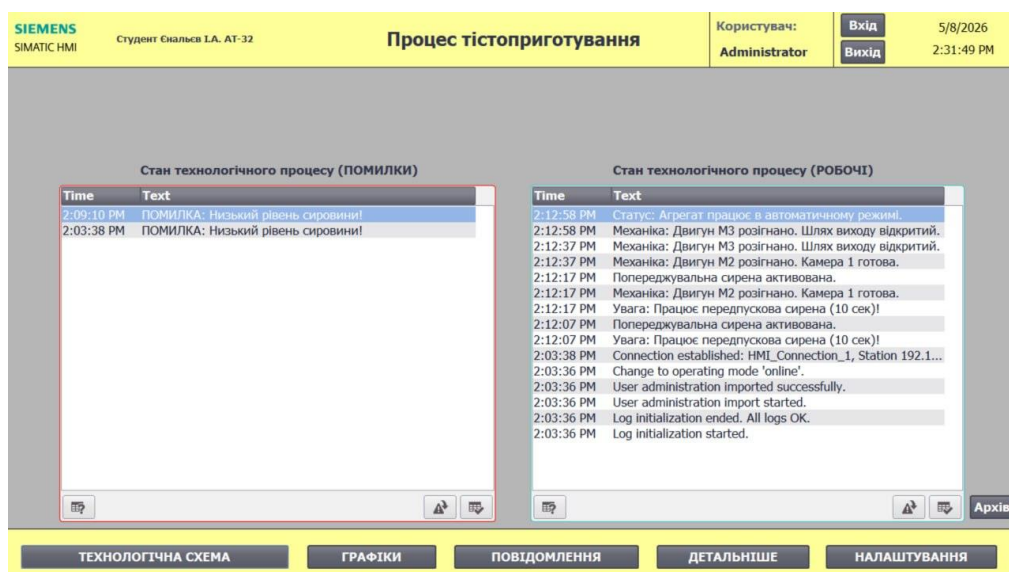


Рис. 7.4 – Екран поточних діагностичних повідомлень

- Екран «Архів» (рис. 7.5)

Згідно з вимогами до АРМ оператора-технолога щодо формування звітів за архівними даними, розроблено екран «Архів». На відміну від буфера діагностичних повідомлень, який відображає лише поточний стан або нещодавні події, цей екран використовує інструмент Alarm Log для доступу до енергонезалежного архіву (AlarmArchive_1), збереженого в пам'яті панелі.

На екрані відображається повна хронологія системних подій, технологічних попереджень (клас Warnings) та критичних аварій (клас My_Errors), включаючи час їх виникнення та квітування. Це дозволяє технологічному та ремонтному персоналу проводити ретроспективний аналіз роботи агрегату, визначати причини аварійних зупинок та аналізувати послідовність дій оператора (наприклад, реєстрацію входів у систему), що є критично важливим для розслідування інцидентів та оптимізації процесу.

SIEMENS
SIMATIC HMI

Студент Сняльов І.А. АТ-32

Процес тістоприготування

Користувач:
Administrator

Вхід
Вихід

5/8/2026
2:32:29 PM

Архів повідомлень

No.	Time	Date	Status	Text	Acknowledge group
S... 11	2:12:58 PM	5/8/2026	I	Статус: Агрегат працює в автоматичному режимі.	0
S... 9	2:12:58 PM	5/8/2026	IO	Механіка: Двигун M3 розігнано. Шлях виходу відкритий.	0
S... 9	2:12:37 PM	5/8/2026	I	Механіка: Двигун M3 розігнано. Шлях виходу відкритий.	0
S... 8	2:12:37 PM	5/8/2026	IO	Механіка: Двигун M2 розігнано. Камера 1 готова.	0
5	2:12:17 PM	5/8/2026	IO	Попереджувальна сирена активована.	0
S... 8	2:12:17 PM	5/8/2026	I	Механіка: Двигун M2 розігнано. Камера 1 готова.	0
S... 7	2:12:17 PM	5/8/2026	IO	Увага: Працює передпускова сирена (10 сек)!	0
5	2:12:07 PM	5/8/2026	I	Попереджувальна сирена активована.	0
S... 7	2:12:07 PM	5/8/2026	I	Увага: Працює передпускова сирена (10 сек)!	0
M... 3	2:09:10 PM	5/8/2026	IO	ПОМИЛКА: Низький рівень сировини!	0
M... 3	2:03:38 PM	5/8/2026	I	ПОМИЛКА: Низький рівень сировини!	0
S... 11	4:18:32 PM	5/4/2026	I	Статус: Агрегат працює в автоматичному режимі.	0
S... 9	4:18:32 PM	5/4/2026	IO	Механіка: Двигун M3 розігнано. Шлях виходу відкритий.	0
S... 9	4:18:12 PM	5/4/2026	I	Механіка: Двигун M3 розігнано. Шлях виходу відкритий.	0
S... 8	4:18:12 PM	5/4/2026	IO	Механіка: Двигун M2 розігнано. Камера 1 готова.	0
5	4:17:52 PM	5/4/2026	IO	Попереджувальна сирена активована.	0
S... 8	4:17:52 PM	5/4/2026	I	Механіка: Двигун M2 розігнано. Камера 1 готова.	0
S... 7	4:17:52 PM	5/4/2026	IO	Увага: Працює передпускова сирена (10 сек)!	0

ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА

ГРАФІКІ

ПОВІДОМЛЕННЯ

ДЕТАЛЬНІШЕ

НАЛАШТУВАННЯ

Рис. 7.5 – Екран «Архів» збережених системних подій

- Екран «ДЕТАЛЬНІШЕ» (рис. 7.6)

Виконує роль довідкової системи для оператора. Містить статичні текстові поля (Text field) з: інструкцією щодо колірної індикації, що застосовуються в системі (робота, зупинка, попередження, аварія); принципами роботи з журналами діагностичних повідомлень; правилами авторизації для доступу до налаштувань САК та особливостями роботи системи в режимі автономного регулювання; правилами авторизації.

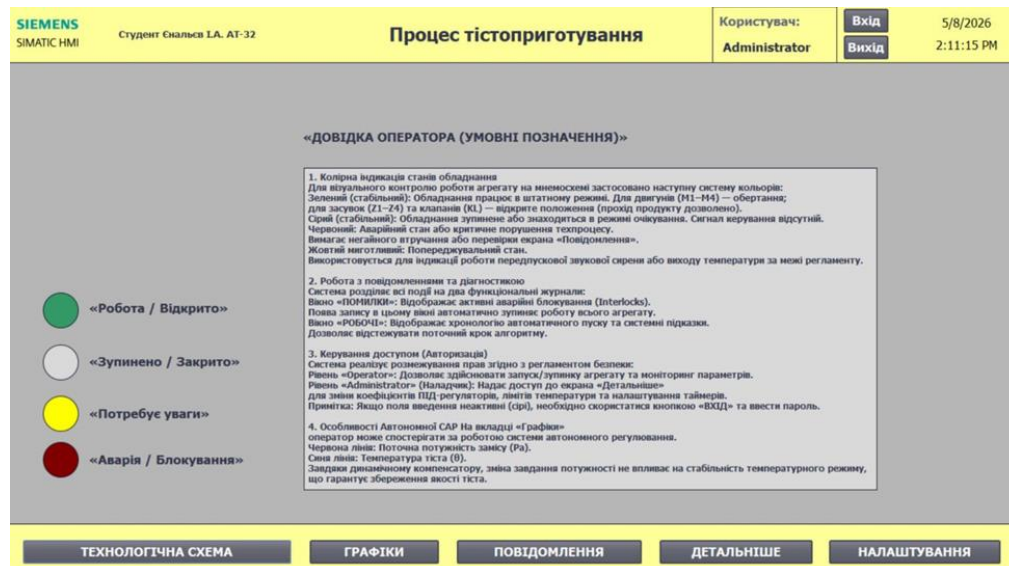


Рис. 7.6 – Екран довідки та умовних позначень

7.2.2. Тестування екранів у режимі емуляції

Перевірку працездатності екранів проведено з використанням симулятора S7-PLCSIM. Тестування підтвердило повну синхронізацію візуалізації з логікою ПЛК: кольорова анімація працює без затримок, блокування ручного режиму функціонує коректно, архів подій успішно зберігає записи після перезапуску середовища виконання.

