МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота / проєкт

першого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Проєкт автоматизації печі тунельного типу в умовах виробництва хлібобулочних виробів. Система автоматичного регулювання температурного режиму»

Виконав: здобувач 4 курсу, групи 6.1512
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва освітньої програми)
Р.О. Лепехов
(ініціали та прізвище)
Керівник Міняйло Н.О., доцент, канд. тех. наук
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Курілець І. А.

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології»
(код та назва)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри Д.М. Морозов

"___" _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ
Лепехову Роману Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) Проєкт автоматизації печі тунельного типу в умовах виробництва хлібобулочних виробів. Система автоматичного регулювання температурного режиму
Керівник роботи (проєкту) Міняйло Н.О., доцент, канд. тех. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-С
2. Строк подання студентом роботи 01 чевря 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: дані отримані під час виробничої практики, аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому об'єкті, технічна документація, ДСТУ
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вивченння особливостей функціонування ПХС-25М; аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка технічного завдання; проєктування системи автоматизації; розробка технічної документації; розрахунок надійності системи автоматизації; замовна специфікація на весь комплекс технічних засобів системи автоматизації; організаційне забезпечення системи автоматизації та розрахунок техніко-економічних показників; техніка безпеки та охорона праці, висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) піч ПХС-25М, як об'єкт управління; схема інформаційних потоків; функціональна схема автоматизації; принципові електричні схеми; монтажна комутаційна схема щита КВПіА; зовнішній вигляд щита КВПіА; схема

зовнішніх з'єднань; результати моделювання САР; проєктне компонування на програмування контролера; техніка безпеки та охорона праці; техніко-економічні показники; висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Міняйло Н.О., доцент	11.02.2026	13.02.2026
2	Міняйло Н.О., доцент	25.02.2026	27.02.2026
3	Міняйло Н.О., доцент	12.03.2026	13.03.2026
4,5	Міняйло Н.О., доцент	26.03.2026	27.03.2026
6	Міняйло Н.О., доцент	30.04.2026	01.05.2026
7	Міняйло Н.О., доцент	05.05.2026	07.05.2026
8	Міняйло Н.О., доцент	18.05.2026	20.05.2026

7. Дата видачі завдання «02» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	13.02.2026 – 20.02.2026	
2	Розробка схеми інформаційних та матеріальних потоків	20.02.2026 – 25.02.2026	
3	Розробка технічного завдання	27.02.2026 – 11.03.2026	
4	Проєктування системи автоматизації хлібопекарської печі тунельного типу	13.03.2026 – 25.03.2026	
5	Розробка технічної документації	27.03.2026 – 15.04.2026	
6	Розрахунок надійності системи автоматизації	15.03.2026 – 29.04.2026	
7	Розробка специфікації на комплекс засобів автоматизації	01.05.2026 – 04.05.2026	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	07.05.2026 – 17.05.2026	
9	Розгляд питань охорони праці та безпеки	20.05.2026 – 28.05.2026	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормоконтролю, підготовка доповіді	01.06.2026 – 10.06.2026	

Студент _____ (підпис) Р.О. Лепехов (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ (підпис) Н.О. Міняйло (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) А.В. Колосок (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Лепехов Р.О. Проєкт автоматизації печі тунельного типу в умовах виробництва хлібобулочних виробів. Система автоматичного регулювання температурного режиму.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», науковий керівник Міняйло Н.О., Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

У кваліфікаційній роботі бакалавра виконано дослідження автоматизованої системи регулювання температурного режиму хлібопекарської печі тунельного типу моделі ПХС-25М, визначено основні недоліки існуючих методів керування та запропоновано шляхи їх удосконалення. Визначено вимоги до системи автоматизації, розроблено комплект технічної документації, сформована замовна специфікація.

Виконано вибір та обґрунтування технічних засобів, включаючи датчики температури, перетворювачі тиску, датчики вологості, PLC-котролер M580 BMEP581020 фірми Schneider Electric та виконавчі механізми. Визначено перелік сигналів СА, розроблено інтерфейс АРМ оператора, алгоритм роботи системи регулювання температури, а також параметри, що контролюються під час роботи печі.

Розроблено прикладне програмне забезпечення для моніторингу і керування температурним режимом. Виконано розрахунок надійності системи та техніко-економічне обгрунтування проєкту.

Пояснювальна записка містить 118 сторінок, 70 рисунків, 31 таблицю, 2 додатки на 10 сторінках та список використаних джерел із 73 найменувань.

Ключові слова: хлібопекарська піч, випікання, температурний режим, сенсор, контролер, виконавчий механізм, регулювання, автоматизована система керування, програмне забезпечення, алгоритм, проєкт, надійність.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

1 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПХС-25М 9

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи 9

1.2 Етапи технологічного процесу випікання хліба 13

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації хлібопекарської печі тунельного типу на діючому виробництві 15

1.4 Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків 17

1.5 Стан рівня автоматизації на аналогічних об'єктах підприємств України та зарубіжжя 18

1.6 Недоліки існуючої системи управління 20

2. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ 22

2.1 Вимоги до системи в цілому 22

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система 23

2.3 Вимоги до видів забезпечення 25

3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 27

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА 27

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру 29

3.3 Розробка математичної моделі системи управління 31

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА 37

3.4.1 Первинні перетворювачі, нормуючі пристрої, вторинні прилади .. 38

3.4.2 Промислові контролери 57

3.4.3 Виконавчі механізми та регулюючі органи 65

3.5 Графічний інтерфейс ARM оператора-технолога 77
4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ 80
4.1 Функціональна схема автоматизації 80
4.2 Принципова електрична схема 84
4.3 Принципова електрична схема живлення 85
4.4 Монтажна комутаційна схема щита КВПіА 86
4.5 Зовнішній вигляд щита та вид на внутрішні панелі 86
4.6 Схема зовнішніх з'єднань 87
5. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 89
5.1 Вимоги до надійності САР 89
5.2 Розрахунок надійності для САР температури печі ПХС-25М 89
6. ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА ВЕСЬ КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 93
7. ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ 94
7.1 Організаційне забезпечення системи автоматизації 94
7.2 Розрахунок техніко-економічних показників 95
8. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ 104
8.1. Аналіз стану виробничої санітарії та гігієни праці 104
8.2. Організаційно-технічні заходи з охорони праці 104
8.3 Електробезпека 105
8.4. Пожежна безпека 106
8.5 Охорона навколишнього середовища 107
ВИСНОВОК 109
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ 112

Додаток А Програмна реалізація управління температурою спалювальних газів в топках І і ІІ зон……119

Додаток Б Замовна специфікація на комплекс технічних засобів……..128

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості є одним із пріоритетних напрямів підвищення якості продукції, забезпечення стабільності виробництва та зниження енерговитрат. У хлібопекарській галузі особливе значення має точне дотримання температурного режиму під час випікання, оскільки саме цей параметр безпосередньо впливає на формування структури м'якуша, стан скоринки, вологість та смакові характеристики готових хлібобулочних виробів.

Піч тунельного типу широко використовується в умовах промислового виробництва хлібобулочних виробів завдяки безперервності процесу, високій продуктивності та можливості зонального регулювання температури. Проте, чинники, такі як нестабільність теплових режимів, коливання виробничого навантаження, зміни у властивостях сировини та вплив зовнішніх умов, потенційно спричиняють відхилення від заданих якісних показників продукції та призводять до неоптимального споживання енергоресурсів.

У сучасних умовах виробництва зростають вимоги до точності та надійності керування технологічними параметрами. Впровадження САР температурного режиму у печі тунельного типу дозволяє забезпечити рівномірність випікання, мінімізувати вплив людського фактору, підвищити стабільність процесу та оптимізувати споживання газу або електроенергії.

У роботі передбачається аналіз технологічного процесу випікання, вибір апаратного та програмного забезпечення, обґрунтування алгоритмів регулювання та оцінка ефективності впровадження автоматизованої системи.

Практична значущість проєкту полягає у можливості застосування розробленої системи в реальних виробничих умовах для підвищення якості хлібобулочних виробів, зниження енерговитрат та забезпечення стабільності температурного режиму протягом усього циклу випікання. Автоматизація процесу створює передумови для подальшої інтеграції сучасних засобів моніторингу, прогнозування, аналітики та диспетчеризації виробництва.

1 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПХС-25М

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи

Тунельна піч представляє собою прохідну промислову установку з робочою камерою у вигляді подовженого тунелю. Вона застосовується для безперервної термічної обробки виробів, що рухаються всередині печі на вагонетках або конвеєрній стрічці.

В основі функціонування тунельної печі лежить рухома стрічка-транспортер, яка одночасно служить робочим подом для виробів. Таким чином, заготовки з тіста безперервно укладаються на стрічку і рухаються у напрямку робочої камери, проходячи всі етапи термічної обробки.

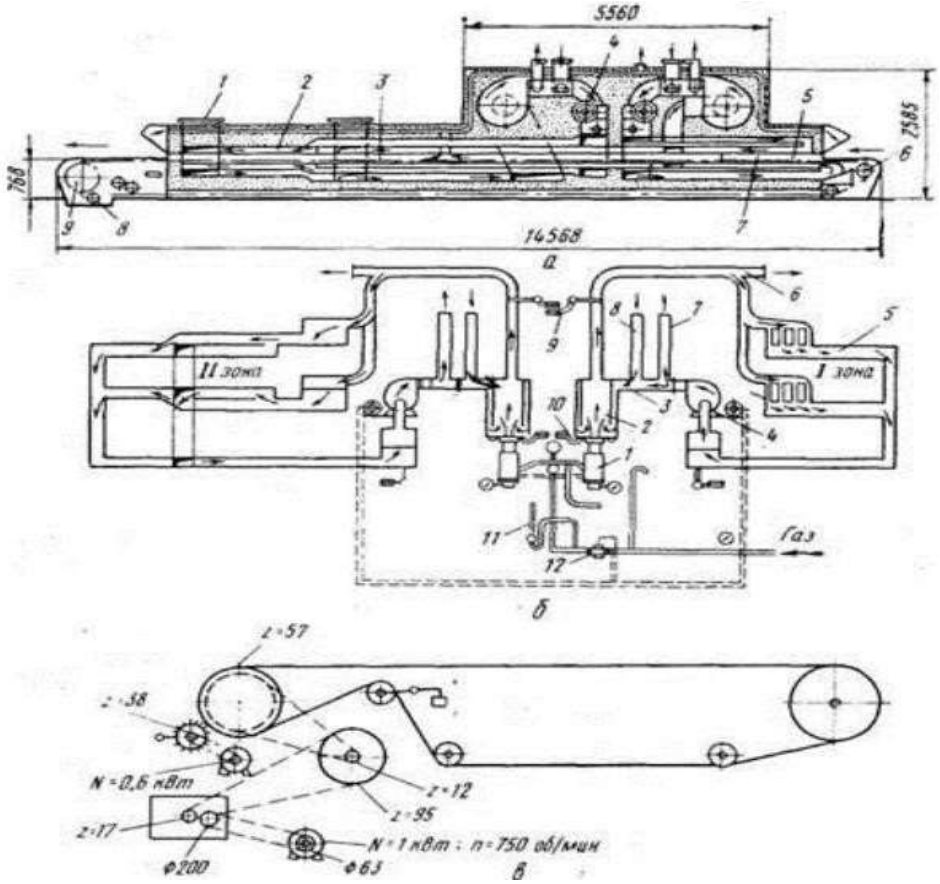
У хлібопекарській промисловості технологія випічки базується на трьох видах теплопередачі: теплопровідності, конвекції та випромінюванні. Сучасні технологічні рішення намагаються поєднати ці методи для підвищення ефективності та точності процесу випічки. Вибір оптимальних параметрів і режимів залежить від асортименту виробів. Час перебування у печі розділяється на кілька етапів з індивідуальними налаштуваннями, що дозволяє гнучко керувати технологічним процесом.

Важливим параметром у виробництві хлібобулочних виробів є гігрометрія та її контроль. Гігрометрія визначає вологість насиченого повітря і має суттєве значення для процесу випікання. Під час перших хвилин випічки в духовці додають пар, щоб запобігти передчасному висиханню тіста і забезпечити його належну пластичність перед остаточним бродінням. Крім того, пара сприяє формуванню характерного кольору виробів завдяки впливу на колірні реакції. Усе це надає можливість точного регулювання подачі пари у піч та оптимізації гігрометрії протягом усього циклу випікання [1].

Хлібопекарська піч ПХС-25М є тунельною піччю безперервної дії, призначеною для випікання широкого асортименту подових і формових

виробів. Піч використовується на підприємствах великої потужності, і забезпечує стабільну продуктивність, високу якість готової продукції та автоматизоване керування технологічними параметрами.

Схема хлібопекарської печі ПХС-25М представлена на рис. 1.1.



а - подовжній розріз: 1 - витяжні отвори і канали; 2 - верхній металевий канал; 3 - нижній металевий канал; 4 - топки, 5 - стрічковий под.; 6 - натяжний барабан; 7 - фартук; 8 - щітка; 9 - привідний барабан. [2]

б - теплова схема: 1 - інжекційні пальники; 2 - топки; 3 - клапан; 4 - димососи; 5 - металеві канали; 6 - вибухові клапани; 7 - газоход; 8 - патрубок; 9 - термопари; 10 - тягоміри; 11 - переносна свічка; 12 - електромагнітний клапан. [2]

в - кінематична схема. [2]

Рисунок 1.1 – Хлібопекарська піч ПХС-25М [2]

Основні технічні характеристики печі ПХС-25М представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики печі ПХС-25М [2]

Параметр	Значення
1.Робоча площа поду	25 м²
2.Продуктивність	14-17 т/добу
3.Ширина поду	2100 мм
4.Встановлена потужність електродвигунів	14 кВт
5.Габаритні розміри	14570×3350×2590 мм
6.Температура спалювальних газів	500-600 °С
7.Температура повітря в зонах випікання I і II	230-280 °С
8.Температура відпрацьованих газів	280-350 °С
9.Температура пари	Близько 105 °С
10.Тиск газу	2,5-5 кПа
11.Тиск пари	До 0,3 МПа
12.Тиск повітря	2-3 кПа
13.Тяга в топках	10-20 Па
14.Вологість повітря у пекарній камері	65-85 %
15.Тривалість випікання	12-72 хв

Піч ПХС-25М (рис. 1.1, а) являє собою тунельну хлібопекарську піч, конструкція якої включає пекарну камеру, верхній металевий канал 2 та нижній металевий канал 3, призначені для обігріву робочого простору. Основними елементами печі є топки 4, стрічковий под 5, натяжний барабан 6 і привідний барабан 9. Под виконаний у вигляді безперервної стрічки зі сталевої спірально-стержневої сітки, переміщення якої забезпечується приводним механізмом. Для підтримання правильного положення сітчастої стрічки натяжний барабан 6 обладнаний спеціальним регулювальним пристроєм, що дозволяє змінювати натяг правої або лівої частини стрічки. Додатково конвеєр оснащений сигналізатором, який спрацьовує у випадку порушення допустимих зазорів між кромками стрічки та боковими стінками пекарної камери [2].

Для очищення стрічкового поду 5 (рис. 1.1, а) у конструкції передбачена щітка 8 з вантажним притискним механізмом. Її привід здійснюється від окремого електродвигуна потужністю 0,25 кВт із частотою обертання 1480 об/хв через черв'ячний редуктор і систему ланцюгових передач. Привід конвеєра реалізований за допомогою електродвигуна, двох клинопасових передач, ланцюгового варіатора, комбінованого редуктора та зубчастої

передачі. Конструкція механізму також передбачає наявність ручного приводу. Завдяки використанню варіатора тривалість процесу випікання може змінюватися від 12 до 72 хв. Кінематична схема приводу наведена на рис. 1.1, в [2].

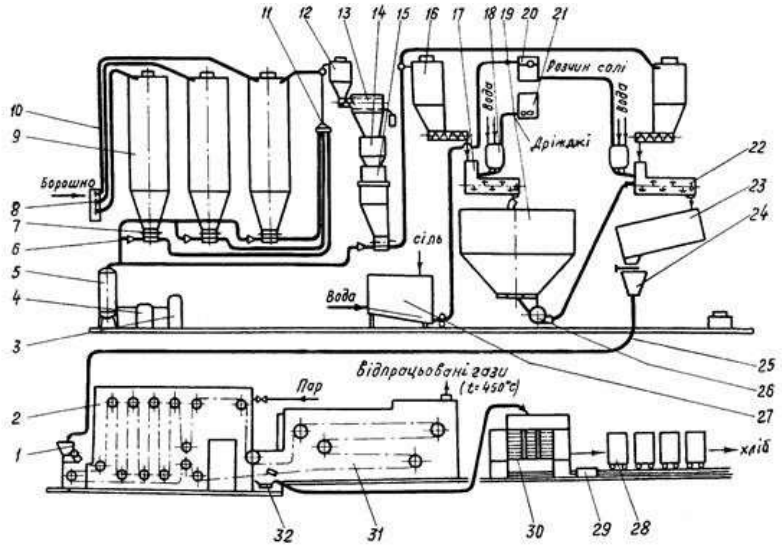
Корпус печі виконаний за каркасною схемою із застосуванням сталевих щитів із теплоізоляцією з мінеральної вати. Усередині конструкції розташовано дев'ять внутрішніх секцій. Для контролю технологічного процесу в бічних стінках пекарної камери передбачені оглядові люки. Над посадочним і розвантажувальним отворами встановлені витяжні парасольки, які з'єднані з вентиляційною системою підприємства. Видалення надлишкової вологи з пекарної камери забезпечується через витяжні отвори і канали 1 (рис. 1.1, а). Для зменшення вентиляції всередині камери змонтовані поворотні фартухи 7. У зоні посадки тіста встановлений зволожувальний пристрій, що складається з перфорованих трубок, водовідділювача, вентилів і манометра та підключений до заводської парової мережі [2].

Піч обладнана двома незалежними огрівальними системами (рис. 1.1, б), одна з яких забезпечує тепловий режим зони випікання, а інша - зони допікання. Елементи системи, що працюють під дією високотемпературних газів, виготовлені з жаростійких сталей. Для зниження температури газів, що надходять у металеві канали 5, застосовується рециркуляція продуктів згоряння. Топки 2 пристосовані для роботи як на газоподібному, так і на рідкому паливі. При використанні газу застосовуються інжекційні пальники 1 середнього тиску з ручним регулюванням витрати газу та автоматичним дозуванням первинного повітря. Гарячі гази, що утворюються у топках 2, під дією тяги, створюваної димососами 4, переміщуються металевими каналами 5 і через їх стінки передають тепло пекарній камері. Наприкінці теплової системи газовий потік поділяється на дві частини: одна відводиться в газохід 7, а інша повертається до топки для охолодження її стінок і зниження температури паливних газів [2].

Контроль та безпека роботи печі забезпечуються комплексом спеціальних пристроїв. Для контролю тяги в топках використовуються тягоміри 10 (рис. 1.1, б), а вимірювання температури газів здійснюється термопарами 9. Крім того, система обладнана переносною свічкою 11, вибуховими клапанами 6 та електромагнітним клапаном 12, який автоматично перекриває подачу газу при зупинці димососів або зниженні тиску газу нижче допустимого значення. Перед запуском печі виконується продування системи свіжим повітрям через патрубок 8 при перекритті клапана 3 . Температура гріючих газів у процесі роботи становить 500-600 °С, а температура відпрацьованих газів - 280-350 °С [2].

1.2 Етапи технологічного процесу випікання хліба

Схема технологічної лінії виробництва хліба представлена на рис. 1.2.