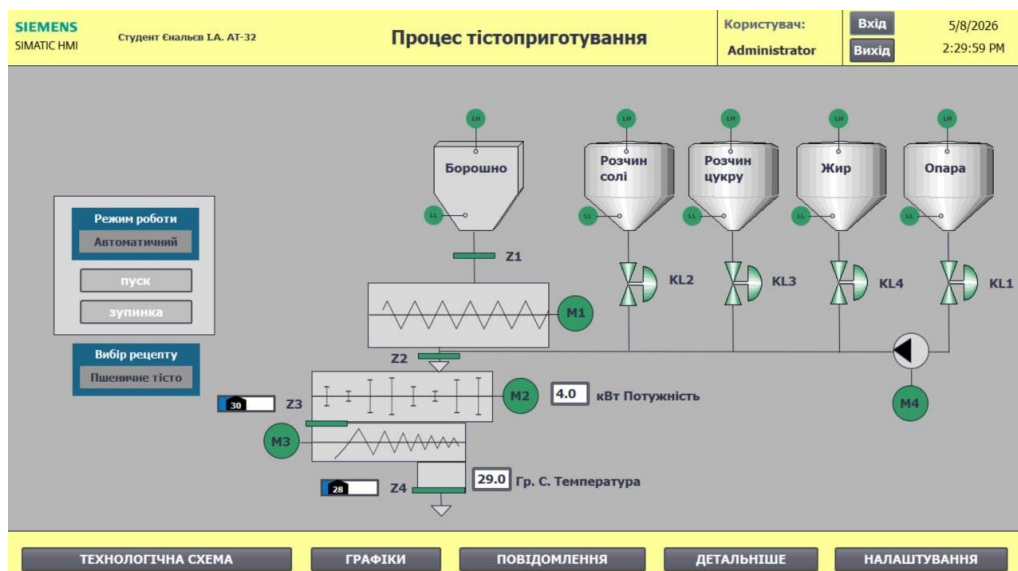


Рис. 7.7 – Тестування у режимі емуляції

7.2.3. Розробка людино-машинного інтерфейса розробленої Web-SCADA системи для керування роботизованим комплексом

На рисунку 7.8 представлено розроблений веб-інтерфейс (АРМ оператора). Панель керування розділена на чотири функціональні зони:

Системний контроль: кнопки ініціалізації та зупинки рушія симуляції.

Калібрування: блок налаштування просторового положення (X, Y, Z) та кутів орієнтації (Rx, Ry, Rz) об'єкта маніпулювання (контейнера).

Пульт навчання (Teach): інтерактивні слайдери для керування шістьма ступенями вільності робота UR5 у реальному часі з функцією зчитування поточних координат. Тут також реалізовано дворівневе керування захоплювачем (відкриття/закриття).

Записаний Алгоритм: візуальний редактор циклограми, що дозволяє оператору переглядати кроки, редагувати кути та затримки (delay) безпосередньо у списку, а також виконувати дії покроково або в автоматичному циклі.

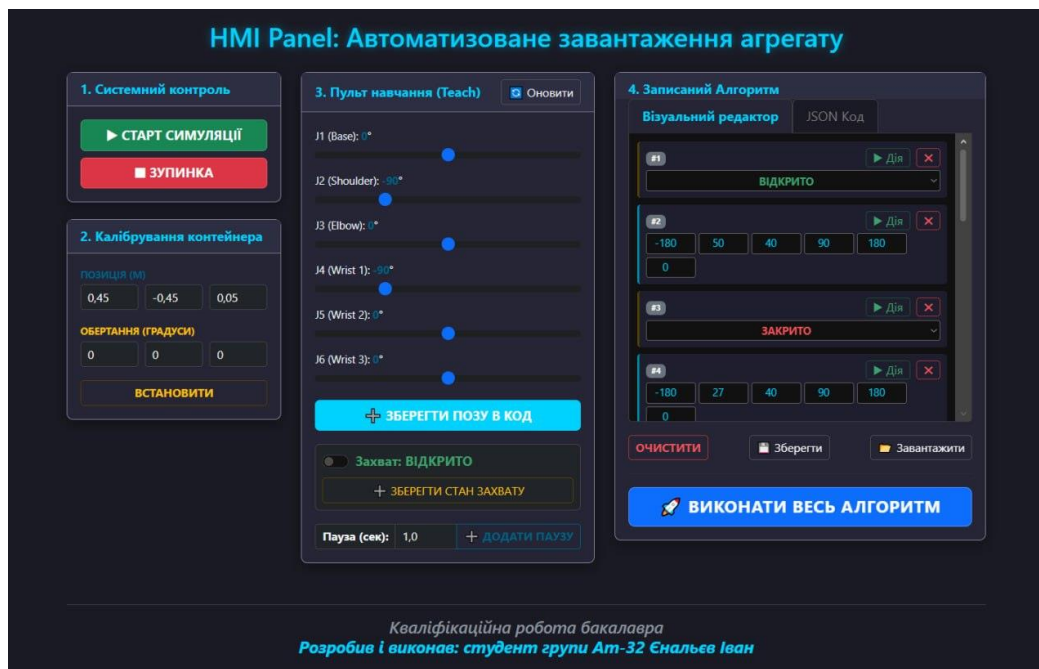


Рис. 7.8 – Людино-машинний інтерфейс (HMI) розробленої Web-SCADA системи для керування роботизованим комплексом.

7.3. Конкретизація функцій та структури екранів АРМ наладчика САК

7.3.1. Обґрунтування переліку функцій АРМ наладчика

Для забезпечення експлуатаційної гнучкості системи розроблено розширений інтерфейс для інженерного персоналу. АРМ наладчика дозволяє виконувати наступні функції:

- налаштовувати контури регулювання (задавати коефіцієнти ПІД-регуляторів K_p , T_i , T_d);
- задавати значення затримок часу для таймерів алгоритмів пуску;
- задавати граничні значення (уставки) технологічних параметрів та ліміти спрацювання попереджувальної сигналізації;
- виконувати адміністрування користувачів системи;
- проводити глибоку діагностику шляхом примусової імітації несправностей (Debug).

7.3.2. Обґрунтування вибору екранів АРМ наладчика

Виконання наведених функцій реалізовано на базі наступних екранів:

- «НАЛАШТУВАННЯ»

Комплексний екран, що об'єднує інструменти введення параметрів регуляторів, технологічних меж та панель імітації аварійних ситуацій для тестування алгоритмів безпеки.

- «Admin»

Екран для відображення та редагування списку зареєстрованих користувачів із наданням їм прав доступу (рівні Operator / Administrator).

7.4. Розробка екранів АРМ наладчика САК

7.4.1. Опис процесу створення екранів графічного інтерфейсу наладчика

Доступ до екранів наладчика суворо регламентований. Усі критичні поля введення захищені параметром Runtime Security (рівень авторизації Administrate). Для входу в систему на головній панелі передбачено кнопку ініціалізації системної функції ShowLogonDialog.

- Екран «НАЛАШТУВАННЯ» (рис. 7.9)

Екран налаштування призначений для інженерного персоналу та дозволяє адаптувати систему до змін умов експлуатації без зупинки контролера. Зліва реалізовано блок зміни параметрів синтезованих регуляторів (коефіцієнтів підсилення K_p , часу інтегрування T_i та диференціювання T_d), а також завдання часу технологічних затримок при пуску.

Для перевірки алгоритмів безпеки передбачено модуль симуляції, який дозволяє імітувати зміну рівнів у ємностях та генерацію аварій. Справа реалізовано блок керування уставками для контурів потужності та температури. Для запобігання введенню некоректних даних налаштовано валідацію значень (Limits) на рівні НМІ-тегів.