1 - тістоподільник-укладач; 2 - вистійна шафа; 3 - повітряний фільтр; 4 - компресор; 5 - ресивер; 6 - ультразвукове сопло; 7 - роторний живильник; 8 - приймальний щит; 9 - борошняний силос; 10 - транспортний матеріалопровід; 11 - перемикач напрямку; 12 - циклон; 13 - просіювач борошна; 14 - автоматичні ваги; 15 - проміжний бункер; 16 - виробничий бункер; 17 - машина для замісу опари; 18 - дозатор рідких компонентів; 19 - бункер для бродіння опари; 20 - проміжний бачок для розчину солі; 21 - розчинник дріжджів; 22 - тістомісильна машина; 23 - бункер для бродіння тіста; 24 - приймач тіста; 25 - транспортна труба для тіста; 26 - дозатор опари; 27 - солерозчинник; 28 - контейнери для хліба; 29 - розподільна каретка; 30 - хлібоукладач; 31 - піч тупикова; 32 - розвантажувач хліба [5]

Рисунок 1.2 – Технологічна лінія виробництва хліба [5]

Виробничий цикл розпочинається з приймання та підготовки борошна. За допомогою транспортного матеріалопроводу 10 (рис. 1.2) борошно подається до борошняного силосу 9 пневматичним способом із використанням стисненого повітря. Для створення та підготовки повітряного потоку застосовуються повітряний фільтр 3, компресор 4 і ресивер 5. Подальше транспортування борошна здійснюється через роторний живильник 7, приймальний щит 8 та перемикач напрямку 11 до циклона 12. Після цього борошно очищується у просіювачі борошна 13 (рис. 1.2), проходить контроль маси на автоматичних вагах 14 і через проміжний бункер 15 надходить до виробничого бункера 16 [4, 5].

Паралельно виконується підготовка рідких компонентів. Кухонна сіль розчиняється в солерозчиннику 27 (рис. 1.2) і через проміжний бачок для розчину солі 20 подається у виробничий процес. Дріжджі готуються в розчиннику дріжджів 21 шляхом утворення дріжджової суспензії. Дозування рідких компонентів здійснюється дозатором рідких компонентів 18. Підготовлене борошно разом із водою, сольовим розчином та дріжджовою суспензією надходить до машини для замісу опари 17, де формується опара. Після замішування вона подається до бункера для бродіння опари 19, у якому проходить процес дозрівання та накопичення необхідних фізико-хімічних властивостей [4, 5].

Після завершення бродіння опара через дозатор опари 26 (рис. 1.2) надходить до тістомісильної машини 22, де здійснюється остаточний заміс тіста. Далі тісто подається до бункера для бродіння тіста 23, у якому відбувається його розпушування, накопичення кислотності та утворення вуглекислого газу, що забезпечує формування пористої структури майбутнього виробу. Після дозрівання тісто через приймач тіста 24 та транспортну трубу для тіста 25 направляється до тістоподільника-укладача 1, де виконується поділ тіста на окремі заготовки та їх укладання у форми [4, 5].

Підготовлені заготовки надходять до вистійної шафи 2 (рис. 1.2), де проходять остаточне розстоювання при температурі 35-40 °С та відносній

вологості 80-85 %. У процесі вистоювання заготовки збільшуються в об’ємі та набувають необхідної структури. Після цього форми із заготовками подаються до тупикової печі 31, у якій здійснюється процес випікання при температурі 210-280 °С. Під час випікання формується м’якушка виробу, утворюється скоринка та характерний аромат, що виникає внаслідок реакцій меланоїдиноутворення. У результаті випаровування частини вологи маса готових виробів зменшується приблизно на 6-14 % [4, 5].

Після завершення випікання готовий хліб вивантажується розвантажувачем хліба 32 (рис. 1.2) та подається до хлібоукладача 30. Далі за допомогою розподільної каретки 29 вироби направляються у контейнери для хліба 28, де проходять охолодження, маркування та підготовку до транспортування [4, 5].

Під час зберігання хлібобулочних виробів важливим є дотримання належних умов, оскільки вже через 10-12 годин після випікання починається процес черствіння, пов’язаний зі змінами структури крохмалю та білків м’якушки. Порушення технологічних або санітарних умов може призвести до розвитку дефектів і хвороб хліба, зокрема картопляної хвороби або пліснявіння, унаслідок чого продукція стає непридатною для реалізації та подальшого споживання [4].

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації хлібопекарської печі тунельного типу на діючому виробництві

У контексті сучасного хлібопекарського виробництва, автоматизація технологічних процесів відіграє ключову роль у підвищенні ефективності підприємств. Проте, поточний стан систем автоматизації на хлібопекарських заводах часто відзначається використанням застарілих та локальних рішень, які не повною мірою відповідають актуальним вимогам щодо надійності, енергоефективності, швидкодії та точності. З огляду на це, представляється

обґрунтованим аналіз прикладу існуючої системи автоматизації тунельної печі на діючому виробництві, де виявлено недостатній рівень автоматизації.

Нерідко такі підприємства стикаються з відсутністю сучасних систем на базі програмованих логічних контролерів (PLC), або ж експлуатують значно застарілі моделі, виробник яких вже не надає підтримки. Навіть у випадках наявності попередніх версій PLC, вони часто позбавлені необхідних протоколів обміну даними або мають недостатню обчислювальну потужність. Ці обставини формують одну з ключових проблем, яка потребує системного вирішення.

Додатково, на об'єкті виявлено низку інших значних недоліків: регулювання засувки природного газу, а також клапанів пари та повітря здійснюється вручну, що призводить до неефективного контролю витрат ресурсів. Спостерігається повна відсутність інформації щодо аварійних ситуацій. Ручне керування виконавчими механізмами негативно позначається на стабільності якості продукції. Незадовільний рівень автоматизації зумовлює значний вплив людського фактору на продуктивність об'єкта, що, у свою чергу, дестабілізує температурний режим, спричиняє зростання споживання енергоносіїв та знижує надійність виконавчих механізмів, клапанів та внутрішніх компонентів системи. Нарешті, відсутність інтегрованої системи для диспетчерського персоналу унеможливлює централізований моніторинг та керування роботою об'єкта.

Моральне старіння значної частини обладнання системи призводить до низького рівня її надійності, що становить потенційну загрозу під час тривалої експлуатації, особливо з огляду на ризик відмови критично важливих для безпеки компонентів. Факторами, що додатково впливають на безпеку, є застаріла нормативно-правова база та дефіцит кваліфікованих спеціалістів, які володіють навичками роботи з SCADA-системами. Імплементація вирішення зазначених проблем є необхідною умовою для підвищення продуктивності підприємства та оптимізації його витрат.

Підсумовуючи викладене, слід констатувати, що існуюча система автоматизації є неактуальною та містить численні обмеження, що перешкоджають ефективному управлінню виробничим об'єктом, досягненню бажаної енергоефективності, гнучкості та стабільності процесу випікання хлібобулочної продукції. Така ситуація обґрунтовує необхідність розробки інноваційної та сучасної системи автоматизації, що базуватиметься на передових технологіях та вдосконалених алгоритмах регулювання із застосуванням PLC.

1.4 Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків

Система автоматизації побудована за принципом локальної СА. Згідно зі схемою, усі вхідні сигнали є аналоговими. Вони надходять від датчиків температури, тиску, тяги, вологості та витрати до контролера, де проходять оцифрування та обробку. Контролер передає інформацію на ЕОМ (електронно-обчислювальну машину), що забезпечує моніторинг, візуалізацію параметрів, запис даних і формування архівів.

На рисунку 1.3 представлена схема інформаційних та матеріальних потоків хлібопекарської печі ПХС-25М.

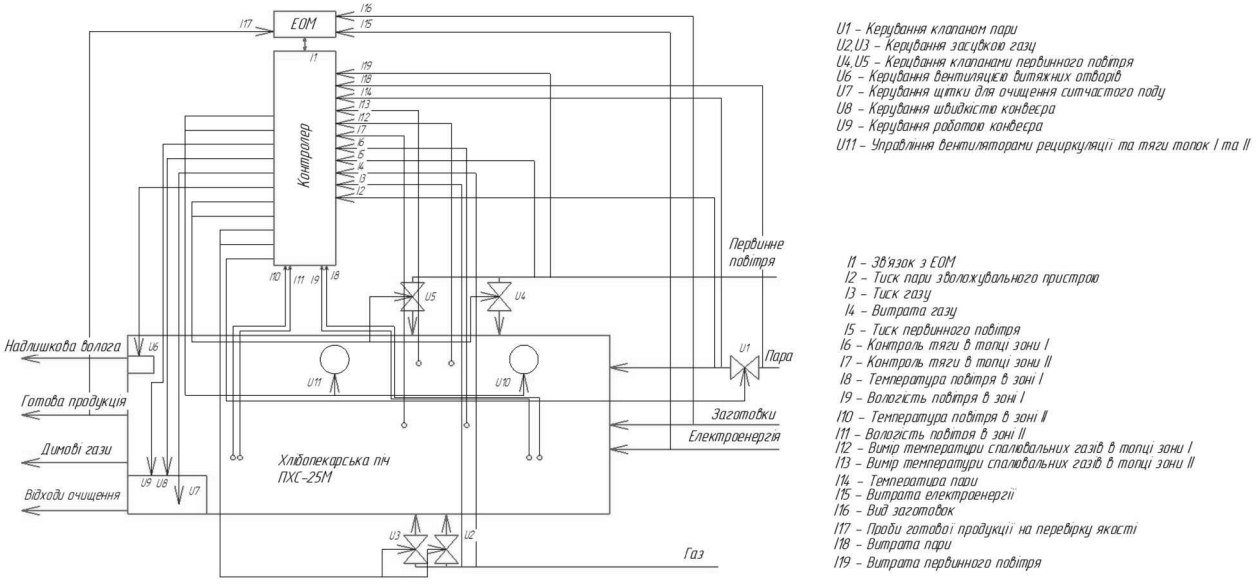


Рисунок 1.3 – Схема інформаційних та матеріальних потоків

1.5 Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах підприємств України та зарубіжжя

Автоматизація тунельних хлібопекарських печей є ключовим чинником забезпечення стабільної якості продукції та ефективності виробництва при безперервному режимі роботи. Тунельні агрегати відрізняються від камерних або періодичних печей постійним завантаженням сировини, що потребує точного контролю температурних профілів у зонах, вологості, швидкості конвеєра та роботи пальникових вузлів. Високий рівень автоматизації забезпечує не лише рівномірне випікання, а й оптимізацію енергоспоживання та підвищення продуктивності підприємства.

Сучасний стан автоматизації в Україні

Українські хлібозаводи, такі як «Київхліб», «Хліботар», «Концерн Хлібпром» (Львів), «Одеський коровай» та «Дніпровський хлібокомбінат №5», активно модернізують виробничі лінії, впроваджуючи програмовані логічні контролери (PLC) та системи диспетчерського контролю. Часто використовуються контролери компанії Siemens SIMATIC, які дозволяють зонально регулювати температуру, управляти швидкістю стрічкового транспортера, подачею газу та системами зволоження.

Сучасні тунельні печі комплектуються операторськими панелями для збереження рецептур, архівування параметрів, відображення графіків температур та фіксації аварійних сигналів. PLC-системи можуть зберігати сотні виробничих режимів, вести облік напрацювання обладнання та формувати сигнали технічного обслуговування.

Стандартні шафи керування оснащені автоматичними вимикачами, блокуваннями, температурними контролерами для пальників, цифровими термометрами та таймерами технологічних циклів. Такі рішення переважно застосовуються на автономних або локально модернізованих виробничих лініях, характерних для більшості регіональних підприємств. Проте інтеграція тунельних печей у корпоративні інформаційні системи залишається

обмеженою. У більшості випадків автоматизація зосереджена на окремому агрегаті без глибокої аналітики виробничих показників у реальному часі.

Разом із тим спостерігається тенденція до впровадження сучасних автоматизованих ліній. Прикладом є Запорізький хлібозавод №5, де була введена в експлуатацію нова виробнича лінія бельгійського виробництва для випуску формового хліба. Лінія є повністю автоматизованою та реалізує сучасні європейські технології випікання. Аналогів продукції, що виготовляється на даному обладнанні, в Україні практично немає [7]. Також підприємства галузі активно вивчають та впроваджують досвід провідних хлібопекарських виробництв як України, так і країн ближнього та дальнього зарубіжжя.

Стан автоматизації за кордоном

На європейських підприємствах автоматизація тунельних печей реалізується як частина комплексних цифрових виробничих екосистем. PLC-керування інтегрується з системами SCADA та MES, що дозволяє підключення до корпоративних мереж і хмарних сервісів.

Також у Європі є багато компаній які роблять системи автоматизації на замовлення. Однією з них є чеська компанія J4 bakery lines, вони спеціалізуються саме на системах автоматизації для хлібопекарських виробництв. Компаніє пропонує комплексні рішення доя різних видів хлібобулочних виробів, також різні системи автоматизації, на базі Siemens SIMATIC S7-300 для керування пальником, оснащені робочим годинником, і цифровими термометрами для вимірювання температури в окремих зонах печі.

Рішення J4 bakery lines оснащені розширеними функціями, які забезпечують зручне керування та контроль технологічного процесу. Система дозволяє архівувати сотні рецептур, відображати температурні профілі в режимі реального часу, зберігати історію аварій і дані про напрацювання обладнання. Також передбачена інтеграція з головною системою керування та можливість віддаленої діагностики через Інтернет. Використовуються

високотехнологічні вузли: пальники Weishaupt, частотні перетворювачі Lenze, сервоприводи заслінок, системи рекуперації тепла та циклотермічні печі з підрозрідженим режимом роботи.

Ще одна компанія Hasborg у Польщі займається розробкою та виробництвом сучасного хлібопекарського обладнання, зокрема тунельних печей, які відзначаються високим рівнем автоматизації та енергоефективності. Система керування реалізована на базі обладнання Siemens (Німеччина), приводи та мотор-редуктори - виробництва SEW (Німеччина), металевий конвеєр, напрямні та ролики - від Sandvik (Швеція), а пальники - від Weishaupt (Німеччина), що гарантує високу надійність і довговічність роботи. Їхні рішення орієнтовані на безперервне виробництво та забезпечують стабільну якість продукції завдяки точному контролю технологічних параметрів. Тунельні печі Hasborg широко застосовуються як на середніх, так і на великих підприємствах харчової промисловості, де важливими є продуктивність, гнучкість налаштувань і економія енергоресурсів [8].

1.6 Недоліки існуючої системи управління

Існуюча система управління має низку суттєвих недоліків, зумовлених використанням застарілих засобів автоматизації, які не відповідають сучасним вимогам щодо надійності, функціональності та технічної ефективності. Значна частина контролю технологічного процесу та забезпечення безпеки залежить від дій обслуговуючого персоналу через відсутність SCADA-системи, що унеможливлює централізований диспетчерський контроль, архівування даних і оперативний моніторинг параметрів у реальному часі.

На підприємстві експлуатуються промислові регулятори типу МІК-22, що не дозволяють реалізувати складні алгоритми керування системаювиробництво яких компанією МІКРОЛ припинено, а також застарілі архіватори, первинні перетворювачі та вторинні прилади радянського зразка. Використовуване обладнання в своїй більшості не підтримує сучасні

промислові протоколи та інтерфейси передачі даних, зокрема Ethernet, Profibus, Modbus, RS-485 та інші, що значно ускладнює інтеграцію обладнання, передачу інформації, зберігання архівів і подальший аналіз технологічних параметрів. Крім того, обмежена доступність комплектуючих і відсутність технічної підтримки ускладнюють діагностику, ремонт та заміну елементів системи, що підвищує ризик відмов обладнання та негативно впливає на стабільність роботи підприємства.

Для підвищення ефективності та надійності системи автоматизації пропонується модернізація системи керування із впровадженням сучасного програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M580 та заміною основних застарілих технічних засобів на сучасне обладнання з підтримкою актуальних промислових протоколів зв’язку та можливістю інтеграції у SCADA-систему.

2. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Вимоги до системи в цілому

Система автоматизації тунельної печі ПХС-25М повинна забезпечувати автоматичний контроль, регулювання та керування основними параметрами технологічного процесу, прийом сигналів від засобів вимірювальної техніки нижнього рівня та формування сигналів управління виконавчими механізмами і регулюючими органами. Система повинна забезпечувати підтримання стабільного технологічного режиму роботи печі та створення умов для отримання якісної продукції.

Для забезпечення безпечної та надійної експлуатації система повинна виконувати аварійні та локальні захисти, автоматичні блокування і аварійну зупинку печі у випадку виходу технологічних параметрів за допустимі межі, виникнення аварійних режимів роботи обладнання або спрацювання системи пожежної безпеки. Крім того, система повинна забезпечувати безпечну послідовність роботи технологічного обладнання, запобігати виконанню недопустимих операцій та мінімізувати ризик пошкодження обладнання і порушення технологічного процесу.

Система повинна забезпечувати дистанційне автоматизоване управління виконавчими механізмами та регулюючими органами, формування аварійної і попереджувальної сигналізації, а також відображення на АРМ оператора інформації про технологічні параметри, стан обладнання, режими роботи та аварійні повідомлення. Також система повинна виконувати архівування і збереження даних технологічного процесу для подальшого аналізу роботи обладнання.

Архітектура системи автоматизації повинна забезпечувати надійність і безперервність функціонування технологічного процесу, можливість оперативного виявлення несправностей та нештатних режимів роботи, а також

подальшу модернізацію, розширення функціональних можливостей і масштабування системи без суттєвої зміни її структури.

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система

1. Системи автоматичного регулювання (САР):

САР температури спалювальних газів в топках I і II зон

Для забезпечення стабільного температурного режиму тунельної печі необхідно підтримувати температуру спалювальних газів у топках I і II зон у заданих межах. Даний параметр визначає інтенсивність теплопередачі до пекарної камери та безпосередньо впливає на якість випікання хлібобулочних виробів.Теплова система печі характеризується значною інерційністю.

САР тиску повітря

Для забезпечення стабільного процесу горіння в топках печі необхідно підтримувати тиск повітря на заданому рівні. Недостатній тиск повітря призводить до неповного згоряння палива, а надлишковий - до зниження теплової ефективності та перевитрати енергії.

САР тиску пари

Для забезпечення стабільного процесу зволоження необхідно підтримувати тиск пари у заданих межах. Коливання тиску пари призводить до нерівномірного зволоження продукції.

Контроль тиску пари здійснюється за допомогою перетворювача тиску, встановленого на паропроводі.

САР тяги в топках I та II зон

Для забезпечення стабільного процесу горіння необхідно підтримувати задану тягу (розрідженість) в топках I та II зон. Відхилення тяги призводить до порушення горіння та нестабільності температурного режиму печі. Тяга вимірюється датчиками розрідження, встановленими в топках зон. У контролері поточне значення порівнюється з уставкою.

Регулювання повинно здійснюватися шляхом зміни продуктивності димососів через частотні перетворювачі двигунів.

САР вологості повітря в печі

Для забезпечення стабільного технологічного процесу випікання необхідно підтримувати вологість повітря у пекарній камері в заданих межах. Надлишкова вологість негативно впливає на формування скоринки виробів та якість готової продукції.

Вологість повітря визначається як:

$$\varphi = \frac{P_{\text{пари}}}{P_0} * 100\%$$

де $P_{\text{пари}}$ - парціальний тиск водяної пари; P_0 - тиск насиченої пари.

У контролері поточне значення вологості порівнюється із заданим.

Регулювання вологості повинно здійснюватися шляхом зміни продуктивності витяжної вентиляції.

САР роботи та швидкості конвеєра печі

Швидкість руху конвеєра визначає тривалість випікання продукції, що є важливим технологічним параметром.

Час перебування виробу в печі визначається як:

$$\mathrm{t} = \frac{L}{v}$$

де L - довжина печі; v - швидкість руху конвеєра.

Регулювання швидкості повинно здійснюватися за допомогою частотного перетворювача електродвигуна.

САР щітки конвеєра печі

Для забезпечення належного очищення стрічкового поду необхідно автоматизувати роботу щітки конвеєра. Наявність залишків продуктів може

призводити до погіршення якості продукції та зниження санітарного стану. Система повинна забезпечувати автоматичне вмикання щітки при запуску конвеєра або через задані інтервали часу.

2. Системи автоматичного контролю (САК)

САК печі забезпечують контроль основних технологічних параметрів для індикації режиму роботи, оцінки ефективності процесу та своєчасного виявлення відхилень. Контролюються температура повітря в двох зонах печі, температура пари зволожувального пристрою, тиск природного газу, а також витрати газу, повітря і пари. У разі виходу параметрів за допустимі межі система формує сигналізацію або виконує блокування для забезпечення безпечної роботи обладнання.

2.3 Вимоги до видів забезпечення

Системи автоматизації вимагають технічного, інформаційного та організаційного забезпечення. Технічне забезпечення охоплює апаратні засоби для вимірювання, обробки, передачі сигналів та управління процесом.

Контролер повинен підтримувати основні протоколи зв’зку, такі як: Ethernet, Profibus або Modbus. Сигнали первинних приладів уніфіковані (4-20 мА), вихідні сигнали можуть бути дискретними або аналоговими для керування механізмами. Важлива технологічна інформація виводиться оператору на АРМ у зручному форматі: числа, графіки, тренди, мнемосхеми. Оператор у реальному часі контролює параметри печі (температура, тиск, вологість, витрати) та стан виконавчих механізмів. Система також генерує аварійні та попереджувальні повідомлення для своєчасного реагування. Технологічні дані архівуються на станції оператора для подальшого аналізу, оцінки ефективності та оптимізації. Резервне зберігання забезпечується на картках пам'яті вторинних приладів. Сам ARM-оператора також повинен

включати спеціалізоване ПЗ, периферійне обладнання для оперативного управління технологічним процесом та сам комп’ютер, тобто ЕОМ.

В таблиці 2.1 наведено основні параметри, що конттролюються або керуються системою автоматизації.

Таблиця 2.1 – Метрологічні параметри системи автоматизації

Контрольований параметр	Робочий діапазон виміру	Точність виміру
1.Температура спалювальних газів в топках	500…600 °С	1 %
2.Температура повітря в зонах печі	200…300 °С	0,5 %
3.Температура пари зволожувального пристрою	100…120 °С	1 %
4.Вологість повітря в печі	65…85 %	2 %
5.Тиск природного газу	2,5…5 кПа	1,5 %
6.Тиск повітря для горіння	2…3 кПа	1,5 %
7.Тиск пари	0…0,3 МПа	1,5 %
8.Тяга в топках	10…20 Па	2 %
9.Витрата природного газу	0…5000 м³/год	1,5 %
10.Витрата повітря	0…9000 м³/год	1,5 %
11.Витрата пари	0…500 кг/год	1,5 %
12.Швидкість конвеєра печі	0,01…0,1 м/с	1 %
13.Частота обертання двигуна щітки	0…1500 об/хв	2 %

Організаційне забезпечення регламентує взаємодію персоналу з технічним обладнанням, а також процедури експлуатації та обслуговування. Це також включає розробку регламентів, інструкцій, аварійних протоколів та систематичне навчання персоналу.

3. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА

Функціональна структура системи автоматизації визначає склад основних елементів системи, їх взаємозв'язок та принцип взаємодії під час керування технологічним процесом. Для забезпечення стабільного температурного режиму печі ПХС-25М доцільно застосувати ієрархічну функціональну структуру системи автоматизації.

Система автоматизації побудована за дворівневим принципом і включає:

— нижній рівень;

— верхній рівень.

1) Нижній рівень системи автоматизації.

Нижній рівень системи автоматизації включає первинні вимірювальні перетворювачі, такі як тахометри, термопари, перетворювачі вологості, витратоміри, перетворювачі абсолютного тиску та розрідження, вторинні прилади (індикатори технологічних параметрів та архіватори), програмованого логічного контролера (PLC) та виконавчі механізми, які безпосередньо взаємодіють із технологічним обладнанням печі.

На цьому рівні здійснюється вимірювання основних технологічних параметрів процесу. До таких параметрів належать: температура в топках зон I та II печі, температура в зонах пекарської камери I та II, тиск повітря, природного газу та пари, витрата повітря, газу і пари, вологість повітря та швидкість руху конвеєра.

Для вимірювання температури використовуються термоелектричні перетворювачі (термопари), які встановлюються в топках і пекарній камері. Вони забезпечують безперервне вимірювання температури середовища та передають сигнали до вторинних приладів.

Контроль інших параметрів, таких як тиск, вологість або витрата, здійснюється за допомогою відповідних датчиків (перетворювачів тиску, витратомірів, перетворювачів вологості), які також формують стандартизовані сигнали 4-20 мА.

Отримані сигнали надходять до вторинних перетворювачів НПМ компанії МІКРОЛ для перетворення сигналу в уніфікований 4-20 мА або одразу до індикаторів ІТМ компанії МІКРОЛ, які мають широкий спектр підтримки вхідних сигналів та можуть виконувати функції вторинного перетворення. Окремі модифікації цих приладів оснащені функціями архівування даних, сигналізації при виході параметрів за допустимі межі та передачею інформації на верхній рівень системи.

Далі сигнали передаються до PLC, який виконує збір та обробку аналогових і дискретних сигналів, виконує їх фільтрацію, порівняння з заданими значеннями та реалізує алгоритми автоматичного регулювання (ПІ-регулювання температури, тиску, витрати).

На основі обробленої інформації PLC формує керуючі сигнали у вигляді аналогових (4-20 мА, 0-10 В) або дискретних команд, які подаються на виконавчі механізми.

До виконавчих механізмів належать механізми електричні однооборотні (МЕО), які призначені для керування запірно-регулюючою арматурою (клапани). Вони забезпечують точне позиціювання регулюючих органів відповідно до сигналів PLC, що дозволяє підтримувати задані параметри технологічного процесу в автоматичному режимі.

2) Верхній рівень системи автоматизації

Верхній рівень системи автоматизації призначений для взаємодії оператора з технологічним процесом та контролю роботи обладнання.

До складу цього рівня входять автоматизовані робочі місця операторів (АРМ), які забезпечують відображення інформації про стан системи в режимі реального часу. На екранах операторських станцій відображаються основні технологічні параметри, такі як температура в зонах печі, стан виконавчих

механізмів та режими роботи системи, сигналізування про відхилення технологічних параметрів від заданих уставок.

Передача інформації між контролером та операторськими станціями здійснюється через промислову мережу передачі даних (Modbus), що забезпечує швидкий, надійний та захищений обмін інформацією. Це дозволяє виконувати моніторинг технологічного процесу, архівацію даних та аналіз роботи обладнання.

Дворівнева структура системи характеризується модульністю та можливістю подальшого розширення системи. У разі необхідності можуть бути додані нові датчики, вторинні прилади, виконавчі механізми або додаткові модулі PLC без значної зміни загальної архітектури системи.

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру

Для забезпечення стабільної роботи тунельної хлібопекарської печі ПХС-25М необхідно здійснювати автоматичне керування основними технологічними параметрами процесу випікання.

У системі автоматизації використовується принцип замкненого автоматичного керування за відхиленням, при якому поточне значення технологічного параметра порівнюється із заданою уставкою, а регулятор формує керуючий вплив для мінімізації похибки регулювання.

1. Управління температурою в зонах печі

Регулювання температури виконується за ПІ законом, оскільки при зміні теплового навантаження необхідно точно підтримувати задану температуру в топках та усувати статичну похибку для забезпечення стабільного режиму випікання.

2. Управління подачею повітря до пальників

Регулювання подачі повітря виконується за ПІ законом, оскільки при зміні витрати газу необхідно точно підтримувати заданий тиск повітря у

повітропроводі та забезпечувати повне згоряння паливної суміші без накопичення статичної похибки.

3. Управління подачею пари

Регулювання подачі пари виконується за ПІ законом, оскільки необхідно підтримувати заданий тиск пари після клапана та забезпечувати рівномірне зволоження пекарної камери без відхилень від уставки. 4. Управління роботою та швидкістю конвеєра печі.

4. Управління роботою та швидкістю конвеєра печі

Регулювання швидкості конвеєра виконується за ПІ законом, оскільки необхідно підтримувати задану швидкість руху стрічкового поду для забезпечення стабільного часу перебування виробів у печі.

5. Управління вентиляцією та видаленням надлишкової вологи

Регулювання вентиляції виконується за ПІ законом, оскільки необхідно підтримувати задану вологість повітря у пекарній камері шляхом плавної зміни продуктивності вентиляторів без статичної похибки. 6. Управління щіткою конвеєра печі.

6.Управління щіткою конвеєра печі

Керування щіткою виконується позиційно, оскільки електродвигун працює лише у режимах «увімкнено/вимкнено».

7. Управління вентиляторами (димососами) рециркуляції та тяги топок

Регулювання роботи вентиляторів (димососів) виконується за ПІ законом, оскільки необхідно підтримувати задану розрідженість (тягу) в топках зон печі при змінних режимах горіння та теплових навантаженнях. Використання ПІ-регулювання дозволяє точно утримувати уставку тяги та компенсувати статичну похибку, що забезпечує стабільний процес горіння і рівномірний розподіл температури в камері печі.

Регулювання рециркуляції також виконується синхронно з підтриманням тяги, щоб забезпечити оптимальний баланс між видаленням продуктів згоряння та поверненням частини газів у зону горіння. Це дозволяє

підвищити енергоефективність процесу та стабілізувати тепловий режим печі без коливань тяги та температури.

3.3 Розробка математичної моделі системи управління

Для аналізу динамічних властивостей системи автоматичного регулювання температури тунельної печі необхідна математична модель об'єкта керування. Об'єктом керування є температурний режим спалювальних газів в топках зон I та II печі, що визначається подачею палива, інтенсивністю повітря, тепловими втратами та теплоємністю продукту. Інерційність теплових процесів зумовлює поступову зміну температури, дозволяючи представити об'єкт керування як аперіодичну ланку першого порядку із запізненням.

Передаточна функція такого об’єкта має вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s}$$

де K - коефіцієнт підсилення об’єкта; T - постійна часу об’єкта; τ - час транспортного запізнення; s - оператор Лапласа.

Коефіцієнт підсилення показує, наскільки змінюється температура печі при зміні керуючого сигналу. Постійна часу характеризує інерційність теплового процесу, а запізнення обумовлене часом передачі тепла в робочій камері печі.

— $K_s = K = 2$

— $T_q = T = 120$ с

— $T_u = \tau = 20$ с

Тоді передаточна функція об’єкта керування набуде вигляду:

$$W(s) = \frac{2}{120s + 1} e^{-20s}$$

Оскільки $\frac{\tau}{T} = 0.167 < 0.2$, обрано ПІ-регулятор. Для розрахунку попередніх параметрів ПІ-регулятора використаємо формули коефіцієнтів для аперіодичного процесу.

1. Коефіцієнт підсилення регулятора, що визначає реакцію системи на помилку:

$$K_p = 0{,}60 * \frac{T_q}{T_u * K_s} = 0{,}60 * \frac{120}{20*2} = 1{,}8$$

де T_q - постійна часу об'єкта; T_u - час запізнення; K_s - коефіцієнт підсилення об'єкта

2. Інтегральний час, що визначає швидкість усунення статичної похибки, чим більше T_N ,тим повільніше працює інтегральна частина:

$$T_i = 4 * T_u = 4 * 20 = 48 \text{ с}$$

Інтегральний коефіцієнт дорівнює: $K_i = 0.0225$

Дана математична модель дозволяє дослідити динаміку системи автоматичного регулювання температури печі та оцінити перехідні процеси при зміні керуючого впливу.

Для моделювання поведінки системи використовується програмне середовище MATLAB та його модуль Simulink, яке дозволяє будувати математичні моделі, аналізувати їх властивості та досліджувати перехідні процеси.

Програмна реалізація ПІ-регулятора представлена на рисунку 3.1.

```
clc
clear
close all

s = tf('s');

K = 2;
T = 120;
tau = 20;

G = tf(K,[T 1],'InputDelay',tau);

Kp = 1.8;
Ki = 0.0225;

PI = Kp + Ki/s;

Sys = feedback(PI*G,1);

figure
step(Sys,600)
grid on
title('Перехідна характеристика системи з ПІ-регулятором')
xlabel('Час (секунди)')
ylabel('Амплітуда')
```

Рисунок 3.1 – Програмна реалізація ПІ-закону регулювання

У середовищі Simulink модель системи автоматичного регулювання температури печі реалізована у вигляді замкненої системи з ПІ-регулятором, яка включає такі основні елементи:

- Step - джерело ступінчастого сигналу, що задає зміну уставки температури;

  Sum - блок підсумовування, у якому формується сигнал похибки як різниця між заданим значенням та виходом системи;
- PI(s) - блок ПІ-регулятора, який формує керуючий вплив на основі похибки регулювання;
- Transfer Function - блок, що описує динаміку об’єкта керування (печі) передаточною функцією $\frac{2}{120s+1}e^{-20s}$;
- Transport Delay - блок, що враховує запізнення теплового процесу;
- Mux - блок об’єднання сигналів (для подачі кількох сигналів на відображення);
- Scope - блок для візуалізації перехідного процесу та аналізу динаміки температури.

  Схема моделі представлена на рисунку 3.2.

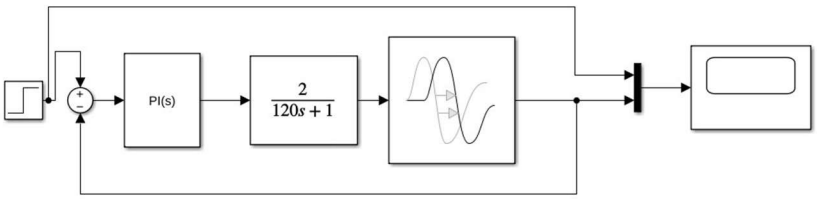


Рисунок 3.2 – Схема моделі в середовищі Simulink

Після запуску моделювання на Scope відображається перехідний процес: на графіку спостерігається підйом температури від початкового значення до заданої уставки з наявністю незначного перерегулювання та затухаючих коливань. З часом коливання зменшуються, і система виходить на усталене значення, що відповідає одиниці.

Така динаміка підтверджує коректність вибору параметрів ПІ-регулятора, стійкість системи та адекватне відтворення фізичного процесу нагрівання печі, і наведена на рисунку 3.3.

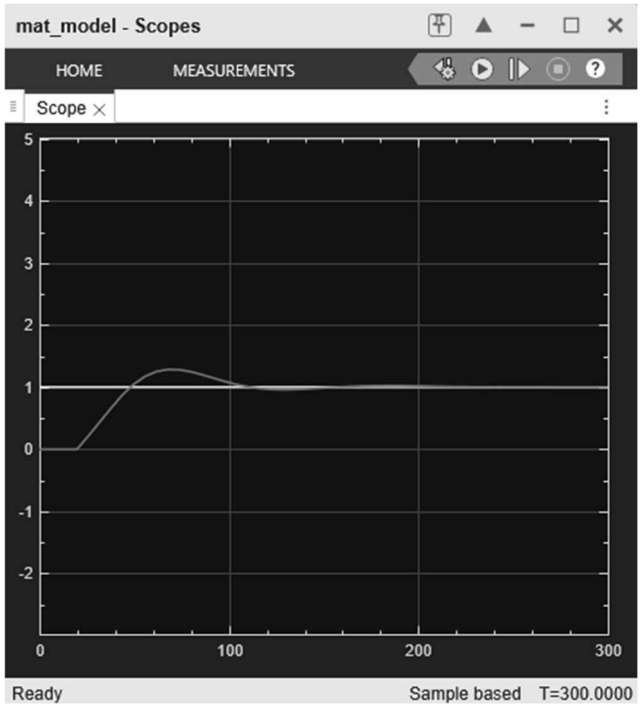


Рисунок 3.3 – Графік перехідного процесу в середовищі Simulink

Після запуску коду програми, можна побачити перехідний процес на рисунку 3.4.

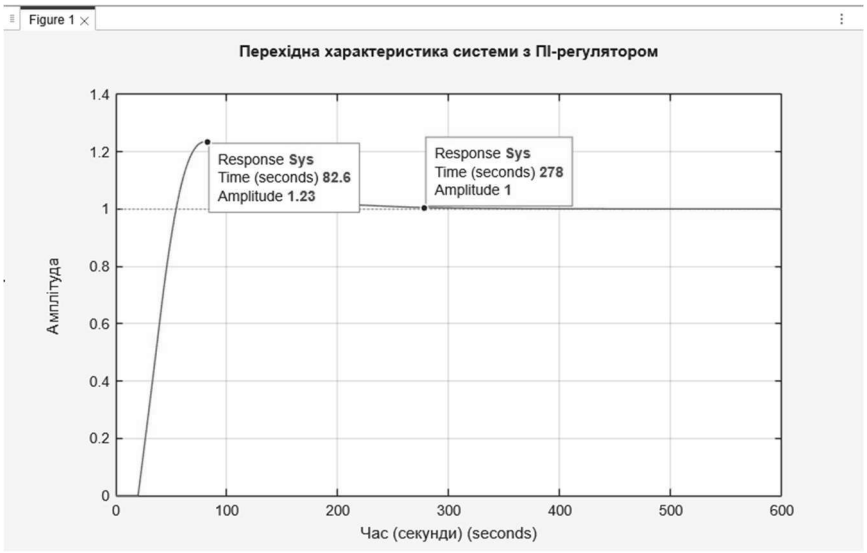


Рисунок 3.4 – Графік перехідного процесу з попередніми параметрами

Можна побачити що коливання в процесі є тільки на початку, поки система не вийде на завдання, це відбувається за 278 секунд.

Якщо трохи збільшити коефіцієнт $K_p = 2{,}2$, можна зменьшити час перехідного процесу, але з’явиться більше перерегулювання, що представлено на рисунку 3.5.

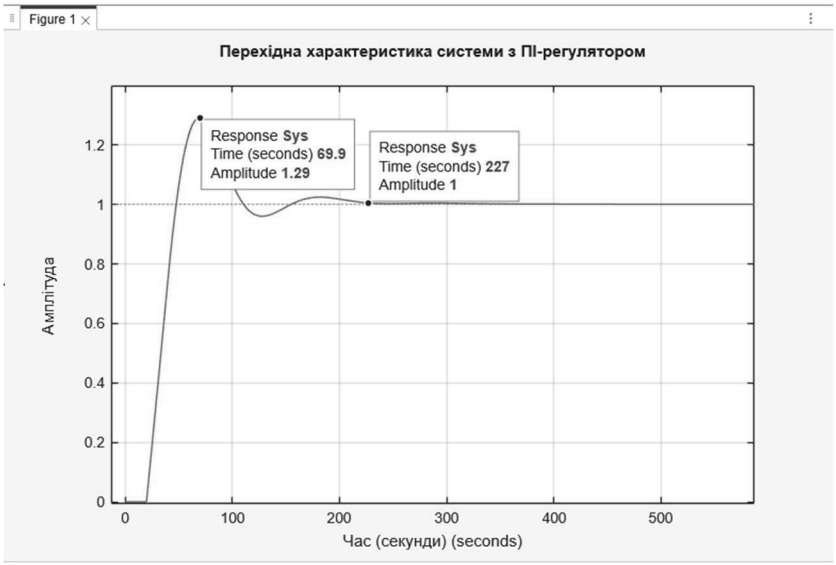


Рисунок 3.5 – Графік перехідного процесу при $K_p = 2{,}2$

Зменьшивши K_p до $K_p = 2$, та трохи збільшивши $K_\text{i} = 0.0275$, можна зменьшити коливання процесу, але час процесу збільшиться, що представлено на рисунку 3.6.