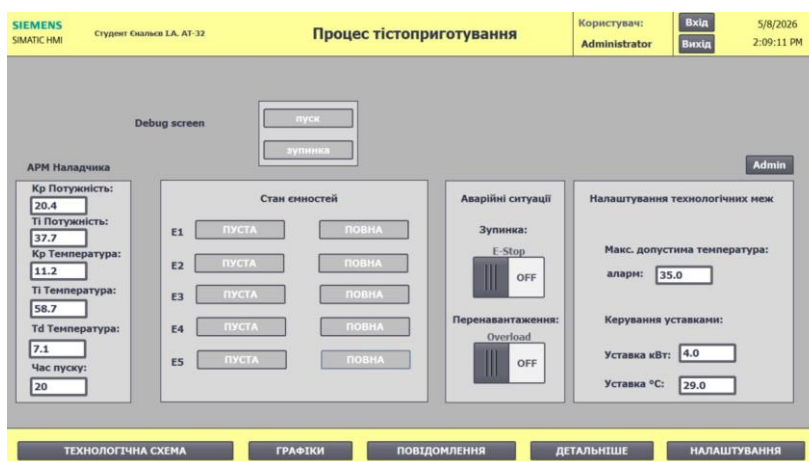


Рис. 7.9 – Сервісний екран «НАЛАШТУВАННЯ» для конфігурації ПІД-регуляторів та симуляції аварій

- Екран «Admin» (рис. 7.10)

Для забезпечення інформаційної безпеки та розмежування прав доступу реалізовано підсистему авторизації на базі стандартного об'єкта User View. Система поділяє користувачів на групи: «Оператори» (тільки запуск та моніторинг) та «Адміністратори» (повний доступ). Усі критичні поля введення (наприклад, налаштування ПІД-регуляторів) захищені параметром Runtime security, що робить їх неактивними до моменту успішної авторизації. Даний екран дозволяє наладчику додавати нових користувачів, змінювати паролі та налаштовувати таймаут сесії безпосередньо в режимі Runtime.

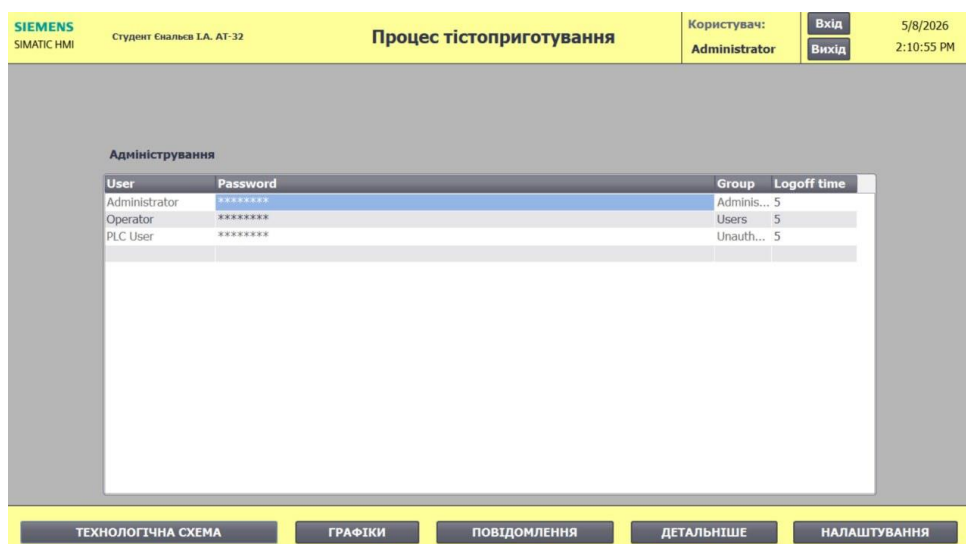


Рис. 7.10 – Екран «Admin» для керування списком користувачів

7.4.2. Тестування екранів у режимі емуляції контролера

Під час тестування перевірено механізми безпеки. При спробі зміни коефіцієнтів ПД-регулятора неавторизованим персоналом система блокує введення та виводить вікно авторизації. Імітація аварій на сервісному екрані (наприклад, порожній бункер) миттєво відпрацьовується логікою ПЛК (перехід алгоритму на крок зупинки 999) із записом відповідної події у системний журнал, що доводить абсолютну надійність розробленої SCADA-системи.

8. РОЗРОБКА ФРАГМЕНТІВ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САК ТА ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ.

8.1. Опис основних технічних рішень із побудови САК та склад документації

Розроблена система автоматичного керування (САК) тістоприготувальним агрегатом базується на дворівневій гібридній архітектурі. Нижній (польовий) рівень представлений інтелектуальними електроприводами (AUMA, Bürkert), частотними перетворювачами (SINAMICS G120C) та польовими КВПіА. Верхній рівень управління реалізовано на базі промислового логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1516-3 PN/DP) у комплексі з панеллю оператора TP1900 Comfort. Обмін даними з силовими приводами здійснюється цифровою шиною PROFINET, а керування допоміжною арматурою та збір сигналів безпеки – через централізовані модулі вводу/виводу ПЛК.

У рамках даного розділу розроблено наступний комплект документації технічного забезпечення:

1. Схема автоматизації технологічного процесу (Додаток А).
2. Специфікація на технічні засоби системи (Додаток Б).
3. Схема електрична принципова підключення дискретних входів (DI) ПЛК (Додаток В).
4. Схема електрична принципова підключення дискретних виходів (DO) ПЛК (Додаток В).
5. Схема електрична принципова вводу аналогових сигналів (AI) (Додаток Г)
6. Схема електрична принципова виводу аналогових сигналів (АО) (Додаток Г).
7. Схема розподілу живлення шафи автоматики (Додаток Д).
8. Креслення загального вигляду (компонування) шафи керування (Додаток Е).
9. Схема мережевих зв'язків (Додаток Ж).

10. Принципова електрична схема електроприводу (Додаток К).

11. Інструкція з охорони праці (Додаток Л).

8.2. Розробка схеми автоматизації та специфікацій на технічні засоби системи

Для реалізації розроблених алгоритмів автоматичного керування створено функціональну схему автоматизації тістоприготувального агрегату (див. Додаток А). Схему виконано з дотриманням вимог ДСТУ Б А.2.4-16:2008.

На схемі застосовано контурну систему маркування, що дозволяє чітко розмежувати технологічні вузли та відповідні їм засоби автоматизації.

Контури 1–5 (Системи дозування сировини) відповідають за подачу борошна (1), розчину солі (2), розчину цукру (3), жиру (4) та опари (5). Для кожного бункера передбачено контроль граничних рівнів (датчики LE та програмні сигналізатори LIS для захисту від сухого ходу/недоливу). Керування подачею здійснюється запірною арматурою. Управління реалізовано через програмні блоки крокової логіки (KS) та станції ручного керування на НМІ (HIS). Фактичне виконання команд підтверджується сигналами зворотного зв'язку від кінцевих вимикачів (ZSC / ZSO).

Контур 6 (Міжзонне переміщення) забезпечує дискретне керування міжзонним шибром Z2 (відкрито/закрито) для скидання мас з систем дозування.

Контури 7 та 8 (Системи безперервного ПІД-регулювання) реалізують стабілізацію ключових параметрів агрегату – потужності головного приводу (EE 7-1) та кінцевої температури тіста (TE 8-1). Як виконавчі механізми використовуються регулюючі шибери Z3 та Z4 (позначені діагональною стрілкою). Сигнали від ПІД-регуляторів (ЕС 7-2, ЕС 8-2) надходять на мікропроцесорні позиціонери [Р], які керують електромоторами [М]. Аналоговий зворотний зв'язок реалізовано через перетворювачі положення (ZT).

На схемі відображено інформаційний зв'язок між контурами 7 та 8, який візуалізує розроблений динамічний компенсатор для усунення перехресного впливу каналів.

Перелік обладнання, відображеного на схемі, зведений у специфікацію (Додаток Б).

8.3. Розробка принципових схем

1. Принципова електрична схема підключення модуля дискретних входів DI.

Для підсистеми збору діагностичних та керуючих сигналів розроблено принципову електричну схему підключення модуля дискретних входів DI (Додаток В рис. 1).

На даному кресленні зображено принципову електричну схему підключення дискретних сигналів до контролера.