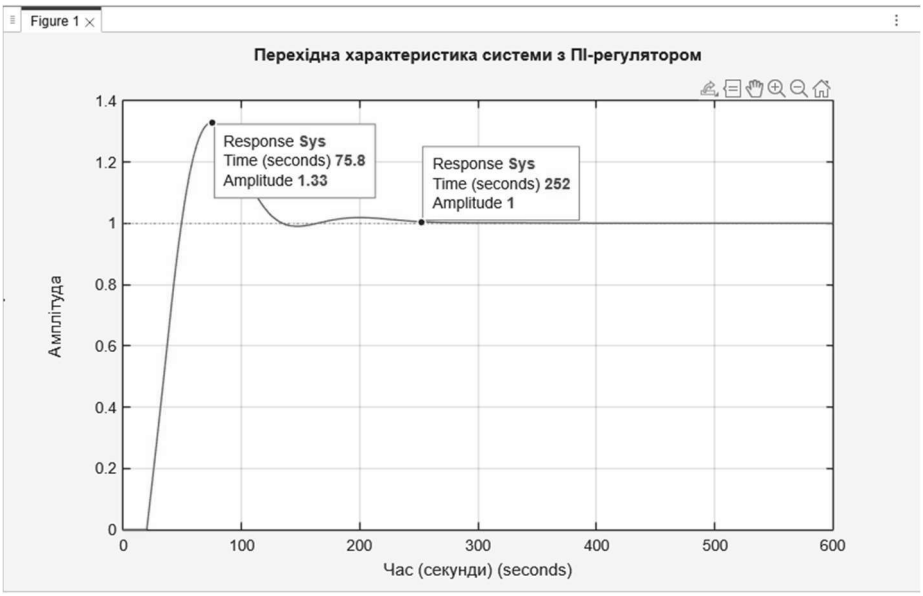


Рисунок 3.6 – Графік перехідного процесу при $K_p = 2$ та $K_\text{i} = 0.0275$

Проведено аналіз перехідних процесів для різних налаштувань PI-регулятора. Встановлено, що варіант, представлений на другому графіку з параметрами $K_p = 2{,}2$ та $K_\text{i} = 0.0225$, характеризується найменшим часом встановлення перехідного процесу.

Разом з тим, даний варіант має дещо більший рівень перерегулювання та більш виражені затухаючі коливання у порівнянні з першим варіантом. Однак ці коливання мають затухаючий характер і не впливають на стійкість системи.

З огляду на суттєве скорочення часу встановлення та прийнятний рівень перерегулювання, даний варіант можна вважати оптимальним компромісом між швидкодією та якістю регулювання для системи керування температурою тунельної печі.

За результатами моделювання перехідного процесу системи з PI-регулятором (другий варіант налаштування) визначено основні прямі показники якості регулювання.

1. Максимальне значення вихідної величини становить: $y_{max} = 1.29$

2. Усталене значення становить: $y(\infty)=1$

3. Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} * 100\% = \frac{1{,}29 - 1}{1} * 100\% = 29\%$$

4. Час досягнення першого максимум дорівнює: $t_m = 69.9$

5. Час регулювання визначається як момент часу, після якого відхилення вихідної величини не перевищує 5% від усталеного значення: $0.95 \leq y(t) \leq 1.05$

За графіком час регулювання дорівнює: $t_p = 227$

6. Кількість переходів через усталене значення становить - N = 3, де N - кількість коливань

Отримані показники якості свідчать, що система має задовільні динамічні властивості: перерегулювання становить 29%, що знаходиться в допустимих межах, а час регулювання є мінімальним серед розглянутих варіантів. Перехідний процес має затухаючий коливальний характер, що забезпечує стійкість системи.

Підсумовуючи наведену вище інформацію, другий варіант налаштування PI-регулятора забезпечує оптимальне поєднання швидкодії та якості регулювання.

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА

Під час вибору технічних засобів нижнього рівня системи автоматизації були обрані реальні пристрої українських та закордонних виробників, які на

сьогоднішній день перебувають у серійному виробництві та доступні на ринку.

3.4.1 Первинні перетворювачі, нормуючі пристрої, вторинні прилади

1) Термоперетворювач ТЕРА Модель 1-3 (ТХА К)

Модель 1-3 - один із найпоширеніших типів конструкції температурних датчиків із рухомим штуцером і клемною головкою. Використовується для контролю температури рідин, газів і повітря. Може комплектуватися зовнішньою гільзою та бобишкою. У клемній головці можливе встановлення перетворювача сигналу з виходом 4-20 мА або RS485 [12].

Технічні характеристики ТЕРА Модель 1-3 представлені в таблиці 3.1.

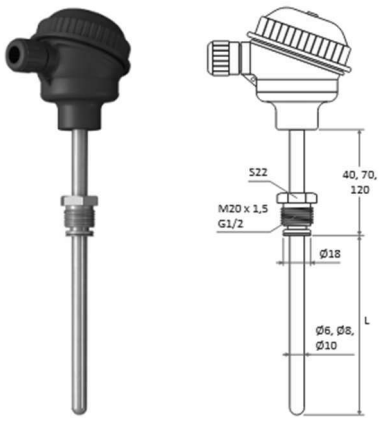


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд та габаритні розміри ТЕРА Модель 1-3 [12]

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики ТЕРА Модель 1-3 [12]

Параметр	Значение
1. Тип	ТХА
2. НСХ	K
3. Рабочий диапазон, °С	-40…250, -40…500, -40…800
4. Схема соединения / тип спая	1, 2
5. Класс допуска	1, 2
6. Показатель тепловой инерции, с	25 (8 мм, I), 20 (10 мм, H), 30 (10 мм, I)

2) Перетворювач (датчик) тиску загальнопромисловий з нержавіючою вимірювальною мембраною АКУТЕК ПД100

Перетворювачі тиску ПД100 моделей 111, 171 та 181 призначені для безперервного вимірювання абсолютного, надлишкового, вакуумметричного та надлишково-вакуумметричного тиску газів, пари й слабоагресивних рідин, нейтральних до нержавіючої сталі AISI 316L або AISI 304 [13].

Прилади перетворюють тиск в уніфікований аналоговий сигнал 4-20 мА постійного струму, мають високу надійність, стійкість до гідроударів і захист від неправильної полярності. Діапазон вимірювання становить від вакууму до 40 МПа залежно від типу тиску [13].

Технічні характеристики ПД100 представлені в таблиці 3.2.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд АКУТЕК ПД100 [13]

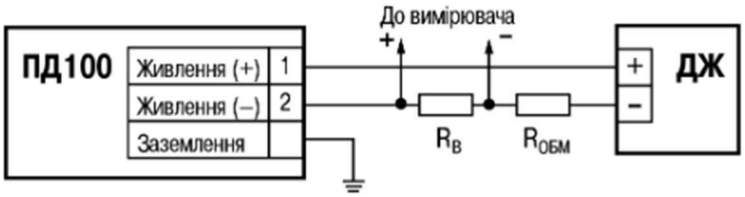


Рисунок 3.9 – Схема підключення АКУТЕК ПД100 [13]

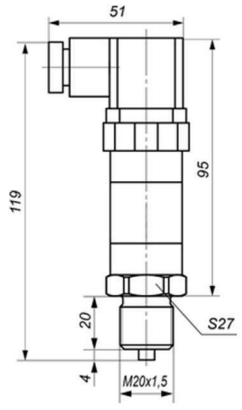


Рисунок 3.10 – Габаритні розміри АКУТЕК ПД100 [13]

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики АКУТЕК ПД100 [13]

Параметр	Значення
1. Вихідний сигнал постійного струму	4...20 мА, 2- дротова схема
2. Основна зведена похибка	0,5; 1,0 % ВМВ
3. Діапазон робочих температур вимірювального середовища	-40…+85 °С
4. Напруга живлення	8…30 В постійного струму
5. Опір навантаження	0…1,1 кОм (залежно від напруги живлення)
6. Споживана потужність	не більше 1 Вт
7. Ступінь захисту корпусу	IP65
8. Стійкість до кліматичних впливів	УХЛ3.1
9. Діапазон робочих температур навколишнього повітря	-40…+80 °С
10. Атмосферний тиск робочий	66...106,7 кПа
11. Середній час наробітку на відмову	не менше 500 000 год
12. Середній термін служби	10 років
13. Вага без упаковки/ в упаковці	0,2 кг / 0,3 кг
14. Штуцер для підмикання тиску	нарізь М20х1,5, штуцер відповідно до ДСТУ EN 837-1 нарізь G1/2, штуцер відповідно до ДСТУ EN 837-1 нарізь G1/4, штуцер відповідно до ДСТУ ISO 1179-2
15. Тип електричного з'єднувача	EN175301-803 форма А
16. Габаритний розмір (за висотою)	не більше 119 мм
17. Перевантажувальна здатність	не менше 200 % від ВМВ

3) Датчик тиску Сафір-М 7220 для вимірювання розрідження

Датчик тиску Сафір-М 7220 призначений для безперервного вимірювання розрідження газоподібних середовищ із перетворенням сигналу в 4-20 мА та цифровий сигнал HART. Прилад є надійним, корозійностійким і завадозахищеним, може працювати в широкому діапазоні температур та встановлюватися як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Передбачені звичайні та вибухозахищені виконання. Передача даних здійснюється по двопровідній лінії, де HART-сигнал накладається на аналоговий без впливу на його роботу [14].



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд Сафір-М 7220 [14]

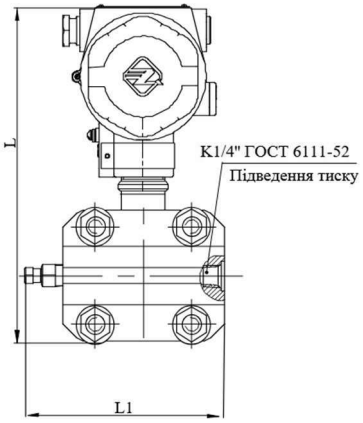


Рисунок 3.12 – Габаритні розміри Сафір-М 7220 [14]

4) Перетворювачі відносної вологості і температури ТЕРА Модель 2-02

Перетворювачі відносної вологості та температури повітря моделі 2-02 передають дані через аналоговий інтерфейс 4-20 мА або 0-10 В. Підключення виконується за 2-, 3- або 4-дротовою схемою із використанням зовнішнього джерела живлення та екранованого кабелю типу «кручена пара» [15].

Пристрій має герметичний роз’єм М12 з гвинтовими клемами, що спрощує монтаж без пайки. Модель комплектується захисною арматурою та рухомим штуцером М20×1,5 або G1/2 [15].

Технічні характеристики ТЕРА Модель 2-02 представлені в таблицях 3.3, 3.4.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики перетворювача [15]

Параметр	Значення
1. Кількість каналів вимірювання	1, 2
2. Конфігурація каналів вимірювання	Зовнішній сенсор відносної вологості і температури повітря
3. Вихідний сигнал	Аналоговий, 4-20 мА або 2 x 4-20 мА / 0-10 V або 2 x 0-10 V
4. Тип індикатора	OLED індикатор 0.96”
5. Роз'єм для підключення	M12FA / M12FD
6. Діапазон температури експлуатації, °C	-30…60

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики зовнішнього сенсора відносної вологості і температури повітря [15]

Параметр	Значення
1. Тип (НСХ)	SHT31
2. Діапазон температури, °C	-20…120
3. Діапазон відносної вологості, %	0...100
4. Матеріал захисної арматури	Сталь 321 (12Х18Н10Т), поліамід
5. Кріплення	M20 x 1,5 або G1/2
6. Довжина монтажної частини, мм	100, 120, 160, 200, 250
7. Довжина зовнішньої частини, мм	70, 120
8. Діаметр монтажної частини, мм	Ø6 з переходом на Ø12



Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд TEPA Модель 2-02 [15]

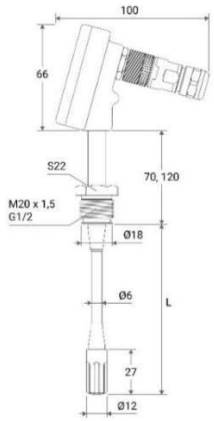


Рисунок 3.14 – Габаритні розміри TEPA Модель 2-02 [15]

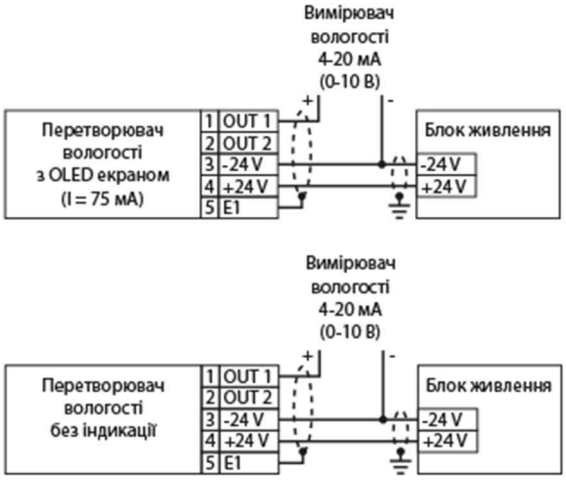


Рисунок 3.15 – Схема підключення ТЕРА Модель 2-02 [15]

5) Тахометр АКУТЕК ТХ01

Тахометр ТХ01 призначений для вимірювання частоти обертання валів, лінійної швидкості конвеєрів і часу напрацювання обладнання.

Пристрій вимірює частоту імпульсів із можливістю відображення в імп/с, імп/хв або імп/год та перетворення її у лінійну швидкість за допомогою масштабного коефіцієнта. Оснащений шестирозрядним індикатором для відображення частоти або часу. Тахометр має один або два вихідні канали для сигналізації про перевищення або зниження частоти та досягнення заданого часу напрацювання [16].

Технічні характеристики ТХ01 представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики ТХ01 (220 В) [16]

Параметр	Значення
1. Напруга живлення	90…264 В AC, 47-63 Гц (номінал 220 В)
2. Споживана потужність	не більше 10 ВА
3. Діапазон вимірювання частоти	0,2…2500 Гц
4. Діапазон вимірювання часу	1 с … 9999 діб
5. Інтерфейс зв’язку	RS-485 (Modbus RTU/ASCII)
6. Швидкість обміну	2400…115200 біт/с
7. Тип входу	імпульсний (NPN)

Продовження таблиці 3.5

8. Максимальна вхідна напруга	до 30 В
9. Робоча температура	-20…+70 °С
10. Виходи	реле / транзистор / симістор / аналог (4-20 мА, 0-10 В)
11. Маса	не більше 0,5 кг
12. Термін служби	до 12 років



AQteck

Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд ТХ01 [16]

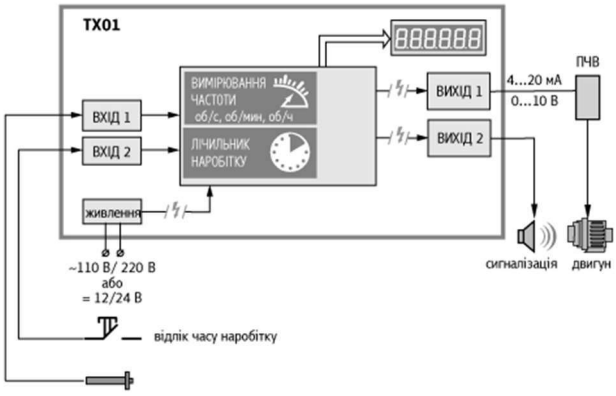


Рисунок 3.17 – Схема підключення ТХ01 [16]

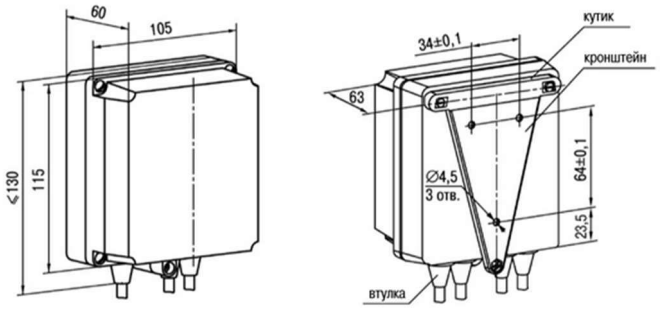


Рисунок 3.18 – Габаритні розміри ТХ01 [16]

6) Безконтактні індуктивні датчики АКУТЕК ІДП

Індуктивні датчики ІДП – це циліндричні безконтактні датчики для виявлення металевих об’єктів на відстані 2-15 мм залежно від моделі. Чутливий елемент розміщений на торці корпусу та захищений ударостійким ковпачком. Датчики реагують тільки на метал, не потребують механічного контакту та мають високу надійність завдяки відсутності рухомих частин. Через високу частоту перемикання вони можуть використовуватися як первинні перетворювачі імпульсів швидкості [17].

У даній системі датчик ІДП інтегрований разом із тахометром ТХ01, формуючи імпульсний сигнал, пропорційний швидкості обертання або переміщення, для подальшої обробки тахометром.

Технічні характеристики ІДП представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики індуктивних датчиків серії ІДП [17]

Параметр	Значення
1. Тип датчика	Індуктивний, безконтактний
2. Діаметр корпусу	12 / 18 / 30 мм
3. Схема підключення	NPN / PNP / двопровідна
4. Напруга живлення	10-30 V DC або 20-250 V AC
5. Номінальний струм навантаження	до 200-300 мА
6. Максимальна частота спрацювання	до 2500 Гц
7. Ступінь захисту	IP67
8. Робоча температура	-25…+70 °C
9. Вологість	35-95 %
10. Матеріал корпусу	Латунь нікельована



Рисунок 3.19 – Зовнішній вигляд ІДП [17]

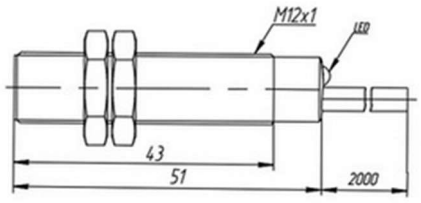


Рисунок 3.20 – Габаритні розміри ІДП [17]

7) Вихровий витратомір LUGB

Вихровий витратомір LUGB базується на ефекті вихорів Кармана та використовує п’єзоелектричний датчик. Він характеризується широким діапазоном вимірювань, високою точністю та низьким падінням тиску, видаючи імпульсні сигнали, пропорційні витраті. Прилад сумісний із комп’ютерними системами і застосовується для контролю витрат газів, рідин, а також насиченої і перегрітої пари.

Технічні характеристики LUGB представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики вихрового витратоміра LUGB [18]

Параметр	Значення
1. Діаметр трубопроводу	DN15…DN300 мм
2. Номінальний тиск	0…6,4 МПа
3. Температура середовища	-40…+400 °C
4. Матеріал корпусу	SS304, SS316
5. Допустима вібрація	0,2 g (п’єзо), 1,0-2,0 g (ємнісний)
6. Точність	±1% / ±1,5%
7. Діапазон вимірювання	1:6…1:30
8. Живлення	24 В DC або батарея 3,6 В
9. Вихідний сигнал	4-20 мА, імпульсний, RS485 (Modbus), HART
10. Коефіцієнт втрат тиску	Cd = 2,4
11. Вибухозахист	Ex ia, Ex d
12. Ступінь захисту	IP66
13. Умови експлуатації	-20…+80 °C, вологість 5-90 %
14. Середовище	газ, рідина, пара
15. Дальність передачі	до 300 м (імпульс), до 750 Ом (4-20 мА)



Рисунок 3.21 – Зовнішній вигляд вихрового витратоміра LUGB [18]



Рисунок 3.22 – Схема підключення вихрового витратоміра LUGB [18]

8) Одноканальний індикатор-вимірювач МІКРОЛ ІТМ-300

ІТМ-300 - промисловий одноканальний індикатор-вимірювач для контролю температури, тиску, вологості, витрати, рівня та інших фізичних параметрів.

Тип вимірюваної величини залежить від підключеного датчика зі струмовим, напруговим або термометричним виходом. Прилад може працювати автономно або у складі автоматизованих систем керування, контролю та диспетчеризації технологічних процесів у різних галузях промисловості [19].

Технічні характеристики ІТМ-300 представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики ІТМ-300 [19]

Параметр	Значення
1. Вхід	універсальний (4-20 мА, 0-10 В), термопари, Pt100, Pt1000 тощо

Продовження таблиці 3.8

Параметр	Значення
2. Вихід	4-20 мА / 0-10 В (опція)
3. Дискретні виходи	до 2 (реле / транзистор)
4. Інтерфейс	RS-485 (Modbus RTU)
5. Індикація	LED, 4-розрядний
6. Живлення	100-242 В AC або 18-36 В DC
7. Монтаж	щитовий (48×96 мм)



Рисунок 3.23 – Зовнішній вигляд ITM-300 [19]

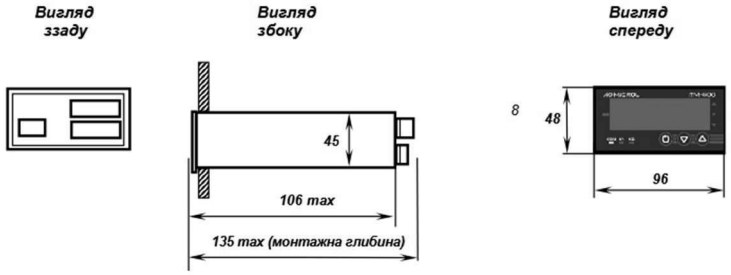


Рисунок 3.24 – Габаритні розміри ITM-300 [19]

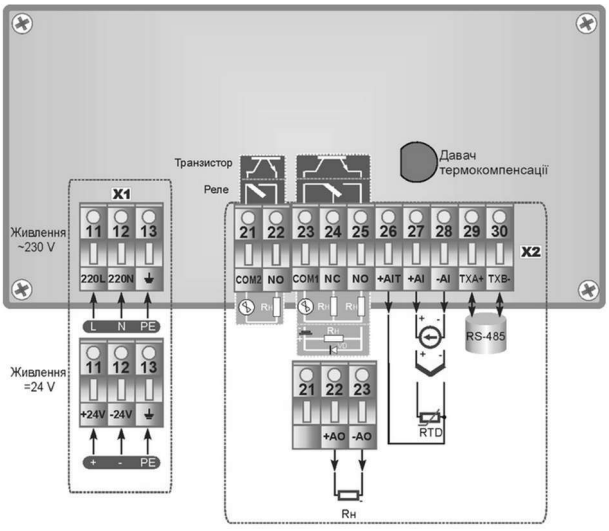


Рисунок 3.25 – Схема підключення ITM-300 [19]

9) Двоканальний індикатор - вимірювач МІКРОЛ ІТМ-320

ІТМ-320 – промисловий двоканальний індикатор-вимірювач для одночасного контролю температури, тиску, вологості, витрати, рівня та інших параметрів залежно від підключених датчиків.

Прилад має два універсальні входи, виконує вимірювання, індикацію, цифрову обробку та масштабування сигналів без перекалібрування. Наявна підтримка функцій сигналізування перевищення меж, формування керуючих сигналів і передачу даних через RS-485, USB, Ethernet та Web-інтерфейс [20].

Технічні характеристики ІТМ-320 представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Технічні характеристики ІТМ-320 [20]

Параметр	Значення
1. Входи	універсальний (4-20 мА, 0-10 В), термопари, Pt100, Pt1000 тощо
2. Аналоговий вихід	до 2 (4-20 мА / 0-10 В)
3. Дискретні виходи	до 6 (реле / транзистор)
4. Інтерфейси	RS-485, USB, Ethernet
5. Протоколи	Modbus RTU / TCP
6. Архів	microSD (CSV)
7. Індикація	цифровий дисплей
8. Живлення	100-242 В AC або 18-36 В DC
9. Монтаж	щитовий (96×96 мм)



Рисунок 3.26 – Зовнішній вигляд ІТМ-320 [20]

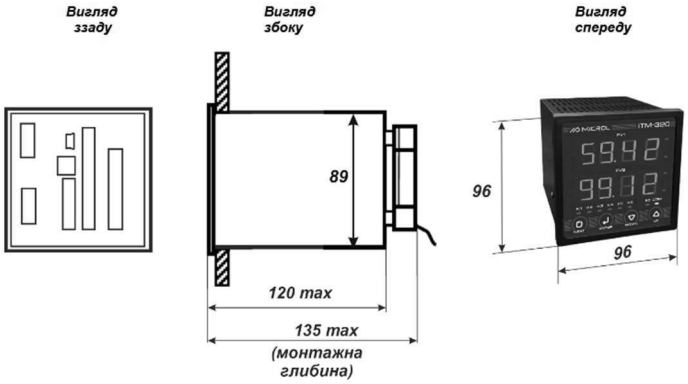


Рисунок 3.27 – Габаритні розміри ITM-320 [20]

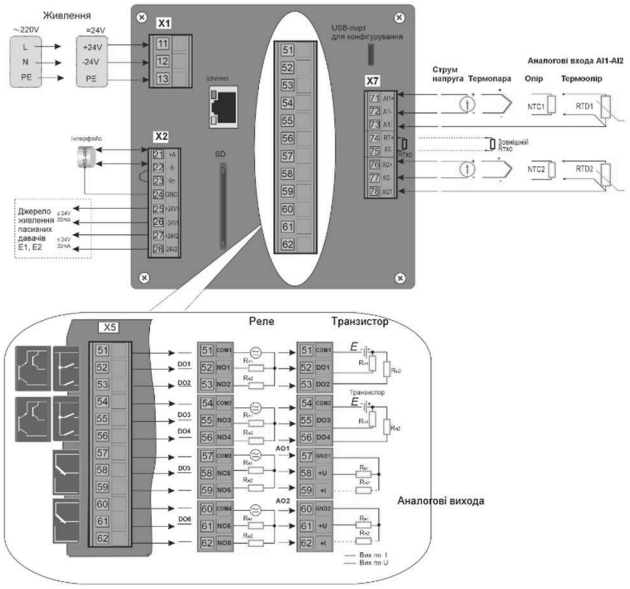


Рисунок 3.28 – Схема підключення ITM-320 [20]

10) Модуль збору та архівування даних МІКРОЛ MAS-100

MAS-100 – пристрій збору та архівації технологічних даних від контролерів і датчиків через RS-485 за протоколом Modbus RTU. Модуль автоматично збирає, обробляє та зберігає дані у форматі CSV на карту пам’яті, забезпечує доступ до них локально або через Ethernet. Підтримує режими Master/Slave, конвертацію Modbus TCP в Modbus RTU. Налаштування й моніторинг виконуються через вбудований Web-інтерфейс. Пристрій сумісний із SCADA та PLC, підтримує журнал подій, резервне копіювання конфігурації й оновлення прошивки через USB [21].

Технічні характеристики MAS-100 представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Технічні характеристики MAS-100 [21]

Параметр	Значення
1. Інтерфейси	2×RS-485, Ethernet, USB
2. Протоколи	Modbus RTU, Modbus TCP, Web
3. Архівування	microSD до 32 ГБ (CSV)
4. Конфігурування	Web-інтерфейс
5. Живлення	100-242 В AC або 18-36 В DC
6. Монтаж	DIN-рейка
7. Габарити	54×91×58 мм



Рисунок 3.29 – Зовнішній вигляд MAS-100 [21]

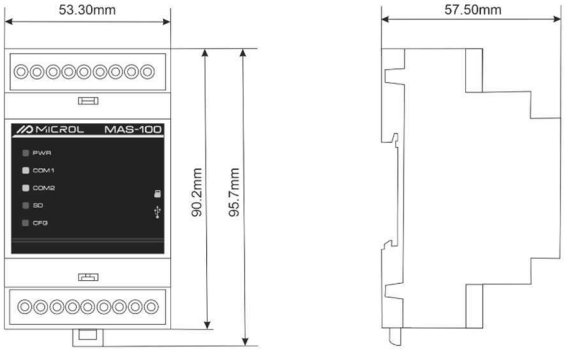


Рисунок 3.30 – Габаритні розміри MAS-100 [21]

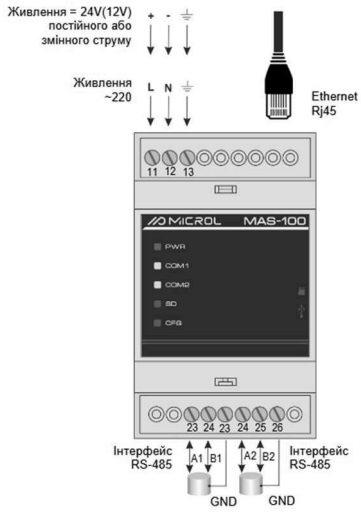


Рисунок 3.31 – Схема підключення MAS-100 [21]

11) Блок живлення БП-50-1к

Імпульсний блок живлення БП-50-1к призначений для живлення приладів і промислового обладнання стабілізованою напругою 24 В постійного струму.

Технічні характеристики БП-50-1к представлені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Технічні характеристики БП-50-1к [22]

Параметр	Значення
1. Кількість каналів	1
2. Гальванічне розділення	Від мережі живлення
3. Номінальна вихідна напруга	24 В постійного струму
4. Номінальний струм навантаження	2 А
5. Номінальна вихідна потужність каналу	48 В·А
6. Клас стабілізації вихідної напруги	1.0
7. Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги	0.5 %
8. Захист від короткого замикання та перевантаження	Є
9. Автоматичне відновлення нормальної роботи	Після усунення перевантаження або короткого замикання
10. Фільтр захисту від електромагнітних завад від мережі	Вбудований
11. Захист від дії кліматичних чинників	Відповідає виконанню УХЛ 4.2 згідно з ГОСТ 15150, для роботи при температурі від -40 °С до +70 °С
12. Захист від дії вібрацій	Відповідає виконанню N2 згідно з ГОСТ 12997
13. Захист від пилу та вологи	Відповідає ступеню IP30 згідно з ГОСТ 14254

Продовження таблиці 3.11

Параметр	Значення
14. Напруга живлення (мережа змінного струму, частота 47-63 Гц)	Від 110 В до 242 В
15. Споживана потужність: номінальна / максимальна	60 В·А / 90 В·А
16. Струм спрацювання захисту при навантаженні, не більше	5 А
17. Маса, не більше	0,35 кг
18. Габаритні розміри (В × Ш × Г)	96 × 100 × 110 мм
19. Кріплення	DIN-рейка 35×7,5 EN50022 або настінне

Блок живлення має литий ударостійкий пластмасовий корпус із кріпленням для монтажу на стандартну 35 мм DIN-рейку. При монтажі слід використовувати дріт, розрахований на максимальний робочий струм блоку, без пошкоджень ізоляції та жил. Кінці проводів мають бути акуратно скручені, без виступаючих жил, і залуджені для надійного контакту з клемами [22].

Всередині корпусу розміщені модулі живлення у вигляді друкованих плат із необхідними радіоелементами. На передній панелі нанесені технічні дані та позначення блоку. Індикатори наявності мережевої та вихідної напруги видно через отвори в корпусі. Клеми для підключення вхідних і вихідних ланцюгів розташовані на платі та виведені назовні для зручного монтажу [22].

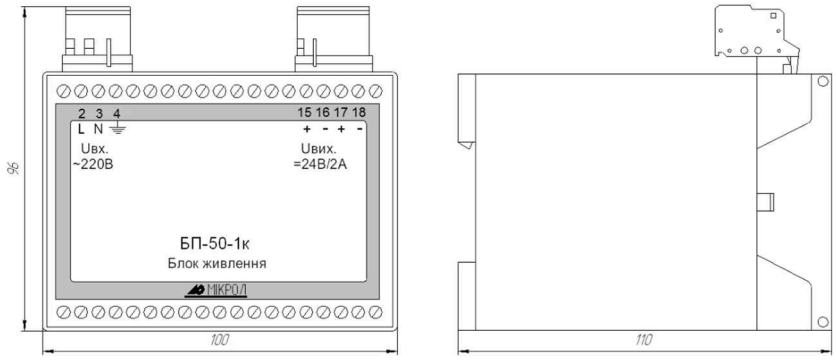


Рисунок 3.32 – Зовнішній вигляд та габаритні розміри блоку БП-50-1к [22]

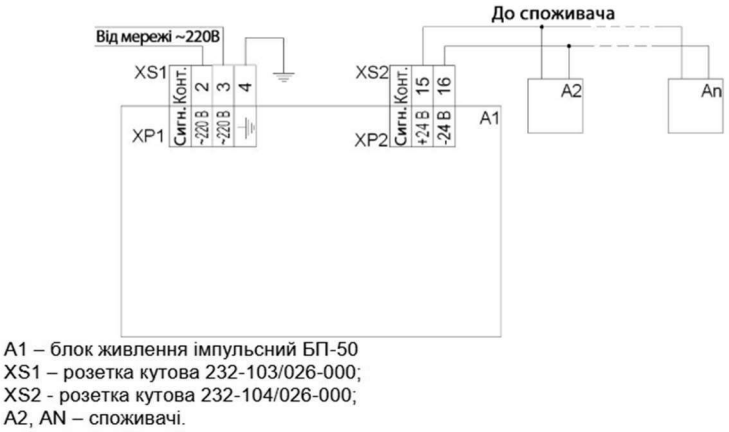


Рисунок 3.33 – Схема електричного підключення БП-50-1к [22]

12) Блок живлення БП24-2к

Блок живлення БП24-2к призначений для живлення стабілізованою напругою постійного струму комплексів вимірювальних перетворювачів теплоенергетичних параметрів, а також різних приладів та промислового обладнання.

БП24-2к має вбудований захист від короткого замикання та перевантаження з автоматичним відновленням після усунення несправності.

Блок живлення має литий ударостійкий пластмасовий корпус із кріпленням для монтажу на стандартну 35 мм DIN-рейку. Наявність мережевої та вихідної напруги контролюється індикаторами, світіння яких видно через отвори на передній панелі [23].

Технічні характеристики БП24-2к представлені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Технічні характеристики БП24-2к [23]

Параметр	Значення
1. Кількість каналів	2
2. Номінальне значення вихідної напруги	24 В
3. Номінальне значення струму навантаження для одного каналу	0,3 А
4. Допустиме відхилення вихідної напруги	від +10% до −15%
5. Коефіцієнт пульсації вихідної напруги	2%
6. Живлення блоку	Змінний струм 220 В (від 187 до 242 В), частота 50 Гц (від 49 до 51 Гц)
7. Потужність одного каналу	30 ВА

Продовження таблиці 3.12

Параметр	Значення
8. Маса блоку	0,7 кг
9. Габаритні розміри (В×Ш×Г), не більше	96 мм × 100 мм × 110 мм
10. Температура довкілля	від −40 °С до +70 °С
11. Атмосферний тиск	від 84 кПа до 106,7 кПа
12. Вібрація (частотної/амплітудної)	до 60 Гц / до 0,1 мм
13. Приміщення	Закрите, вибухо- та пожежобезпечне.
14. Ступінь захисту	IP30

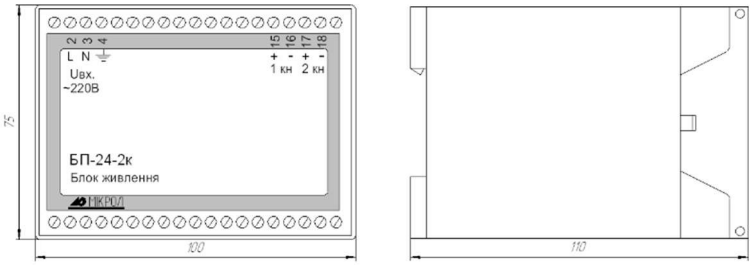


Рисунок 3.34 – Зовнішній вигляд та габаритні розміри блоку БП24-2к [23]

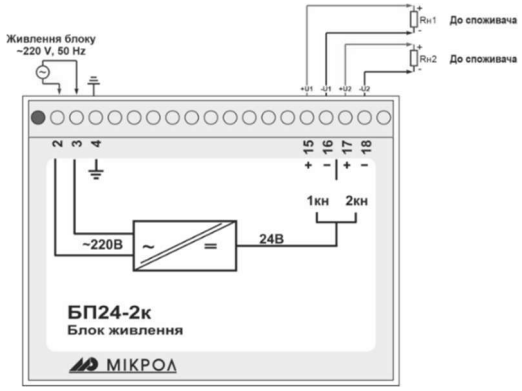


Рисунок 3.35 – Схема електричного підключення БП24-2к [23]

13) Нормуючий перетворювач НПМ-15

НПМ-15 – універсальний нормуючий перетворювач для перетворення сигналів від термопар, термометрів опору, а також датчиків тиску, витрати та інших параметрів у стандартні аналогові сигнали струму або напруги. Налаштування здійснюється через USB, передача даних – через RS-485 Modbus RTU. Також передбачені OLED-дисплей і функції сигналізації [24].

Технічні характеристики НПМ-15 представлені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Технічні характеристики НПМ-15 [24]

Параметр	Значення
1. Вхід	1 універсальний (RTD, термопари, 0-10 В, 4-20 мА)
2. Аналоговий вихід	4-20 мА, 0-20 мА, 0-5 мА, 0-10 В
3. Дискретні виходи	2 (реле / транзистор)
3. Інтерфейси	USB, RS-485 (Modbus RTU)
5. Індикація	OLED дисплей
6. Живлення	24 В DC або 230 В AC



Рисунок 3.36 – Зовнішній вигляд НПМ-15 [24]

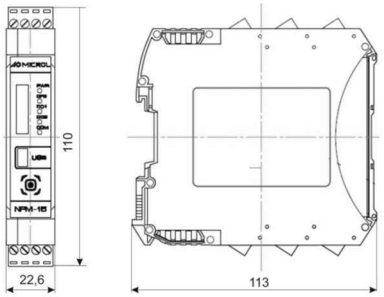


Рисунок 3.37 – Габаритні розміри НПМ-15 [24]

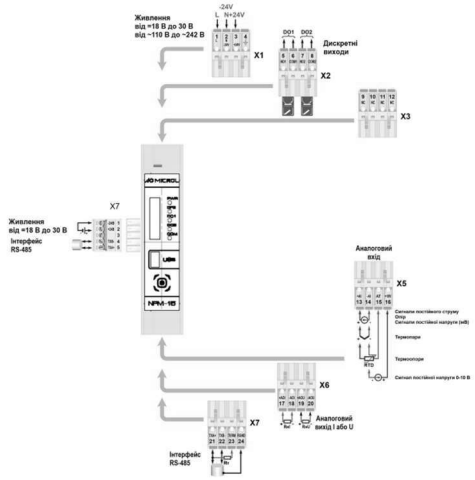


Рисунок 3.38 – Схема підключення НПМ-15 [24]

3.4.2 Промислові контролери

Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M580 BMEP581020 призначений для автоматизації промислових процесів у енергетиці, водопідготовці, харчовій, хімічній, машинобудівній та інших галузях. Контролер використовується для керування технологічним обладнанням, конвеєрами, насосними станціями, печами, системами вентиляції, дозування та контролю тиску.

Модель належить до сімейства ePAC, поєднуючи функції класичного ПЛК із розширеними мережевими можливостями. Підтримка Ethernet Modbus/TCP та EtherNet/IP забезпечує швидкий обмін даними, відкриту архітектуру й інтеграцію з системами SCADA та MES [25].

1) Загальний вигляд та конструктивні особливості.

Контролер Modicon BMEP581020 має модульну архітектуру, що забезпечує зручність розширення та модернізації системи автоматизації. Пристрій встановлюється у шасі BMEXBP/BMXXBP, де обмін даними та живлення модулів здійснюється через внутрішню магістраль. Конструкція контролера забезпечує стійкість до промислових завад і підтримує гарячу заміну модулів без зупинки технологічного процесу [25][26].



Рисунок 3.39 – Зовнішній вигляд MODICON BMEP581020 [25]

У таблиці 3.14 наведено основні технічні характеристики контролера Modicon BMEP581020.

Таблиця 3.14 – Основні характеристики контролера BMEP581020 [25]

Параметр	Характеристика
1. Тип процесора	Двоядерний ARM Cortex-A9 SPEAr
2. Оперативна пам’ять	4 МБ для користувацьких програм
3. Додаткова пам’ять	SD-карта до 4 ГБ
4. Кількість локальних шасі	До 8
5. Кількість слотів шасі	4, 6, 8 або 12
6. Робочий температурний діапазон	Від −25 °C до +70 °C
7. Стійкість до завад	Відповідає IEC 61131-2
8. Живлення	Через модулі серії BMXCPS
9. Гаряча заміна модулів	Підтримується (Hot Swap)
10. Мережеві інтерфейси	Вбудовані порти Ethernet RJ-45

2) Модулі вводу-виводу

Контролер Modicon M580 працює на платформі Modicon X80, яка слугує універсальним модулем вводу-виводу для широкого спектру контролерів Schneider Electric. Завдяки цьому забезпечується зручне інтегрування пристроїв різних поколінь із збереженням їх сумісності.