Виходячи з таблиці сигналів, загальна кількість DI склала 29 одиниць. Для їх обробки я обрав один модуль високої щільності Siemens DI 32x24VDC BA. Це дозволило оптимізувати простір у шафі керування та залишити 3 канали в резерві (I3.5 – I3.7).

На схемі реалізовано вимоги безпеки: аварійна кнопка E-Stop (SB1) підключена через нормально замкнений (NC) контакт. Для датчиків рівня (SL1-SL10) застосовано сучасну 2-провідну схему підключення, яку апаратно підтримує даний модуль Siemens, що дозволило зменшити кількість кабельної продукції.

2. Схема електрична принципова підключення дискретних виходів (DO) ПЛК.

На Додатку В рис. 2 наведено розроблену схему підключення виконавчих механізмів та апаратури сигналізації до модуля дискретних виходів ПЛК Siemens S7-1500. Для реалізації керуючих впливів застосовано стандартний 16-канальний модуль DQ 16x24VDC/0.5A BA (Артикул: 6ES7 522-1BH10-0AA0).

Модуль працює за класичною схемою з комутацією позитивного потенціалу (Sourcing output). Силове живлення вихідних каскадів модуля здійснюється шляхом підключення клеми 1L+ до шини L+ (24VDC), а клеми 1M до загальної шини M (0V). Усі навантаження підключаються між вихідним каналом контролера та нульовою шиною.

Група керування дискретними шиберами (Q0.0 – Q0.3). Виходи керують котушками проміжних інтерфейсних реле KV1–KV4. Ці реле формують силові команди «Відкрити/Закрити» для електроприводів бункерної засувки Z1 (борошно) та міжзонного шибера Z2. Використання проміжних реле забезпечує гальванічну розв'язку та захищає канали ПЛК від струмів самоіндукції.

Група керування подачею компонентів (Q0.4 – Q0.7). Виходи призначені для керування подачею рідких інгредієнтів (опара, розчин солі, розчин цукру, жир). Сигнали надходять на котушки керування клапанів YV1–YV4 (через модулі розв'язки).

Група сигналізації (Q1.0 – Q1.1). Канали задіяні для керування елементами системи безпеки та оповіщення: звуковою сиреною HA1 (передпускова сигналізація) та світловим індикатором HL1 (зелена лампа статусу роботи агрегату).

Апаратний резерв (Q1.2 – Q1.7). Згідно з правилами промислового проектування, на модулі залишено 6 вільних каналів (клеми 11–16), що становить понад 30% апаратного резерву для можливого розширення системи в майбутньому без заміни базового обладнання.

3. Схема електрична принципова вводу аналогових сигналів (AI) та
Схема електрична принципова виводу аналогових сигналів (AO).

На наведених у Додатку Г схемах розроблено технічні рішення щодо апаратної інтеграції польового обладнання (засобів вимірювальної техніки та виконавчих механізмів) із модулями аналогового вводу-виводу програмованого логічного контролера (ПЛК). Схеми відображають топологію

підключення слабкострумових сигналів, систему живлення та заходи із забезпечення завадостійкості.

- Схема вводу аналогових сигналів (Рис. 1)

Дана схема ілюструє організацію вимірювальних каналів системи автоматизації. На ній відображено:

А. Підключення первинних перетворювачів де передбачено інтеграцію датчиків різних типів, що вимагають відповідних схемотехнічних рішень. Зокрема, реалізовано двопровідну схему підключення (для датчиків зі стандартним струмовим виходом) та трипровідну компенсаційну схему (для термометрів опору).

Б. Забезпечення завадостійкості, оскільки аналогові сигнали є чутливими до електромагнітних завад (ЕМЗ) від промислового обладнання, підключення всіх польових приладів виконано екранованими кабелями. Екрани кабелів об'єднані та підключені до шини заземлення з боку шафи керування, що відповідає стандартам електромагнітної сумісності (ЕМС) та запобігає виникненню паразитних контурів струму.

В. На схемі відображено наявність резервних (незадіяних) каналів модуля ПЛК, що закладені для можливості подальшого розширення системи без необхідності модернізації апаратної бази.

- Схема виводу аналогових сигналів (Рисунок 2)

Схема відображає підключення керуючих аналогових сигналів, які формуються контролером та передаються на виконавчі механізми (наприклад, інтелектуальні позиціонери регулюючої арматури).

Реалізовано пряме двопровідне підключення від каналів виводу ПЛК до клемних коробок виконавчих пристроїв.

Аналогічно до кіл вводу, передача керуючих сигналів здійснюється екранованими лініями з одностороннім заземленням екрану на спільну шину в шафі автоматики, що гарантує відсутність спотворень керуючого впливу.

Обидві схеми передбачають централізовану систему розподілу живлення (24 В постійного струму). Усі зовнішні з'єднання виведені на

проміжні клемні колодки, що забезпечує зручність монтажу, пусконаладжувальних робіт та подальшого технічного обслуговування системи автоматичного керування.

4. Принципова електрична схема електроприводу (Додаток К)

Схему функціонально розділено на три основні блоки:

1. Силове коло (Power Circuit) забезпечує комутацію та захист електродвигуна. Живлення здійснюється від трифазної мережі (~ 380 В). Захист від струмів короткого замикання та перевантаження реалізовано за допомогою автоматичного вимикача з електромагнітним і тепловим розчеплювачами. Комутація статора двигуна виконується силовими контактами електромагнітного контактора. Безпосередньо біля двигуна (на об'єкті) передбачено локальний вимикач безпеки для гарантованого знееструмлення під час сервісних робіт.

2. Релейно-контакторне коло керування (Local Control) реалізує логіку місцевого пуску, зупинки та захисту. Живлення кола здійснюється фазною напругою (~ 220 В) через окремий апарат захисту. Схема містить:

- апаратуру безпеки (кнопки аварійної та штатної зупинки з нормально замкненими контактами);
- кнопку місцевого пуску з паралельним контактом самопідхоплення (саможивлення котушки контактора);
- світлову індикацію робочого стану приводу на фасаді шафи керування.

3. Інтерфейс зв'язку з ПЛК (PLC Interface) для забезпечення безпечної інтеграції високовольтних кіл приводу (~ 220 В) із низьковольтними каналами контролера ($=24$ В DC) застосовано принцип повної гальванічної розв'язки за допомогою проміжних (інтерфейсних) реле.

Команда на автоматичний запуск від дискретного виходу ПЛК подається на котушку проміжного реле, замикаючий контакт якого паралельно дублює кнопку місцевого пуску в колі ~ 220 В.

Для контролю стану приводу (підтвердження роботи, спрацювання захисту, стан місцевого пульта) використовуються сухі контакти допоміжних

реле та автоматів, які комутують безпечну напругу +24 В на дискретні входи ПЛК.

Розроблена схема відповідає чинним нормам електробезпеки, забезпечує надійний захист обладнання та дозволяє легко інтегрувати класичний електропривід у сучасну мікропроцесорну систему автоматизації зі збереженням можливості автономного місцевого керування.

8.4. Розробка схем живлення

8.4.1. Вимоги до джерел живлення.

Оскільки в проекті реалізовано концепцію «повністю електричного агрегату» (пневматичні виконавчі механізми не використовуються), живлення системи здійснюється виключно від електричних мереж. До джерел живлення висуваються наступні вимоги:

Трифазна мережа ~ 400 В / 50 Гц для живлення силових кіл частотних перетворювачів (приводи М1–М4) та електроприводів АУМА. Коливання напруги не повинні перевищувати $\pm 10\%$.

Стабілізована мережа = 24 В (DC) для живлення мікропроцесорного ядра ПЛК, панелі оператора (НМІ), польових датчиків та котушок проміжних реле. Рівень пульсацій не повинен перевищувати 5%.

Для запобігання втраті даних та забезпечення штатного завершення роботи контролера у разі раптового знеструмлення цеху, обов'язковим є використання джерела безперебійного живлення (ДБЖ / UPS) для кола мікропроцесорної техніки.

8.4.2. Вибір апаратури контролю, живлення та захисту

На основі висунутих вимог розроблено схему розподілу живлення шафи автоматики (див. Додаток Д). Ввід живлення здійснюється через головний вимикач-роз'єднувач.