Рисунок 3.40 – Загальний вигляд MODICON X80 [27]

Модулі X80 представлені дискретними, аналоговими, HART-сумісними, комунікаційними та спеціалізованими пристроями. Вони призначені для збору дискретних сигналів і управління виконавчими механізмами, а також для оцифрування аналогових даних контролером.

Система вводу-виводу підтримує до 1024 каналів (дискретних/аналогових), підключення HART-пристроїв для діагностики та швидкий обмін даними через X-Bus/Ethernet. Можливе розміщення до 8

локальних шасі на 100 м. Hot Plug та автоматичне виявлення модулів спрощують експлуатацію та розширення системи.

3) Варіанти живлення

Для живлення контролера та підключених модулів використовуються блоки серії BMXCPS, які забезпечують стабільну напругу постійного струму 24 В. Контролер може працювати з одним або двома незалежними джерелами живлення.



Рисунок 3.41 – Зовнішній вигляд БЖ серії BMXCPS [28]

Для реалізації живлення системи можуть застосовуватись стандартні блоки живлення серії BMXCPS2000, BMXCPS2010 та BMXCPS3500. Для підвищення надійності використовуються резервовані джерела живлення BMXCPS4002 і BMXCPS4022, а також шасі BMEXBP0602 або BMEXBP1002 з підтримкою резервування живлення для систем безперервної роботи. Усі модулі мають вбудований захист від короткого замикання, перенапруги та перевантаження.

4) Кібербезпека та програмування

Контролер BMEP581020 має високий рівень захисту інформації та є першим у своєму класі, який отримав сертифікат Achilles Level 2 з кібербезпеки. У системі реалізовані такі функції, як контроль доступу користувачів, перевірка цілісності програм, ведення журналу подій безпеки та підтримка шифрованих з’єднань через протоколи HTTPS і IPSec.

Контролер програмується в середовищі EcoStruxure Control Expert (Unity Pro) (рис. 3.42), яке відповідає міжнародному стандарту IEC 61131-3. Це середовище підтримує всі сучасні мови програмування ПЛК: LD (релейно-контактна схема), ST (структурований текст), FBD (функціональні блоки), SFC (послідовні функціональні діаграми) та інші. Також це програмне забезпечення налагодження, симуляцію, моніторинг, ведення трендів і діагностику обладнання.

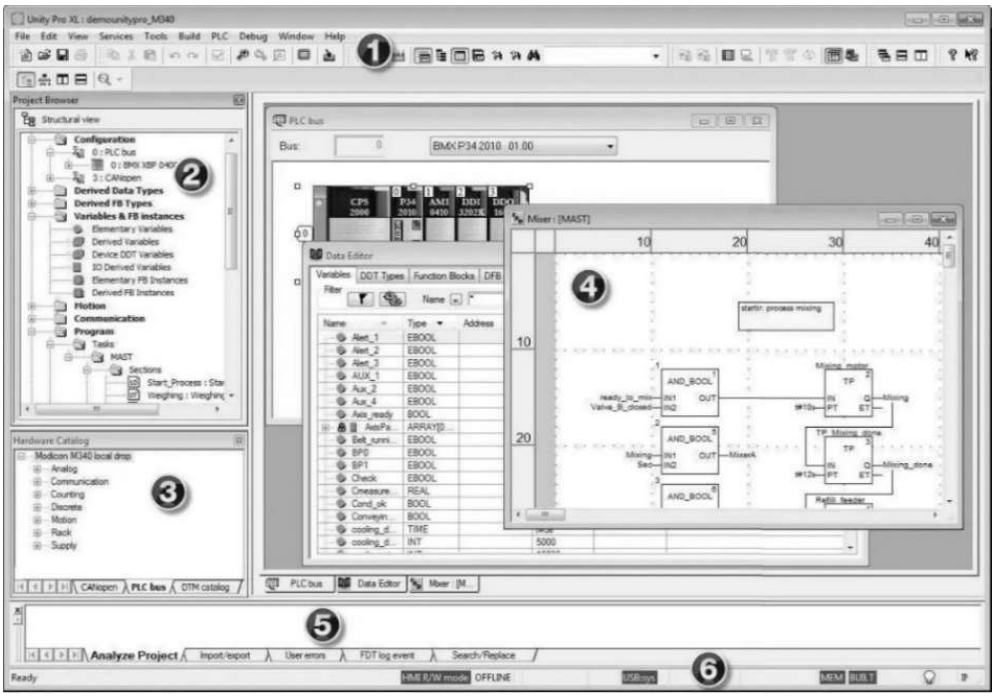


Рисунок 3.42 – Зовнішній визляд EcoStruxure Control Expert (Unity Pro) [29]

5) Компонування контролера

1. Аналіз вхідної інформації та характеристик сигналів

В таблиці 3.15 наведені вхідні сигнали контролера.

Таблиця 3.15 – Вхідні сигнали

Назва	Пристрій	Сигнал
1. Температури спалювальних газів в топках I і II зон	Тера Модель 1-3	4-20 мА
2. Тиск повітря	ПД100	4-20 мА

Продовження таблиці 3.15

Назва	Пристрій	Сигнал
3. Тиск пари	ПД100	4-20 мА
4. Тяга топок I і II зон	Сафір-М 7220	4-20 мА
5. Вологість повітря I і II зон	Перетворювачі вологості і температури “Y” 2-02	4-20 мА
6. Швидкість конвеєра печі	Тахометр ТХ01	4-20 мА

Всі ці сигнали відносяться до аналогових уніфікованих токових входів, що не лише забезпечує високий рівень перешкодостійкості, а й спрощує їх обробку в контролері.

Для їх обробки обрано BMXAMI0800, який має 8 диференційованих каналів вводу, що працюють в режимах 0-20/4-20 мА.

Кількість сигналів - 10, тому:

10 / 12 = 0,83, тому 1 модуль аналогового вводу достатній з запасом у 2 канали для майбутнього розширення.

Управління технологічним процесом передбачає вплив на споживання газу, повітря, пари та роботу механізованого обладнання печі.

2. Виходи та структурування керувальних команд

В таблиці 3.16 наведені вихідні сигнали контролера.

Таблиця 3.16 – Вихідні сигнали

Назва	Пристрій	Сигнал
1. Зміна витрати газу для зон I та II	Два пускача ПБР-21 з виконавчими механізмами МЕО-100	Дискретний
2. Зміна тиску повітря	Два пускача ПБР-21 з виконавчими механізмами МЕО-100	Дискретний
3. Зміна тиску пари	Пускач ПБР-21 з виконавчим механізмом МЕО	Дискретний
4. Зміна швидкості роботи вентиляторів топок зон I та II	Перетворювач частоти Sinamics G120	Аналоговий
5. Зміна швидкості роботи конвеєра печі	Перетворювач частоти Sinamics G120	Аналоговий
6. Зміна швидкості роботи вентиляційної системи печі	Перетворювач частоти Sinamics G120	Аналоговий
7. Вмикання/вимикання електродвигуна щітки конвеєра	LC1D09BD	Дискретний

Отже, загальна кількість каналів дискретного керування - 6 виходи, тому для передачі таких сигналів обраний модуль BMXDRC0805, що містить 8 дискретних виходів.

Кількість необхідних модулів - 6 / 8 = 0,25, тому 1 модуль дискретного виходу вистачає з резервом у 2 канали.

Для передачі аналогових сигналів застосовується модуль BMXAMO0802, що містить 8 аналогових виходів.

Отже, загальна кількість сигналів аналогового керування - 4 / 8 = 0.5.

3. Центральний процесор контролера

Базою системи виступає контролер BMEP581020. Оскільки розподілений ввід/вивід не є необхідним, було обрано конфігурацію з одним шасі. Для цього застосовано шасі BMXXBP0600, яке оснащене шістьма слотами.

4. Конфігурація шасі та структура обладнання

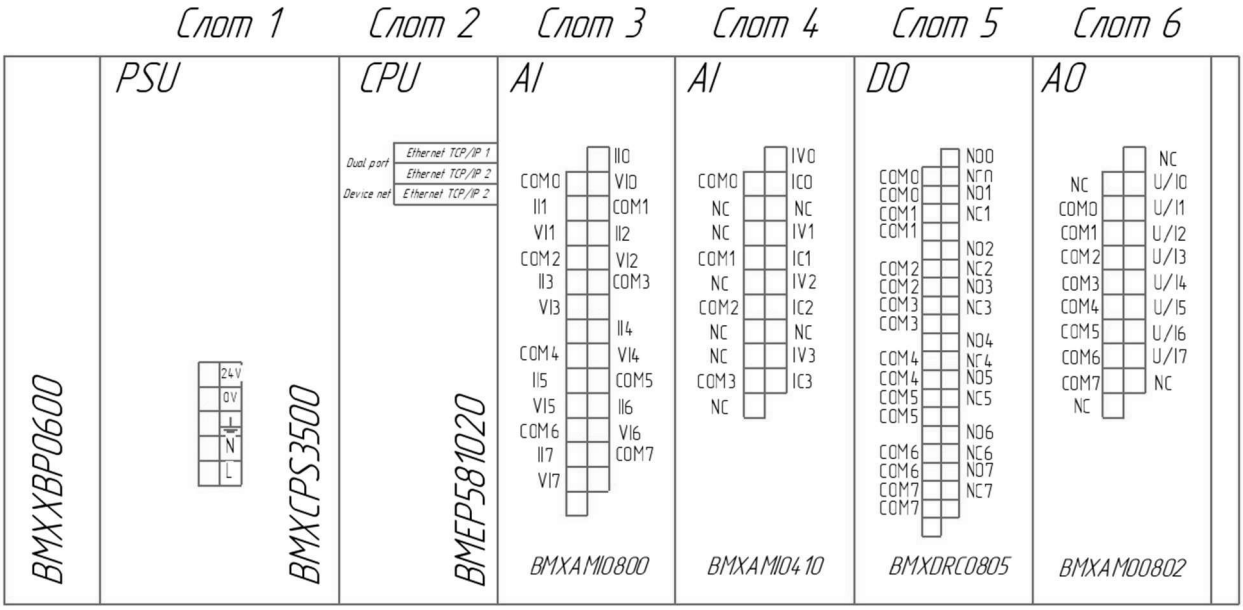


Рисунок 3.43 – Компонування контролера Modicon M580 BMEP581020

Схема заповнення слотів (рис. 3.43):

— слот 1 - BMXCPS3500 (блок живлення);

— слот 2 - BMEP581020 (центральний процесор);

— слот 3 - BMXAMI0800 (аналоговий ввід 8 активних каналів);

— слот 4 – BMXAMI0410 (аналоговий ввід 2 активних каналів);

— слот 5 - BMXDRC0805 (дискретний вивід 6 активних каналів);

— слот 6 - BMXAMO0802 (аналоговий вивід 4 активних каналів).

Така конфігурація забезпечує оптимальне розташування модулів і мінімізує довжину внутрішніх шин.

5. Підбір модуля живлення

Для вибору блоку живлення необхідно врахувати сумарне споживання всіх модулів наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Сумарне споживання всіх модулів

Модуль	Споживання струму	Споживання енергії
1. BMEP581020	270 мА на 24 В постійний струм	6,48 Вт на 24 В постійний струм
2. BMXAMA0800	150 мА на 3.3 В постійний струм 41 mA на 24 В постійний струм	0,90 Вт 24 В постійний струм типовий 1,10 Вт 24 В постійний струм максимум 0,32 Вт 3.3 В постійний струм типовий 0,48 Вт 3.3 В постійний струм максимум
3. BMXAMI0410	150 мА на 3.3 В постійний струм 45 мА на 24 В постійний струм	0,82 Вт 24 В постійний струм типовий 1,30 Вт 24 В постійний струм максимум 0,32 Вт 3.3 В постійний струм типовий 0,48 Вт 3.3 В постійний струм максимум
4. BMXDRC0805	40 мА на 3,3 В постійний струм 101 мА на 24 В постійний струм	0.132 Вт на 3.3 В постійний струм 2.424 на 24 В постійний струм
5. BMXAMO0802	150 мА на 3.3 В постійний струм 140 мА на 24 В постійний струм	3 Вт 24 В постійний струм типовий 3,6 Вт 24 В постійний струм максимум 0,45 Вт 3.3 В постійний струм типовий 0,51 Вт 3.3 В постійний струм максимум

Для оцінки навантаження на блок живлення було виконано розрахунок споживання струму та потужності модулів, підключених до шини 24 В. До складу системи входять процесорний модуль CPU BMEP581020, аналоговий модуль BMXAMA0800 та BMXAMI0410, дискретний модуль BMXDRC0805 та модуль аналогових виходів BMXAMO0802. Сумарне споживання струму по

шині 24 В становить 597 мА. Загальна потужність навантаження на даній шині складає 13,624 Вт.

Також було проведено розрахунок споживання для шини 3,3 В, до якої підключені модулі BMXAMA0800, BMXAMI0410 BMXDRC0805 та BMXAMO0802. Сумарний струм споживання по шині 3,3 В становить 490 мА, а сумарна потужність - 1,222 Вт.

Отримані результати свідчать про те, що обраний блок живлення BMXCPS3500 повністю задовольняє вимоги системи за параметрами струму та потужності. Крім того, дозволяється у подальшому виконувати модернізацію без необхідності заміни джерела живлення.

Конфігурація передбачає:

— резерв 2 аналогових каналів;
— резерв 2 дискретних виходів (DO6-DO8);
— резерв 4 аналогових виходів (AO5-AO8);
— достатній запас по струму.

Система може легко масштабуватися для роботи в більш складних технологічних циклах.

6) Алгоритм роботи системи

Програма керування температурою спалювальних газів у топках I та II виконується на ПЛК мовою ST відповідно до стандарту IEC 61131-3. Система має режими ПУСК, СТОП, АВТО та РУЧНИЙ. При натисканні кнопки ПУСК система вмикається та дозволяється керування топками. При натисканні кнопки СТОП система вимикається, усі кнопки скидаються, автоматичний і ручний режими вимикаються, клапани закриваються, а температура поступово знижується за рахунок охолодження.

Для кожної топки використовується окремий клапан регулювання подачі газу та окремий датчик температури. У режимі АВТО керування клапанами виконується окремими ПІ-регуляторами, які підтримують задану температуру для кожної топки. Регулятор формує керуючий сигнал залежно

від різниці між заданою та поточною температурою. У режимі РУЧНИЙ оператор окремо керує клапанами кнопками БІЛЬШЕ та МЕНШЕ для кожної топки. При виборі автоматичного режиму ручний режим вимикається, а при виборі ручного режиму автоматичний режим скидається.

Положення клапанів змінюється плавно та обмежується в межах від 0 % до 100 %. Температура в кожній топці змінюється залежно від відкриття відповідного клапана з урахуванням коефіцієнтів нагріву та охолодження. Значення температури обмежується в межах від 0 °С до 550 °С.

Для кожної топки передбачена окрема аварійна сигналізація верхнього та нижнього рівня температури. Аварія високої температури спрацьовує при перевищенні 540 °С, а аварія низької температури - при зниженні температури нижче 460 °С. Під час початкового нагріву аварійна сигналізація заблокована та починає працювати лише після першого досягнення робочого діапазону температур 490-510 °С.

Програмна реалізація управління температурою спалювальних газів в топках I і II зон представлена у Додатку А.

3.4.3 Виконавчі механізми та регулюючі органи

Виконавчі механізми та регулюючі органи призначені для безпосереднього впливу на технологічний процес шляхом зміни положення елементів, що регулюють технологічні параметри. Саме ці пристрої реалізують керуючі сигнали, які формуються системою автоматичного регулювання.

1) Пускач безконтактний реверсивний ПБР-21

Пускач ПБР-21 призначений для безконтактного керування електричними виконавчими механізмами МЕО з однофазними конденсаторними електродвигунами.

Пристрій відзначається високою надійністю, довговічністю та великим ресурсом циклів вмикання і вимикання. Конструктивно пускач складається з

плати, кожуха та передньої панелі з клемними колодками для підключення зовнішніх ланцюгів і гвинтом заземлення. ПБР-21 встановлюється на DIN-рейку [37].

Технічні характеристики ПБР-21 представлені в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Технічні характеристики ПБР-21 [37]

Параметр	Значення
1. Вхідний сигнал	24 В постійного пульсуючого струму
2. Вхідний опір пускача	750 Ом
3. Максимальний комутований струм	4 А
4. Швидкодія	25 мс
5. Різниця між тривалістю вхідного та вихідного сигналів	Не більше 20 мс
6. Напруга живлення ланцюгів керування	22-26 В
7. Норма середньої напрацювання на відмову	200000 годин
8. Повний строк служби	10 років
9. Ступінь захисту	IP20
10. Електроживлення	220 В, 50 Гц
11. Споживана потужність	7 Вт
12. Маса	4 кг



Рисунок 3.45 – Зовнішній вигляд ПБР-21 [37]



Рисунок 3.46 – Схема зовнішніх з'єднань ПБР-21

2) Виконавчий механізм однооборотний МЕО-100

Механізм МЕО-100/25-0,25 - виконавчий механізм із крутним моментом 100 Н·м, призначений для переміщення запірної арматури та інших неповноповоротних органів в АСУ ТП.

Привід складається з черв'ячного редуктора, електродвигуна, блоку сигналізації положення, механічного гальма, панелі з конденсаторами, мікроперемикачів, важеля, ручного приводу та елементів підключення. Механізм може встановлюватися в будь-якому робочому положенні біля трубопровідної арматури та витримує сейсмічні впливи до 8 балів MSK-64 [38].

Позначення МЕО-100/25-0,25 У84 У2 означає: крутний момент 100 Н·м, час повного ходу 25 с, хід вихідного валу 0,25 оберту / 90°, струмовий вихідний сигнал датчика, живлення 220 В, кліматичне виконання У2 з температурою роботи від -30 до +50 °С. Живлення може бути однофазним 220-240 В або трифазним 220/380 В.

Технічні характеристики МЕО-100 представлені в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 –Технічні характеристики МЕО-100 [38]

Параметр	Значення
1. Крутний момент на вихідному валу	100 Нм
2. Час повного ходу вихідного валу	25 сек
3. Повний хід вихідного валу	0,25 обороту (90)
4. Тип датчика сигналізації положення	Струмовий (4-20 мА, 0-20 мА, 0-5 мА), реостатний (0-120 Ом), індуктивний, або відсутній (БКВ)
5. Кліматичне виконання	У2, Т2, УХЛ2
6. Ступінь захисту	IP54
7. Напруга живлення	220-240 В однофазне або 220/380 В трифазне
8. Частота живлення	50 або 60 Гц
9. Допустимі відхилення напруги	-15% до +10%
10. Допустимі відхилення частоти	-2 до +2,7 Гц
11. Вібрація	Частоти 10-150 Гц, амплітуда 0,075 мм при 57-62 Гц
12. Максимальна частота включень	До 630 разів на годину
13. Тривалість включень	До 25% часу

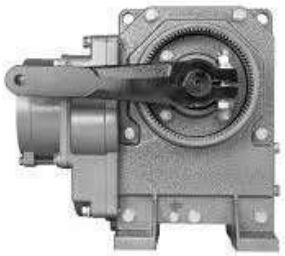


Рисунок 3.47 – Зовнішній вигляд МЕО-100/25-0,25 [38]



Рисунок 3.48 – Схема зовнішніх з’єднань МЕО-100/25-0,25 з ПБР-21

3) Блок ручного керування, універсальний БРУ-110

Блок ручного керування БРУ-110 призначений для ручного та автоматичного керування виконавчими механізмами в системах автоматизації технологічних процесів. Пристрій забезпечує формування керуючих сигналів для керування положенням виконавчих механізмів.

БРУ-110 може працювати у двох режимах: автоматичному та ручному. В автоматичному режимі блок передає сигнал від контролера безпосередньо на виконавчий механізм. У ручному режимі оператор має можливість безпосередньо керувати роботою виконавчого механізму за допомогою органів керування на передній панелі приладу [39].