Для генерації постійного струму (24 В) використано два незалежні імпульсні блоки живлення.

Перший блок (G1) виділено виключно для живлення панелі оператора.

Другий блок (G2) живить ПЛК та польову периферію.

Таке розділення підвищує загальну надійність системи та захищає чутливу електроніку від перехресних електромагнітних завад.

Для захисту первинних кіл блоків живлення від короткого замикання обрано модульні автоматичні вимикачі з номінальним струмом 3 А. Додатково в шафі передбачено допоміжні сервісні кола, ізольовані від ПЛК; розетку для підключення програматора (захищену автоматом малого номіналу) та автоматичне LED-освітлення шафи, що спрацьовує від кінцевого вимикача дверцят.

8.5. Розробка схем компонування технічних засобів у шафі керування

8.5.1. Вимоги до захисту оболонки

Враховуючи особливості умов експлуатації в тістоприготувальному відділенні (наявність дрібнодисперсного борошняного пилу, підвищена вологість та необхідність регулярного вологого санітарного прибирання), до оболонки шафи керування висуваються жорсткі вимоги.

Для забезпечення безвідмовної роботи мікропроцесорної техніки ступінь захисту шафи повинен бути не нижче IP54 (за стандартом ІЕС 60529), що гарантує захист від пилу та бризок води. Фронтальна панель оператора TP1900 Comfort, яка монтується у дверцята, має заводський ступінь захисту фронтальної частини IP65, що дозволяє безпечно взаємодіяти з інтерфейсом навіть вологими руками або в процесі мийки обладнання.

Товщина стінки шафи в місті монтажного вирізу складає 2 - 6 мм що забезпечує клас захисту IP65.

8.5.2. Вибір конструктивного виконання

На основі габаритних розрахунків апаратної бази ПЛК та ергономічних вимог до робочого місця оператора-технолога, обрано настінний варіант виконання металевої шафи керування (наприклад, типу Rittal серії AX/KX або аналог).

Габаритні розміри шафи складають:

- ширина = 600 мм,
- висота = 800 мм,
- глибина = 300 мм.

Глибина шафи (300 мм) обрана з урахуванням габаритів модулів Siemens S7-1500 (глибина 129 мм) та забезпечення необхідного простору (не менше 100 мм) для дотримання радіусів згину комутаційних і мережевих кабелів (PROFINET). На фронтальних дверцятах виконано монтажний виріз (465×319 мм) для встановлення 19-дюймової НМІ панелі.

8.5.3. Компонування технічних засобів

Внутрішнє комплектування технічних засобів виконано за зональним принципом з урахуванням вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) та забезпечення природної конвекції повітря (теплового режиму). Креслення загального вигляду та внутрішньої монтажної панелі наведено у Додатку Е.

Розподіл елементів на монтажній панелі наступний:

- Зона ПЛК (Центральна частина)

На стандартній DIN-рейці TS35 (довжиною 400 мм) змонтовано системний блок живлення (PS 60W), центральний процесор (CPU 1516-3) та модулі розширення I/O (DI, DQ, AI, AQ). Сумарна ширина модулів становить 280 мм. Праворуч на рейці передбачено технологічний резерв (70 мм) для встановлення додаткових модулів у майбутньому.

- Зона комутації (Нижня частина)

Під ПЛК розташовані клемні колодки ($X1...Xn$) для підключення зовнішніх польових кабелів від датчиків та виконавчих механізмів. Це забезпечує зручність монтажу та обслуговування.

- Кабельні траси

Вертикальна прокладка внутрішньоциотових проводів здійснюється у пластикових перфорованих кабель-каналах шириною 80 мм, розташованих з обох боків від модулів.

- Вентиляційні зазори

Згідно з інструкціями з монтажу Siemens, над та під кошиком ПЛК витримано необхідні теплові зазори. Верхня (120 мм) та нижня (140 мм) зони залишені вільними для забезпечення безперешкодної циркуляції повітря та введення зовнішніх кабелів через сальникові панелі у дні шафи.

8.6. Розробка таблиць з'єднань у шафі керування

Принципи внутрішньощитового монтажу та маркування наступні.

Внутрішня комутація апаратури в шафі керування (ПЛК Siemens S7-1500, джерела живлення, комутатора PROFINET та інтерфейсних реле SIRIUS) виконується згідно з розробленими принциповими електричними схемами.

Для забезпечення надійності та ремонтпридатності системи застосовано наступні технічні рішення:

- Кабельна продукція

Монтаж слабкострумівих кіл керування (24 В DC) та підключення пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО) виконується гнучким мідним монтажним проводом типу ПВ3 (H05V-K) перерізом 0,75 мм². Для кіл живлення ПЛК використовується провід перерізом 1,5 мм². Усі проводи прокладаються у перфорованих пластикових кабель-каналах.

- Кінцювання жил

Усі багатодротяні жили окінцьовуються трубчастими наконечниками (НШВІ) з ізольованими фланцями з використанням спеціалізованого прес-інструменту. Підключення до модулів Siemens S7-1500 здійснюється через фронтальні штекери з технологією Push-in, що гарантує вібростійкість контактів без необхідності регулярного підтягування гвинтів.

- Клемні ряди

Для зручності підключення зовнішніх кабелів сформовано спеціалізовані клемні колодки:

X1 – для підключення дискретних входних сигналів (DI);

X2 – для підключення дискретних вихідних сигналів (DO);

X3 – спеціалізовані клеми із заземленням екрана (Shield) для аналогових сигналів (AI/AO).

- Маркування

Кожен провідник має унікальне літерно-цифрове маркування у вигляді пластикових маркерів (кембриків) на обох кінцях, що відповідає нумерації електричного кола на принциповій схемі. Всі апарати в шафі промарковані термопринтерними наліпками (наприклад, -PLC1, -K1, -X1).

Для систематизації інформації при складанні шафи розробляється таблиця внутрішніх з'єднань. У таблиці 8.1 наведено репрезентативний фрагмент таблиці з'єднань, що демонструє маршрутизацію сигналів живлення, цифрових інтерфейсів, дискретного вводу та релейного виводу. Повна таблиця внутрішніх з'єднань є складовою частиною робочої документації.

Таблиця 8.1 – Фрагмент таблиці внутрішніх з'єднань шафи керування

Марка проводу	Звідки йде (Апарат: Контакт)	Куди надходить (Апарат: Контакт)	Тип проводу, переріз	Примітка (Сигнал)
	Живлення 24V DC			
24V_1	-PS1: L+ (SITOP 20A)	-CPU1: 1L+ (S7-1500)	ПВЗ 1,5 мм ² (Червоний)	Живлення процесора
24V_2	-PS1: L+ (SITOP 20A)	-HMI1: X1.1 (TP1900)	ПВЗ 1,5 мм ² (Червоний)	Живлення панелі HMI
0V_1	-PS1: M (SITOP 20A)	-CPU1: 1M (S7-1500)	ПВЗ 1,5 мм ² (Синій)	Загальний мінус
0V_2	-PS1: M (SITOP 20A)	-HMI1: X1.2 (TP1900)	ПВЗ 1,5 мм ² (Синій)	Загальний мінус
	Мережа PROFINET			
PN_1	-CPU1: X1 P1 (S7-1500)	-SW1: P1 (SCALANCE)	Patch-cord Cat.5e	Мережа ПЛК → Комутатор
PN_2	-HMI1: X2 P1 (TP1900)	-SW1: P2 (SCALANCE)	Patch-cord Cat.5e	Мережа HMI → Комутатор
	Дискретні входи (DI)			
101	-X1: 1 (Клемник входу)	-DI1: CH0 (ПЛК Вхід 0.0)	ПВЗ 0,75 мм ² (Сірий)	Аварійний стоп (SB1)
110	-X1: 10 (Клемник входу)	-DI1: CH10 (ПЛК Вхід 1.2)	ПВЗ 0,75 мм ² (Сірий)	Рівень солі LSL2
	Дискретні виходи (DO)			

Марка проводу	Звідки йде (Апарат: Контакт)	Куди надходить (Апарат: Контакт)	Тип проводу, переріз	Примітка (Сигнал)
205_A	-DQ1: CH4 (ПЛК Вихід 0.4)	-K1: A1 (Котушка реле)	ПВ3 0,75 мм ² (Білий)	Команда на клапан KL1
205_B	-K1: 14 (NO контакт реле)	-X2: 5 (Клемник виходу)	ПВ3 0,75 мм ² (Білий)	Сигнал 24V на клапан KL1
0V_K1	-PS1: M (Шина 0V)	-K1: A2 (Котушка реле)	ПВ3 0,75 мм ² (Синій)	Нуль для реле K1

8.7. Розробка схем зовнішніх електричних проводок та компонування робочого місця оператора-технолога

8.7.1. Характеристика середовища та вибір кабельної продукції

Зовнішні електричні проводки прокладаються у виробничому приміщенні тістоприготувального відділення. Характерними ознаками даного середовища є підвищена концентрація дрібнодисперсного борошняного пилу, наявність вібрацій від роботи місильних органів та періодичне проведення вологого санітарного прибирання обладнання.

- Виходячи з технологічних параметрів, зовнішні проводки поділяються на три несумісні групи, які прокладаються в окремих металевих лотках з дотриманням дистанції не менше 200 мм один від одного для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС):

1. Силові кола (~400 В)

Живлення електродвигунів від частотних перетворювачів та електроприводів AUMA. Використовується кабель ВВГнг-LS (не поширює горіння, зі зниженим димо- та газовиділенням). Для зниження електромагнітної емісії від ШІМ-інверторів частотних перетворювачів силові кабелі двигунів мають бути екранованими.

2. Слабкострумові кола керування та дискретні сигнали (=24 В DC)

Підключення кінцевих вимикачів, датчиків рівня (SITRANS), кнопок місцевого посту та електромагнітних реле клапанів Bürkert. Оскільки сигнали 24 В є відносно завадостійкими, обрано контрольний кабель марки КВВГнг з кількістю жил від 4 до 10 та перерізом 0,75 мм².

3. Аналогові сигнали (4-20 мА)

Підключення датчиків температури тіста (Pt100) та ліній зворотного зв'язку позиціонерів АУМА. Для повного виключення наведень обрано екранований кабель передачі даних типу LiYCY 2x0,75 та LiYCY 4x0,75. Екран кабелю заземлюється односторонньо (з боку шафи ПЛК) для запобігання утворенню «земляних петель».

- Промислова мережа (PROFINET)

Для зв'язку ПЛК із частотними перетворювачами та панеллю оператора застосовується спеціалізований промисловий кабель PROFINET Type B (вита пара Cat. 5e) зеленого кольору із подвійним екрануванням (фольга + мідне обплетення).

- Для з'єднання зовнішніх кабелів у польових клемних коробках та шафі керування обрано безгвинтові пружинні клеми типу Push-In (наприклад, WAGO або Phoenix Contact), які не потребують обслуговування та гарантують надійний контакт в умовах вібрацій.

8.7.2. Опис схеми розташування АРМ оператора та мережевих зв'язків

Автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора-технолога інтегроване безпосередньо у фронтальні дверцята головної шафи керування. Таке просторове компонування дозволяє оператору візуально контролювати роботу тістоприготувального агрегату та одночасно відслідковувати параметри на екрані.

Сенсорна панель Siemens TP1900 Comfort встановлена на ергономічній висоті (1,5 м від рівня підлоги). Фронтальна частина панелі має ступінь захисту IP65, що забезпечує абсолютну стійкість до борошняного пилу та дозволяє проводити вологе прибирання без ризику пошкодження електроніки. Для забезпечення інформаційної взаємодії розроблено схему мережевих зв'язків та живлення мікропроцесорної техніки (Додаток Ж).

Як видно зі схеми, живлення ПЛК (CPU 1516-3PN/DP) та панелі оператора (TP1900) здійснюється незалежними лініями 24V DC із власними апаратами захисту (автоматичні вимикачі +SA-F1 та +SA-F3 відповідно). Це

запобігає повному знеструмленню системи у разі короткого замикання на одній із гілок.

Інформаційний обмін реалізовано через шину PROFINET. Пристроєм присвоєно статичні IP-адреси в одній підмережі:

ПЛК (Master): 192.168.0.1

Панель HMI: 192.168.0.2

На схемі також передбачено резервний мережевий порт (IP: 192.168.0.11) для підключення інженерної станції (ПК) наладчика. Це дозволяє проводити онлайн-моніторинг ПД-регуляторів, завантаження програми та діагностику системи без втручання в робочий процес оператора.

8.8. Охорона праці

8.8.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) та заходи щодо їх усунення

Робоче місце оператора-технолога знаходиться безпосередньо у виробничому приміщенні, оскільки панель оператора (HMI) вбудована у дверцята шафи керування поблизу тістоприготувального агрегату. У процесі нормальної експлуатації системи на оператора діють наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори (НШВФ):

1. Фактори, пов'язані з роботою за дисплеєм (HMI панель)

- Вплив:

Зорове напруження через мерехтіння екрана, відблиски, нераціональну яскравість, а також статичне напруження м'язів шиї при незручному куті огляду мнемосхеми.

- Заходи усунення:

Застосовано промислову панель Siemens TP1900 Comfort із TFT-матрицею, що не має мерехтіння та шкідливого електромагнітного випромінювання. Екран має антиблікове покриття з автоматичним регулюванням яскравості. Для уникнення порушень постави панель змонтовано на ергономічній висоті 1,5–1,6 м від рівня підлоги. Згідно з

санітарними нормами, загальне штучне освітлення робочої зони оператора становить не менше 300 лк.

2. Фактори виробничого середовища (Тістомісильна ділянка)

- Вплив:

Запиленість робочої зони борошняним пилом (аерозолі фіброгенної дії), шум від роботи редукторів і двигунів (M1–M4), небезпека ураження електричним струмом.

- Заходи усунення:

Для боротьби з пилом передбачено місцеву витяжну вентиляцію над бункером борошна (E1). Шафа керування має ступінь захисту IP54. Для захисту від ураження струмом усі металеві неструмопровідні частини агрегату та шафи автоматики підлягають захисному заземленню (система TN-S). Панель оператора і кнопки керування живляться безпечною наднизькою напругою 24 В постійного струму. Для зниження впливу шуму (якщо рівень перевищує 80 дБА) оператор забезпечується засобами індивідуального захисту органів слуху.

8.8.2. Заходи безпеки при проведенні планово-попереджувальних (ПВР) та аварійно-відбудовних робіт

Технічне обслуговування, ремонт та налагодження засобів автоматизації (ПЛК, датчиків, приводів AUMA та Bürkert) повинно виконуватися електротехнічним персоналом із групою з електробезпеки не нижче III. Для забезпечення безпеки під час робіт розроблено наступні заходи.

Перед початком робіт у силовій шафі необхідно зняти напругу головним рубильником та вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди» (міжнародний стандарт ізоляції джерел енергії LOTO – Lockout/Tagout).

Заміна або перевірка приводів шиберів (Z1–Z4) допускається лише після повної зупинки двигунів агрегату та механічного блокування рухомих частин від випадкового опускання під власною вагою.

Під час програмного налагодження категорично забороняється примусове (форсоване) включення виходів ПЛК, якщо в робочій зоні механізмів знаходяться люди.

Усі роботи з налаштування параметрів ПД-регуляторів проводяться виключно через захищений паролем екран «АРМ Наладчика», що виключає несанкціоноване втручання сторонніх осіб у роботу системи під час ПВР.

8.8.3. Можливі аварійні ситуації, їх локалізація та шляхи евакуації

У процесі експлуатації автоматизованого тістоприготувального агрегату можливе виникнення наступних аварійних ситуацій:

1. Заклинювання місильного органу (перевантаження двигуна M2).

Наслідок: Перегрів обмоток, ризик пожежі.

Локалізація: Апаратно-програмний захист. Автоматичний вимикач розриває силове коло, а його блок-контакт подає сигнал у ПЛК (bErr_M2_Overload), що миттєво активує алгоритм повної безпечної зупинки агрегату (програмний Крок 999).