Технічні характеристики БРУ-110 представлені в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Технічні характеристики БРУ-110 [39]

Параметр	Значення
1. Кількість аналогових входів	2

Продовження таблиці 3.20

2. Діапазони вхідних сигналів	0…5 мА; 0…20 мА; 4..20 мА; 0..10 В
3. Кількість аналогових виходів	1
4. Діапазони вихідних сигналів	0…5 мА; 0…20 мА; 4…20 мА; 0…10 В
5. Кількість дискретних входів	4
6. Тип керуючих сигналів	«Більше» / «Менше»
7. Тип виходів	релейні, перекидні
8. Кількість релейних виходів	4
9. Напруга живлення	24 В DC або 230 В AC
10. Споживана потужність	до 8 ВА
11. Інтерфейс зв’язку	RS-485
12. Тип індикації	4-розрядний семисегментний індикатор, LED-шкала
13. Ступінь захисту	IP30
14. Температура експлуатації	−40…+70 °C
15. Тип монтажу	щитовий
16. Габарити	96×96×120 мм



Рисунок 3.49 – Зовнішній вигляд БРУ-110 [39]

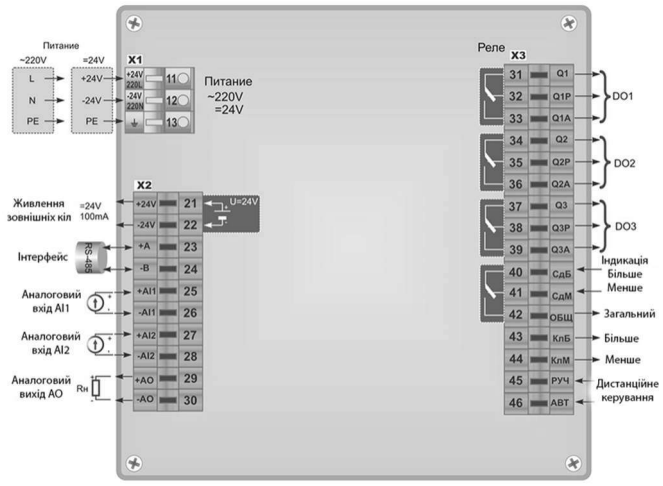


Рисунок 3.50 – Схема зовнішніх з’єднань БРУ-110 [39]

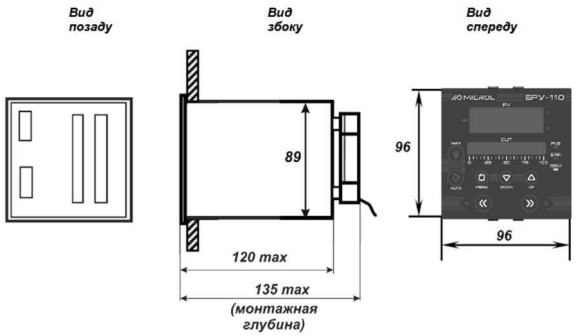


Рисунок 3.51 – Габаритні розміри БРУ-110 [39]

4) Дистанційний покажчик положення валу виконачого механізму ДУП-М

Дистанційний вказівник положення ДУП-М призначений для відображення положення вихідного валу електричного виконавчого механізму з реостатним або індуктивним датчиком.

Технічні характеристики ДУП-М представлені в таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Технічні характеристики ДУП-М [40]

Параметр	Значення
1. Живлення	220 В; 49-59 Гц
2. Допустиме відхилення напруги	від -15 % до +10 %
3. Допустиме відхилення частоти	до 2 %
4. Регулювання положення стрілки	Не менше половини шкали
5. Споживана потужність	Не більше 5 Вт
6. Габаритні розміри	80×120×105 мм
7. Маса	Не більше 0,7 кг
8. Температура навколишнього середовища	5...50 °С
9. Відносна вологість	30...80 %
10. Магнітна індукція	400 А/м
11. Вібрація місць кріплення:	частота (25 Гц), амплітуда (не більше 0,1 мм)



Рисунок 3.51 – Зовнішній вигляд ДУП-М [40]



Рисунок 3.52 – Схема зовнішніх з’єднань ДУП-М

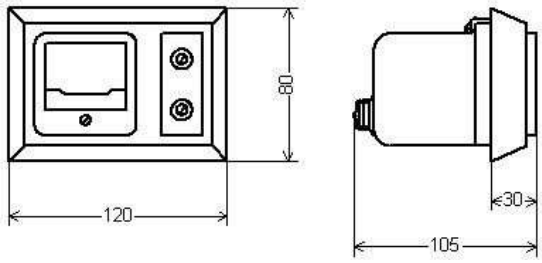


Рисунок 3.53 – Габаритні розміри ДУП-М [40]

5) Частотний перетворювач Sinamics G120

SINAMICS G120 - промисловий перетворювач частоти для керування трифазними асинхронними та синхронними двигунами. Він застосовується для регулювання швидкості, моменту та зниження енергоспоживання технологічного обладнання.

Пристрій має модульну конструкцію: керуючий модуль CU відповідає за обробку сигналів і зв’язок, а силовий модуль PM - за живлення двигуна. Така будова спрощує підбір конфігурації та обслуговування. Перетворювач підтримує скалярне U/f і векторне керування, працює в діапазоні потужностей 0,37-250 кВт, має цифрові та аналогові входи, а також може підключатися до датчиків і енкодерів [41].

Технічні характеристики Sinamics G120 представлені в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Технічні характеристики Sinamics G120 [41]

Параметр	Значення
1. Тип пристрою	Перетворювач частоти (VFD)
2. Діапазон потужності	0,37…250 кВт
3. Напруга живлення	1/3 фази 200-240 В, 3 фази 380-480 В

Продовження таблиці 3.22

Параметр	Значення
4. Частота виходу	до ~650 Гц
5. Типи двигунів	Асинхронні, синхронні
6. Режими керування	U/f, векторне (з/без датчика)
7. Аналогові входи	0-10 В, 4-20 мА
8. Цифрові входи	4-11 DI (залежно від CU)
9. Аналогові виходи	1-2 (0-10 В, 4-20 мА)
10. Цифрові виходи	1-3 DO
11. Інтерфейси зв’язку	Modbus RTU, PROFIBUS, PROFINET, Ethernet/IP
12. Функції безпеки	STO, SS1, SLS, SSM, SDI
13. Клас захисту	IP20 (стандарт), IP55 (опціонально)
14. Температура роботи	приблизно -10…+50 °C
15. Охолодження	Природна конвекція / вентилятор
16. Монтаж	В шафу (панельний)
17. Особливість	Модульна система (CU + PM)
18. Додатково	Рекуперація енергії (PM250)



Рисунок 3.54 – Зовнішній вигляд Sinamics G120 [41]

6) Трифазний двигун AIP112M2

Трифазний асинхронний електродвигун AIP112M2 - загальнопромисловий привод для різних механізмів і технологічних установок.

Можливі виконання: на лапах, лапи з фланцем або фланцеве. Корпус виготовляється з чавуну або силуміну та має захисне покриття. Двигун має ступінь захисту IP55, клас ізоляції F і розрахований на тривалий режим роботи S1 [42].

Технічні характеристики AIP112M2 представлені в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Технічні характеристики AIP112M2 [42]

Параметр	Значення
1. Тип двигуна	AIP112M2
2. Номінальна потужність	7,5 кВт
3. Швидкість обертання (номінальна / фактична)	3000 / 2895 об/хв
4. Напруга живлення (Δ/Y)	220 / 380 В
5. Номінальний струм	14,9 А
6. Коефіцієнт корисної дії	87 %
7. Коефіцієнт потужності	0,88
8. Пусковий момент / номінальний	2,2
9. Максимальний момент / номінальний	2,3
10. Пусковий струм / номінальний	7,5
11. Момент інерції	0,0185 кг·м²
12. Рівень шуму	80 дБ(А)
13. Маса	49 кг



Рисунок 3.55 – Зовнішній вигляд AIP112M2 [42]

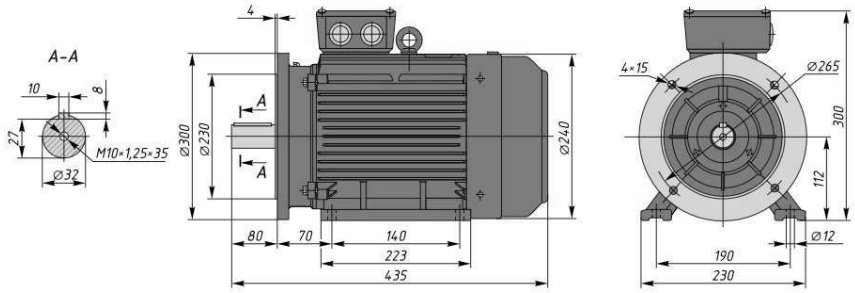


Рисунок 3.56 – Габаритні розміри AIP112M2 [42]

7) Трифазний асинхронний електродвигун AIP80

Трифазний асинхронний електродвигун AIP80 - загальнопромисловий привод для насосів, вентиляторів, компресорів та інших механізмів.

Можливі виконання: на лапах, лапи з фланцем або фланцеве. Корпус виготовляється з чавуну або алюмінієвого сплаву. Двигун має ступінь захисту IP55, клас ізоляції F і розрахований на тривалий режим роботи S1 [43].

Габаритні розміри електродвигуна AIP80 залежать від виконання, але є стандартними: висота осі обертання - 80 мм, довжина - приблизно 290-310 мм, ширина - 160-200 мм, висота - 210-240 мм. Діаметр вала зазвичай становить близько 22 мм. Кріпильні розміри стандартизовані, що забезпечує взаємозамінність з аналогічними двигунами.

Технічні характеристики AIP80 представлені в таблиці 3.24.

Таблиця 3.24 – Технічні характеристики AIP80 [43]

Параметр	Значення
1. Тип двигуна	AIP80
2. Номінальна потужність	0,55-2,2 кВт
3. Швидкість обертання	750-3000 об/хв
4. Напруга живлення (Δ/Y)	220 / 380 В
5. Коефіцієнт корисної дії	75-80 %
6. Коефіцієнт потужності	0,7-0,85
7. Ступінь захисту	IP55
8. Режим роботи	S1
9. Клас ізоляції	F
10. Маса	~12-25 кг



Рисунок 3.57 – Зовнішній вигляд AIP80 [43]

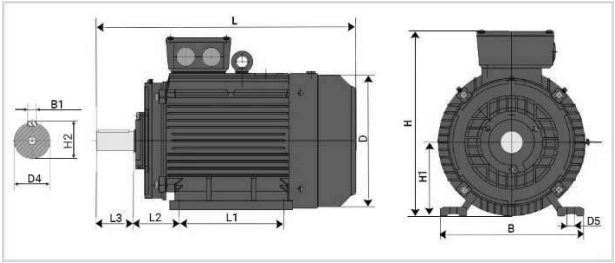


Рисунок 3.58 – Габаритні розміри AIP80 [43]

8) Контактор Schneider Electric LC1D09BD

Контактор Schneider Electric LC1D09BD серії TeSys D призначений для керування електродвигунами та іншими навантаженнями в промислових установках. Пристрій має компактну конструкцію, та відзначається підвищеною стійкістю до вібрацій і перепадів напруги.

Технічні характеристики Schneider Electric LC1D09BD представлені в таблиці 3.25.

Таблиця 3.25 – Технічні характеристики LC1D09BD [44]

Параметр	Значення
1. Тип пристрою	Контактор
2. Модель	LC1D09BD
3. Кількість полюсів	3
4. Номінальний струм	9 А
5. Напруга керування	24 В (DC)
6. Робоча напруга	до 690 В
7. Потужність двигуна (AC-3)	до 4 кВт
8. Основні контакти	3 NO
9. Допоміжні контакти	1 NO + 1 NC
10. Монтаж	DIN-рейка / панель
11. Маса	~0,48 кг



Рисунок 3.59 – Зовнішній вигляд Schneider Electric LC1D09BD [44]

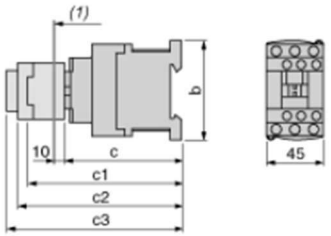


Рисунок 3.60 – Габаритні розміри Schneider Electric LC1D09BD [44]

9) Клапан регульований поворотний 25с9300нж

Клапан призначений для регулювання витрати робочого середовища - води, пари або газу - з температурою до 225 °С.

Регулювання потоку здійснюється шляхом зміни площі прохідного перерізу під час повороту поршня відносно циліндра. Поворот виконується за допомогою важеля, з'єднаного з приводом типу МЕО. Максимальний кут повороту золотника становить 90°.Положення поршня «Відкрито» та «Закрито» позначені на кришці ризиками та літерами «О» і «З». Приєднання до трубопроводу - фланцеве [45].

Технічні характеристики 25с9300нж представлені в таблиці 3.26.

Таблиця 3.26 – Технічні характеристики 25с9300нж [45]

Параметр	Значення
1. Тип	Регулюючий поворотний клапан
2. Модель	25с9300нж
3. Умовний прохід (Ду)	50 мм
4. Умовний тиск (Ру)	40 кгс/см²
5. Робоче середовище	Вода, пара, газ
6. Максимальна температура середовища	до 225 °С
7. Допустимий перепад тиску	10 кгс/см²
8. Максимальний крутний момент	100 Н·м
9. Максимальний кут повороту важеля	90°
10. Площа прохідного перерізу	3,52 см²
11. Тип приєднання	Фланцеве
12. Матеріал корпусу	Сталь 25Л
13. Матеріал поршня	Сталь 12Х18Н10Т
14. Матеріал штока	Сталь 20Х13
15. Матеріал кришки	Сталь 20
16. Довжина L	230 мм
17. Висота Н	265 мм
18. Маса	24 кг



Рисунок 3.61 – Зовнішній вигляд 25с9300нж [45]

3.5 Графічний інтерфейс ARM оператора-технолога

Статичний графічний інтерфейс АРМ оператора-технолога представлений мнемосхемою тунельної печі з ключовими елементами: каналами, топками, конвеєром, газовою лінією та клапанами. Основна задача інтерфейсу полягає у контролі температури спалювальних газів у зонах I та II, яка відображається цифрово над відповідними топками. Передбачений також індикатор положення газових клапанів цих зон у відсотковому виразі. У нижній частині розміщена панель керування з кнопками «СТАРТ», «СТОП», «АВТО», «РУЧНИЙ» та можливістю ручного керування клапаноми. Для інформування про аварійні ситуації використовується сигналізація.

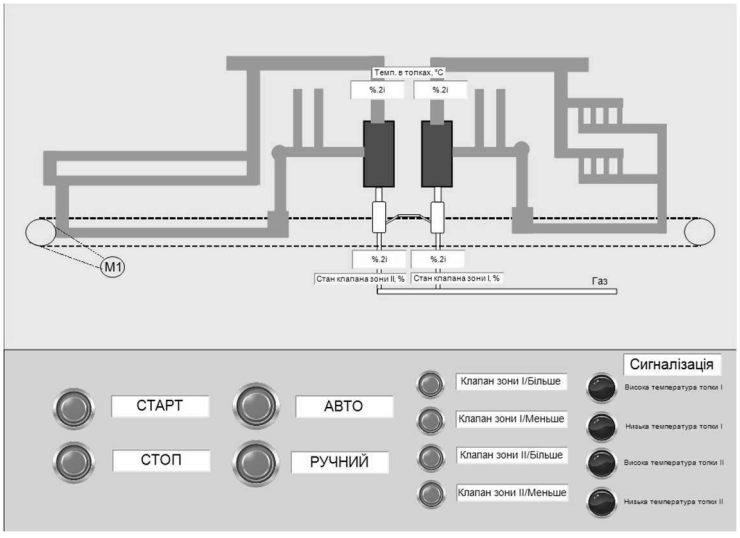


Рисунок 3.62 - Статичний графічний інтерфейс ARM оператора-технолога

Коли система працює, можна побачити зміну температуру в топках, а «АВТО» режимі температура підтримується на заданому рівні самостійно, також видно на скільки відкриті клапани.

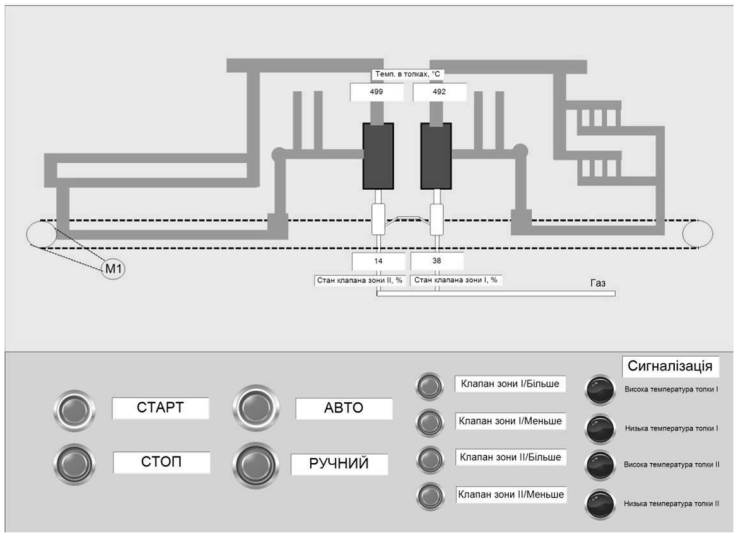


Рисунок 3.63 – Динамічний графічний інтерфейс в «АВТО»-режимі роботи ARM оператора-технолога

В режимі «РУЧНИЙ» оператор сам може змінювати ступінь закриття або відкриття клапанів.

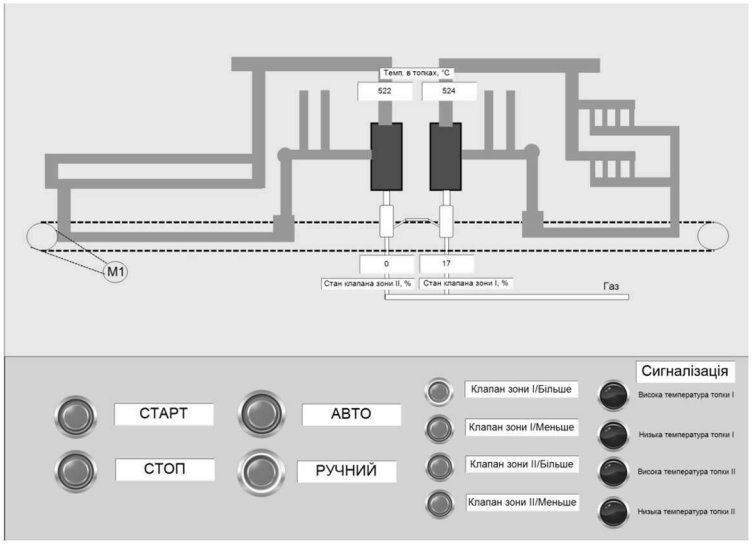


Рисунок 3.64 – Динамічний графічний інтерфейс в «РУЧНИЙ»-режимі роботи ARM оператора-технолога

Також присутня сигналізація яка оповіщує оператора про занадто високу, або занадто низьку температуру в топках, що може погано сказатися на якості продукції. Коли температура досягає більше 550 °С або якщо меньше 460 °С, то сигналізація вмикається.

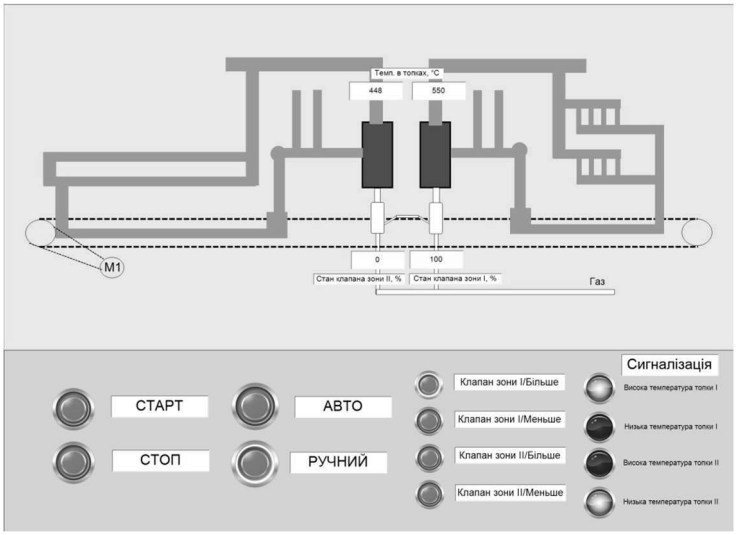


Рисунок 3.65 – Динамічний графічний інтерфейс роботи сигналізації ARM оператора-технолога

Кнопка «СТОП» повністю вимикає систему, віджимає усі кнопки та закриває клапани. Система починає охолоджуватися.