2. Загоряння в шафі керування (коротке замикання).

Локалізація: Застосування негорючих кабельних коробів та проводів з ізоляцією типу LSZH (Low Smoke Zero Halogen). Гасіння пожежі здійснюється вуглекислотними (ВБК) або порошковими (ВП) вогнегасниками, які безпечні для використання в електроустановках під напругою до 1000 В.

3. Загоряння осілого борошняного пилу (при короткому замиканні або перегріві обладнання).

Локалізація: Оскільки борошняний пил є горючим матеріалом, а у зволоженому стані – струмопровідним, зона навколо дозаторів потребує підвищеної пожежної та електричної безпеки. Усі польові пристрої (електродвигуни, приводи AUMA, датчики) обрані у закритому виконанні зі ступенем захисту корпусу не нижче IP65. Це повністю унеможливило потрапляння пилу всередину корпусів до струмовідних частин, що виключає ризик іскроутворення та займання.

Вимоги до шляхів евакуації наступні:

Приміщення цеху повинно мати не менше двох евакуаційних виходів. Ширина основних проходів уздовж лінії обладнання має бути не менше 1,5 м. Шляхи евакуації не повинні перекриватися сировиною або тарою, оснащуються покажчиками напрямку руху, що світяться, та аварійним автономним освітленням.

З метою забезпечення безпечних умов праці під час пусконаладжувальних робіт, експлуатації та технічного обслуговування розробленої системи автоматизації тістомісильного агрегату, було розроблено «Інструкцію з охорони праці для інженера-електронника». Даний нормативний документ враховує специфіку роботи з мікропроцесорною технікою Siemens, промисловими електроприводами та наявність небезпечних факторів харчового виробництва (запиленість, вологість, хімічні реагенти). Повний текст розробленої інструкції наведено у Додатку Л.

Інструкція є актом з охорони праці підприємства, що містить обов'язкові для дотримання працівниками вимоги з охорони праці при виконанні ними робіт певного виду або за певною професією на всіх робочих місцях, у виробничих приміщеннях, на території підприємства, будівельних майданчиках або в інших місцях, де за дорученням роботодавця чи уповноваженого ним органу виконуються ці роботи, трудові чи службові обов'язки.

9. ПОПЕРЕДНЄ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ САК.

9.1. Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію системи автоматизації

9.1.1. Визначення вартості комплексів засобів автоматизації

Для модернізації системи керування тістоприготувальним агрегатом обрано сучасне обладнання провідних європейських виробників. Кошторисна вартість розрахована на основі актуальних прайс-листів офіційних дистриб'юторів станом на поточний рік. Ціни наведено у єдиній валюті (€) для нівелювання курсових різниць, що є стандартом при формуванні специфікацій на імпордне промислове обладнання.

Таблиця 9.1 – Кошторисна вартість апаратного забезпечення САК

№	Найменування обладнання (з урахуванням резерву)	К-сть	Ціна за од. (€)	Сума (€)
1	ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1516 + Модулі I/O)	1 компл.	4100	4100
2	Панель оператора Siemens TP1900 Comfort (19")	1 шт.	3800	3800
3	Перетворювачі частоти SINAMICS G120C (1,1 ... 7,5 кВт)	4 шт.	450 (сер.)	1800
4	Інтелектуальні приводи AUMA SAR + AC 01.2 (для Z3, Z4)	2 шт.	2500	5000
5	Приводи AUMA NORM SA + LE (для Z1, Z2)	2 шт.	1400	2800
6	Санітарні дискові затвори з електроприводом Bürkert 3005	4 шт.	800	3200
7	Датчики (SITRANS LVS/LVL, TS300), реле SIRIUS та шафа Rittal	1 компл.	2500	2500
8	Всього вартість апаратного забезпечення ($K_{обл}$):			23200

9.1.2. Визначення величини первинних інвестицій

Первинні капітальні інвестиції (K_{inv}) формуються з вартості обладнання, розробки програмного забезпечення (алгоритмів ПЛК та SCADA) та

будівельно-монтажних робіт. Згідно з розцінками інжинірингових компаній, частка цих робіт розраховується у відсотках від вартості апаратної частини:

Вартість обладнання ($K_{\text{обл}}$) = 23200 €

Розробка ПЗ, інжиніринг та проектна документація (25% від $K_{\text{обл}}$) = 5800 €

Електромонтажні та пусконаладжувальні роботи (15% від $K_{\text{обл}}$) = 3480 €

Загальна сума первинних інвестицій (K_{inv}):

$$K_{\text{inv}} = 23200 + 5800 + 3480 = 32480 \text{ €}$$

9.2. Розрахунок показника економічного ефекту від модернізації системи керування

9.2.1. Вплив потенційних джерел економічної ефективності на показники САК

Впровадження розробленої системи створює три ключові джерела економічної ефективності:

1. Підвищення якості та зниження браку

Завдяки впровадженню алгоритмів автономної САК, динамічний компенсатор усунув перехресний вплив потужності на температуру. Це повністю виключило ризик теплового перегріву дріжджової маси в умовах транспортного запізнення.

2. Енерго- та ресурсозбереження

Переведення головних приводів на частотне керування (PROFINET) нівелює пускові струми та оптимізує енергоспоживання.

3. Збільшення ресурсу механіки

Застосування плавного пуску в густому тісті продовжує життєвий цикл редукторів місильних органів щонайменше у 1,5 рази, знижуючи витрати на ремонт.

9.2.2. Зміна річних поточних витрат при експлуатації

На основі актуальних тарифів на енергоносії для промисловості України та ринкової вартості харчової сировини, річне зниження поточних експлуатаційних витрат (OPEX) складає:

- економія електроенергії (за рахунок ПЧ) $\approx 2500 \text{ € / рік}$.

- зменшення втрат сировини (зниження браку на 85%) ≈ 8000 € / рік.
- економія на ТО та ремонтах механічної частини ≈ 2000 € / рік.

Загальне зниження поточних витрат (ΔC):

$$\Delta C = 2500 + 8000 + 2000 = 12500 \text{ € / рік.}$$

9.2.3. Визначення додаткового обсягу реалізованої продукції

Збільшення продуктивності агрегату досягається за рахунок двох факторів:

1. Оптимізації перехідних режимів (застосування розробленого алгоритму автоматичного каскадного пуску суттєво скорочує час виходу лінії на задані параметри).
2. Жорсткої синхронізації подачі інгредієнтів (керування приводами дозаторів через PROFINET ліквідує розбалансування рецептури, що раніше вимагало технологічних мікро-простой для ручного коригування режиму або очищення робочих органів).

У комплексі ці інновації дозволяють підвищити загальну ефективність обладнання та коефіцієнт використання машинного часу на 3,5 %.

При паспортній продуктивності агрегату 600 кг/год, ефективний річний обсяг випуску при 3-змінній роботі (330 робочих днів) становить близько 4 500 тонн тіста на рік. Отже, додатковий річний обсяг випуску продукції складає:

$$\Delta V = 4500 \cdot 0,035 = 157,5 \text{ тонн / рік.}$$

9.2.4. Розрахунок додаткового прибутку за рахунок збільшення продуктивності

Для визначення фінансового еквіваленту від збільшення продуктивності використовується показник питомого маржинального прибутку ($P_{\text{пит}}$).

Оскільки тістова маса є напівфабрикатом для подальшого випікання, розрахунок базується на середньогалузевих показниках рентабельності хлібопекарських підприємств. За експертними оцінками галузі, усереднений чистий прибуток у перерахунку на 1 тону виробленої тістової маси становить близько 20 € / тону (що еквівалентно рентабельності 5-8% від гуртової ціни кінцевого продукту, оскільки середня оптова ціна 1 кг базового

хлібобулочного виробу в Україні зараз становить близько 25-30 грн ($\approx 0,6-0,7$ €)).

Оскільки додатковий обсяг продукції (ΔV) виготовляється в межах існуючого фонду робочого часу лінії та не вимагає залучення додаткового персоналу або розширення виробничих площ (тобто умовно-постійні витрати не зростають), весь приріст продуктивності генерує прямий додатковий прибуток підприємства.

Розрахунок додаткового річного прибутку виконується за формулою:

$$\Delta P = \Delta V \cdot P_{\text{пит}},$$

де

$\Delta V = 157,5$ т/рік – додатковий обсяг випуску;

$P_{\text{пит}} = 20$ €/т – питомий прибуток.

$$\Delta P = 157,5 \cdot 20 = 3150 \text{ € / рік.}$$

9.2.5. Розрахунок економічного ефекту від модернізації системи керування

Загальний річний економічний ефект (E_p) формується як сума додаткового прибутку та зекономлених експлуатаційних витрат:

$$E_p = \Delta P + \Delta C = 3150 + 12500 = 15650 \text{ € / рік.}$$

Термін окупності капітальних інвестицій (T_p) розраховується як відношення первинних інвестицій до річного економічного ефекту:

$$T_p = K_{\text{inv}} / E_p = 32480 / 15650 \approx 2,07 \text{ року (25 місяців).}$$

Проведене попереднє техніко-економічне обґрунтування доводить високу доцільність впровадження розробленої САК. Незважаючи на значні початкові інвестиції у преміальне обладнання (32 480 €), розрахований термін окупності становить 2 роки та 1 місяць, що є відмінним показником для харчової промисловості (У хлібопекарській промисловості нормативний термін окупності (T_n) для капітальних вкладень та інвестицій становить від 5 до 6 років). Проект є високорентабельним і рекомендованим до практичної реалізації.

ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було успішно вирішено актуальну науково-технічну задачу – розроблено комплексну систему автоматичного керування (САК) технологічним процесом приготування тіста у двокамерному агрегаті безперервної дії.

На основі проведених досліджень та проектно-конструкторських робіт зроблено наступні висновки:

- Аналіз об'єкта та ідентифікація

Доведено, що двокамерний тістомісильний агрегат є складним багатозв'язним об'єктом. На основі експериментальних даних у середовищі MATLAB виконано параметричну ідентифікацію математичних моделей каналів керування та збурень. Встановлено, що процеси адекватно описуються аперіодичними ланками першого та другого порядків із запізненням.

- Синтез системи автоматичного регулювання (САР)

Доведено неефективність застосування класичних незалежних ПІД-регуляторів через наявність сильного перехресного зв'язку між каналом потужності замісу та температурою тіста. Синтезовано автономну САР із динамічним компенсатором збурень. Імітаційне моделювання в Simulink підтвердило, що розроблена структура повністю усуває перерегулювання та зменшує динамічне відхилення температури у 4,5 рази порівняно з базовою системою.

- Розробка алгоритмів логічного керування

Розроблено та формалізовано жорсткі алгоритми технологічного пуску, планової та аварійної зупинки агрегату. Логіку керування успішно реалізовано мовою високого рівня SCL у середовищі TIA Portal. Тестування в S7-PLCSIM підтвердило абсолютну надійність апаратних і програмних блокувань (Safety Interlocks).

- Інтеграція робототехніки

Для автоматизації подачі мікроінгредієнтів розроблено алгоритм просторового переміщення для колаборативного маніпулятора UR5e. Віртуальні випробування у середовищі CoppeliaSim довели кінематичну досяжність цільових точок та безпеку реалізованого методу «м'якого захоплення» (Soft Hold).

- Апаратна реалізація

Спроековано технічну структуру САК на базі сучасної платформи Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1516-3 PN/DP). Вибрано інтелектуальні польові пристрої: перетворювачі SINAMICS G120C, електроприводи AUMA, гігієнічні датчики SITRANS. Розроблено пакет інженерної документації (P&ID, принципові електричні схеми DI/DQ/AI/AQ, схеми компонування), що відповідає міжнародним стандартам та правилам електробезпеки.

- Розробка SCADA-системи

Створено ергономічний людино-машинний інтерфейс на базі панелі оператора TP1900 Comfort, який забезпечує повний візуальний контроль процесу, ведення архівів (Alarm Log) та розмежування прав доступу інженерного і технологічного персоналу.

- Економічна ефективність

Розрахунки довели високу інвестиційну привабливість проекту. Впровадження розробленої САК дозволить зменшити енергоспоживання приводів, подовжити ресурс механіки та звести до мінімуму випуск бракованої продукції. Термін окупності капітальних інвестицій становить близько 2,07 року (25 місяців), що робить проект високорентабельним та цілком готовим до практичної реалізації на діючому хлібопекарському підприємстві.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015 Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ, ДП УкрНДНЦ, 2016. 31 с.

https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf

2. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу "Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів" [Електронний ресурс] : для студентів, які навчаються за спец. 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. А. Хобін ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем. — Одеса : ОНАХТ, 2016. — Електрон. текст. дан.: 96 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.157312>

3. Хобін В.А., Світий І.М. Теорія автоматичного керування: Посібник до виконання комплексної курсової роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2020. – 277 с.

4. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб./ В. Г. Муратов. — Вид. 2-ге, допов. — Київ : Освіта України, 2016. — 364 с.

<https://elc.library.onaft.edu.ua/libraryw/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.155904>

5. Савицький, В. К. Технічні засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб. /В.К. Савицький, Р.М. Федоришин; Нац. ун-т "Львівська політехніка".— Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. - 292 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/libraryw/DocumentSearchResult;jsessionid=6CD40B15F14DD9265BF7FD9A559C892C>

6. Левінський В. М. Конспект курсу лекцій з курсу "Технічні засоби автоматизації". Розділ "Виконавчі пристрої" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехн. систем. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Електрон. текст. дані: 150 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.162866>

7. Левінський В. М. Основи створення проектів автоматизації в середовищі ТІАPortal [Електронний ресурс] : електрон. навч. посіб. для підгот. студентів спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — Електрон. текст. дані: 177 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.166190>

8. Пупена О.М., Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI. : Навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 594 с.

9. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-98#Text>

10. ANSI/ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems Copyright: 2015 Length: 64 pages

11. Автоматизація виробничих процесів [Текст] : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед ; Нац. ун-т харч. технологій. — Вид. 2-ге, випр. — Київ : Ліра-К, 2017. — 378 с. — Бібліогр.: с. 376-377.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ.1739079>

12. Трегуб Віктор Григорович Проектування систем автоматизації [Текст] : навч. посіб. / В. Г. Трегуб ; Нац. ун-т харч. технологій. — Київ : Ліра-К, 2017. — 344 с. : табл., рис. — Бібліогр.: с. 341.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.161435>

13. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці : конспект лекцій [Електронний ресурс] / О. О. Фесенко, В. М. Лисюк, С. М. Неменуца, З. М. Сахарова ; Каф. безпеки життєдіяльності. — Одеса : ОНАХТ, 2021. — Електрон. текст. дані: 149 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ.1739079>

14. Методичні вказівки до економічної складової кваліфікаційної роботи бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» /Укладачі д.е.н., проф. Савенко І.І., к.е.н., доц. Корсікова Н.М., Одеса: ОНТУ, 2022. 10 с.

15. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Національний стандарт України «Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах» – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.

<http://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/11-dstu-b-a.2.4-162008.pdf>

16. «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок ДНАОП 0.00-1.32-01» затверджений Наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 21.06.2001 р. №272
17. «ПРАВИЛА УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК», затверджено Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476
18. Электроприводы для автоматизации промышленной арматуры. Технический каталог. – AUMA Riester GmbH & Co. KG, 2014. URL: <https://www.auma.com/>
19. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги.
20. DIN EN 15714-2. Industrial valves - Actuators - Part 2: Electric actuators for industrial valves - Basic requirements.
21. SIMATIC S7-1500, ET 200MP Automation system: System Manual. – Siemens AG, 2023. URL: <https://support.industry.siemens.com/>
22. SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control: Function Manual. – Siemens AG, 2023.
23. Electrical Rotary Actuator Type 3005: Datasheet. – Bürkert Fluid Control Systems, 2023. URL: <https://www.burkert.com/>
24. Sanitary Butterfly Valve Type 2671: Datasheet. – Bürkert Fluid Control Systems, 2022.