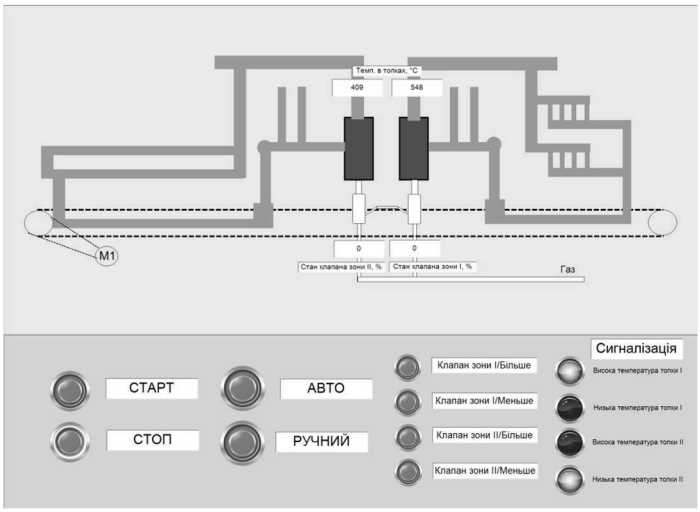


Рисунок 3.66 – Динамічний графічний інтерфейс в «СТОП»-режимі роботи ARM оператора-технолога

4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

4.1 Функціональна схема автоматизації

В кваліфікаційній роботі розроблено функціональну схему автоматизації, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.ФСА

САК температури повітря в печі

Значення температури з термодатчиків ТЕРА Модель 1-3 (поз. 1а, 1б) надходить до нормуючих перетворювачів НПМ-15 (поз. 1в, 1г), через які сигнал у вигляді уніфікованого струмового сигналу 4-20 мА надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-320 (поз. 1е), який виконує функції індикатора, реєстратора та сигналізатора. До НПМ-15 під'єднано блок живлення БП-24-2к (поз. 1д)

САР температури спалювальних газів в топках зон I і II

Значення температури з термодатчиків ТЕРА Модель 1-3 (поз. 2а, 2б) надходить до нормуючих перетворювачів НПМ-15 (поз. 2в, 2г), через які сигнал надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-320 (поз. 2е), який виконує функції індикатора, реєстратора та сигналізатора. До НПМ-15 під'єднано блок живлення БП-24-2к (поз. 2д). Сигнал з ІТМ-320 поступає до контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення BMXAMI0800.

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 2ж, 2н), за допомогою якого задається режим роботи - ручний або автоматичний. Далі сигнал поступає на пускач безконтактний реверсивний ПБР-21 (поз. 2з, 2о) і на виконавчий механізм МЕО 100/25 (поз. 2к, 2п), який керує клапаном 25с9300нж (поз. 2л, 2р). Для дистанційного визначення положення валу використовується ДУП-М (поз. 2м, 2с).

САК температури пари зволожувального пристрою

Значення температури з термодатчика ТЕРА Модель 1-3 (поз. 3а) надходить до нормуючого перетворювача НПМ-15 (поз. 3б), через який сигнал надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-300 (поз. 3г), який виконує функції індикатора та сигналізатора. До НПМ-15 під'єднано блок живлення БП-50-1к (поз. 3в). ІТМ-300 також підключений до реєстратора MAS-100 (поз. 3д) через інтерфейс передачі даних RS-485.

САК тиску природнього газу

Значення абсольтного тиску природнього газу з датчика тиску ПД100 (поз. 4а), який виконує функції вимірювання та перетворення показів тиску в уніфікований сигнал 4-20мА, надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-300 (поз. 4в), який виконує функції індикатора та сигналізатора. ІТМ -300 також підключений до реєстратора MAS-100 (поз. 4г) через інтерфейс передачі даних RS-450. До ПД100 під'єднано блок живлення БП-50-1к (поз. 4б).

САР тиску повітря

Значення абсольтного тиску повітря з датчика тиску ПД100 (поз. 5а,5в), який виконує функції вимірювання та перетворення показів тиску в уніфікований сигнал 4-20мА, надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-300 (поз. 5в), який виконує функції індикатора та сигналізатора. ІТМ -300 також підключений до реєстратора MAS-100 (поз. 5г) через інтерфейс передачі даних RS-450. До ПД100 під'єднано блоки живлення БП-50-1к (поз. 5б, 5г). Сигнал з ІТМ-300 поступає до контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення X80 BMXAMI0800.

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 5д, 5м), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному. Далі сигнал поступає на пускач безконтактний реверсивний ПБР-21 (поз. 5ж, 5н) і на виконавчий механізм МЕО 100/25 (поз. 5з, 5о) який керує клапаном 25с9300нж (поз. 5к, 5п). Для

дистанційного визначення положення валу виконавчого механізму використовується ДУП-М (поз. 5л, 5р).

САР тиску пари

Значення абсольтного тиску пари з датчика тиску ПД100 (поз. 6а), який виконує функції вимірювання та перетворення показів тиску в уніфікований сигнал 4-20мА, надходить до індикатора технологічних параметрів ІТМ-300 (поз. 6в), який виконує функції індикатора та сигналізатора. ІТМ-300 також підключений до реєстратора MAS-100 (поз. 6г) через інтерфейс передачі даних RS-450. До ПД100 під'єднано блок живлення БП-50-1к (поз. 6б). Сигнал з ІТМ-300 поступає до контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення X80 BMXAMI0800.

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 6д), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному. Далі сигнал поступає на пускач безконтактний реверсивний ПБР-21 (поз. 6е) і на виконавчий механізм МЕО 100/25 (поз. 6ж) який керує клапаном 25с9300нж (поз. 6з). Для дистанційного визначення положення валу виконавчого механізму використовується ДУП-М (поз. 6к).

САР тяги в топках зон I і II зон

Значення розрідження в топках зони I та II з датчиків тиску Сафір-М 7220 (поз. 7а, 7б) у вигляді уніфікованого сигналу 4-20мА надходять до індикатора технологічних параметрів ІТМ-320 (поз. 7в), який виконує функції індикатора, реєстратора та сигналізатора. Сигнал з ІТМ-300 поступає до контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення X80 BMXAMI0800.

Контролер видає управляючі сигнал, що подаються на блоки ручного керування БРУ-110 (поз. 7г, 7ж), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному. Далі сигнал поступає на перетворювач частоти Sinamics G120 (поз, 7д, 7з) що керує двигуном вентилятора топок AIP112M2 (поз. 7е, 7к).

САК витрати газу, повітря та пари

Значення витрати газу, повітря та пари виміряє вихревий витратомір LUGB (поз. 8а, 9а, 10а) у вигляді уніфікованого сигналу 4-20мА надходять до індикаторів технологічних параметрів ІТМ-300 (поз. 8б, 9б, 10б), який виконує функції індикатора та сигналізатора. ІТМ-300 також підключений до реєстратора MAS-100 (поз. 8в, 9в, 10в) через інтерфейс передачі даних RS-450.

САР вологості повітря в печі

Значення вологості повітря в печі, виміряє вимірювач вологості ТЕРА Модель 2-02 (поз. 11а, 11б) та перетворюється в уніфікований сигнал 4-20мА в перетворювачі вологості (поз. 11в, 11г). Вимірювач та перетворювач є одним пристроєм. До перетворювачів підключено блок живлення БП-24-2к (поз. 11д). З перетворювача сигнал надходять до індикатора технологічних параметрів ІТМ-320 (поз. 11е), який виконує функції індикатора, реєстратора та сигналізатора. Сигнал з ІТМ-320 поступає до контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення X80 BMXAMI0410.

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 11ж), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному. Далі сигнал поступає на перетворювач частоти Sinamics G120 (поз, 11з) що керує двигуном вентиляційної системи AIP112M2 (поз. 11к)

САР щітки конвеєра печі

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 12а), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному.Далі сигнал поступає на контактор LC1D09BD (поз, 12б) що керує двигуном щітки для очистки конвеєра AIP80 (поз. 12в).

САР роботи та швидкості конвеєра печі

Безконтактний індуктивний датчик ІДП (поз. 13а) разом із тахометром ТХ01 (поз. 13б) вимірює швидкість двигуна. Сигнал від ТХ01 надходить до

контролера Schneider Electric M580 BMEP581020, а саме до модулю розширення X80 BMXAMI0800.

Контролер видає управляючий сигнал, що подається на блок ручного керування БРУ-110 (поз. 13в), за допомогою якого задається в якому режимі працювати - ручному або автоматичному. Далі сигнал поступає на перетворювач частоти Sinamics G120 (поз, 13г) що керує двигуном конвеєра AIP112M2 (поз. 13д). Також за допомогою Sinamics G120 можна запускати та зупиняти конвеєр печі.

4.2 Принципова електрична схема

В кваліфікаційній роботі розроблено принципову електричну схему, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.ПЕС .

Принципова електрична схема є проєктним документом, що визначає повний склад електричної частини елементів системи та зв’язків між її елементами. Також система дає інформацію про те як система працює. Перелік встановленого устаткування зазначений у специфікації. Також вона є підґрунтям для розробки подальших схем проєкту: принципова електрична схема живлення, монтажна комутаційна схема щита КВПіА або приладової шафи, схема щита КВПіА та схеми зовнішніх з’єднань.

Принципова електрична схема виконана стосовно системи автоматичного регулювання температури спалювальних газів в топках I і II зон печі.

Позначення інформаційних дротів - 100-141, а живлення – 800 – 821.

Температура спалювальних газів вимірюється датчиками температури Тера Модель 1-3 ТХА(К) сигнали яких в мВ, потрапляють до нормуючих перетворювачів НПМ-15, які перетворюють сигнали з термопар в сигнал 4-20 мА, які далі прямують до індикатора ІТМ-320 котрий архівує і виводить покази термопар. З індикатора сигнал 4-20 мА прямує до контролера, а саме до модуля вводу аналогових сигналів BMXAMI0800. Контролер видає сигнали

керування до двох блоків ручного управління БРУ-110, за допомогою яких здійснюється вибір автоматичного або ручного режиму регулювання для кожної топки окремо. З кожного БРУ-110 сигнали поступають на відповідні пускачі безконтактні реверсивні ПБР-21 та на виконавчі механізми МЕО 100/25, які керують регулюючими клапанами подачі газу в топки І та ІІ. Кожен виконавчий механізм МЕО 100/25 під'єднаний до датчика положення ДУП-М, що відображає положення валу відповідного виконавчого механізму.

4.3 Принципова електрична схема живлення

В кваліфікаційній роботі розроблено принципову електричну схему живлення, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.ПЕСЖ .

Принципова електрична схема призначена для розподілу електроживлення напругою 220 В між окремими споживачами та забезпечення їх безпечної і надійної роботи. Живлення подається від однофазної мережі та через ввідний запобіжник поз. 31 надходить до розподільчих шин. Далі електроенергія розподіляється по окремих лініях через автоматичні вимикачі (поз. В2-В10), після яких встановлені плавкі запобіжники (поз. З2-З10), що підключені безпосередньо перед споживачами.

Автоматичні вимикачі у схемі необхідні для захисту електричних ліній від перевантаження та короткого замикання, а також для керування живленням окремих ділянок. У разі виникнення аварійного режиму вони автоматично відключають пошкоджену лінію, запобігаючи перегріву проводів і виходу з ладу обладнання, а також дозволяють виконувати обслуговування без відключення всієї системи.

Плавкі запобіжники виконують додаткову захисну функцію та забезпечують локалізацію аварій. Зокрема, запобіжник (поз. З1) захищає ввід кола в цілому, а запобіжники (поз. З2-З10) - окремі лінії споживачів. У випадку несправності вони перегорають і відключають тільки пошкоджену ділянку, не порушуючи роботу інших кіл.

4.4 Монтажна комутаційна схема щита КВПіА

В кваліфікаційній роботі розроблено монтажну комутаційну схему щита КВПіА, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.МКС . Монтажна комутаційна схема щита КВПіА була виконана графічним методом.

У щиті контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА), що забезпечує управління регулюванням температури спалювальних газів в топках I і II зон печі, розміщено такі прилади: контролер Schneider Electric BMEP581020 разом із блоком живлення BMXCPS3500, модулем вводу аналогових сигналів X80 BMXAMI0800 та BMXAMI0410, модулем виводу дискретних сигналів X80 BMXDRC0805 та модулем виводу аналогових сигналів X80 BMXAMO0802 встановлені на шасці на 6 слотів BMXXBP0600. До складу системи також входять індикатор технологічних параметрів ІТМ-320, два блока ручного керування БРУ-110 та два дистанційний покажчик положення вала виконавчого механізму ДУП-М. Усі підключення в щиті виконані відповідно до принципової електричної схеми автоматизації. Відмінністю є наявність клемної колодки, до якої підведені всі дроти живлення та сигнальні лінії, що надходять ззовні та йдуть до приладів за місцем.

4.5 Зовнішній вигляд щита та вид на внутрішні панелі

В кваліфікаційній роботі розроблено схему щита КВПіА, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.СЩ .

На схемі зображено монтажну панель щита КВПіА в масштабі 1:10 з двох ракурсів - спереду та ззаду. Вказано точне розміщення приладів відносно вертикальної шкали, що показує висоту панелі, яка становить 2200 мм, а ширина панелі - 800 мм. На передній частині щита розташовані основні прилади, для кожного з яких зазначено габаритні розміри та відстані між ними.

Висота встановлення обладнання від рівня землі становить: контролер − 600 мм, індикатор ІТМ-320 − 1500 мм, два БРУ-110 − 1100 мм, два ДУП-М − 1700 мм. Між двома БРУ-110 – 360 мм. Так само і для ДУП-М.

Під кожним приладом нанесено напис, який інформує про його функціональне призначення: положення вихідного валу, перемикач ручного або автоматичного режиму, температура спалювальних газів в топках зон І та ІІ, контролер. Ці позначення відповідають текстовим підписам, зазначеним у таблиці експлікації праворуч на схемі. Також на схемі зображено контролер в скомпанованому вигляді з урахуванням монтажних особливостей такі як: встановлення модулів контролера на шасі та їх розміри, його розміщення на DIN-рейку 35х15 мм за позицією Д2.

На задньому вигляді панелі видно монтажні елементи, зокрема DIN-рейку, позначену як Д1. До цієї рекки закріплено клемну колодку, позначену як КК. Клемна колодка призначена для підключення зовнішнього живлення та сигналів, що надходять до щита. Усі прилади встановлюються відповідно до типового компонувального рішення з урахуванням ергономіки та зручності обслуговування.

4.6 Схема зовнішніх з’єднань

В кваліфікаційній роботі розроблено схему зовнішніх з’єднань, яка представлена на кресленні ЗНУ.ІННІ.Д2.14227886.СЗ .

Схема зовнішніх з’єднань представляє собою схему, на якій показані електричні з’єднання між приладами та засобами автоматизації, установленими на технологічному обладнанні.

Схема зовнішніх з’єднань виконана для системи автоматичного регулювання температури спалювальних газів в топках І і ІІ зон печі.

Від термопар до клемних колодок шафи що знаходиться за місцем, виходять компенсаційні дроти ПТП ХА 2х0,75 без захисних елементів довжиною 2м кожен. В шафі знаходяться два НПМ-15 та один блок живлення

БП-24-2к. Також до шафи надходять кабелі ВВГНГД 3х2,5 довжиною 10 м, для живлення БП-24-2к. З клемних колодок шафи виходять кабелі АКВВГ 7х2,5 довжиною 35м в гофро-трубах D25/18.3 мм, які прокладені до щита КВПіА.

З щита КВПіА виходять два кабелі АКВВГ 7х2,5 довжиною 35 м у гофро-трубах D25/18.3 мм, які підключаються клемної колодки шафи за місцем. Також до шафи надходять кабелі ВВГНГД 3х2,5 довжиною 10м, для живлення ПБР-21. В шафі знаходяться два ПБР-21 та клемні колодки. Від клемника шафи виходять чотири кабелі ВВГНГД 3х2,5 довжиною 4 м кожен без захисної оболонки, що підключаються до МЕО-100/25-0,25. Також до кожного МЕО-100/25-0,25 з щита КВПіА підключено кабелі АКВВГ 4х2,5 довжиною 39 м у гофро-трубах D25/18.3 мм, які на іншому кінці підключаються до датчиків положення ДУП-М.

5. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Вимоги до надійності САР

Надійність СА повинна відповідати вимогам та забезпечувати стабільне виконання функцій системи в заданих режимах експлуатації. Основними показниками надійності є середнє напрацювання на відмову, середній час відновлення та коефіцієнт готовності.

Для СА встановлюються такі нормативні вимоги:

— середній час відновлення функцій системи - не більше 4 год;

— середнє напрацювання на відмову - не менше 1000 год;

— коефіцієнт готовності - не нижче 0,998λ;

— середній строк експлуатації системи - не менше 6 років.

Оцінювання надійності СА на етапі проєктування виконується розрахунковим методом із використанням математичних моделей. Перевірка фактичних показників надійності здійснюється під час дослідної та промислової експлуатації на основі аналізу статистичних даних щодо роботи системи.

5.2 Розрахунок надійності для САР температури печі ПХС-25М

Розглянемо надійність САР температури спалювальних газів в топках I і II зон хлібопекарської печі тунельного типу ПХС-25М.

САР температури виконує регулюючу функцію, а отже задамо середній час відновлення працездатності $T_в$ = 4год та - допустимий час функціонування відмовної функції СА $T_{доп}$=1год відмовної функції.

Складова САР та інтенсивність відмов окремих компонентів системи в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Складова САР та інтенсивність відмов окремих компонентів системи

Компонент САР	$\lambda*10^{-6}$
1. ПЛК MODICON M580	1.67
2. МІКРОЛ ІТМ 320	10
3. БРУ-110	10
4. НПМ-15	10
5. ТЕРА Модель 1-3	1
6. ПБР-21	5
7. МЕО-100/25-0,25	10
8. ДУП-М	0,5
9. БП-24-2к	10

Загальна інтенсивність відмов:

$$\lambda = \sum_1^n \lambda_i = 58{,}17 * 10^{-6} \text{ 1/год.} \quad (5.1)$$

де λ_i - інтенсивність відмов і-го елемента САР, 1/год; n - кількість елементів у складі системи.

Середнє напрацювання до відмови:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{58{,}17 * 10^{-6}} = 17190{,}99 \text{ год} \quad (5.2)$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи протягом τ = 1000 годин:

$$P_б(\tau) = e^{-(\Sigma\lambda) * \tau} = e^{-(58{,}17 * 10^{-6}) * 1000} = 0{,}9435 \quad (5.3)$$

Отже, ймовірність безвідмовної роботи САР протягом 1000 годин складає 94,35%.

Ймовірність безвідмовної роботи протягом часу, з урахуванням відновлення відмовної функції за час Тв:

$$P_c(\tau) = P_б + [1-P_б(\tau)]*P_б(\tau) = 0,9435+[1-0,9435]*0,9435 = 0,9968 \quad (5.4)$$

Ймовірність відновлення працездатності визначимо за формулою:

$$\frac{T_{доп}}{T_в} = ¼ = 0,25 \text{ , } 25\% \quad (5.5)$$

Коефіцієнт готовності:

$$К_{гот} = \frac{T_{ср}}{T_{ср} + T_в} = \frac{12244,4}{12244,4+4} = 0,99976 \quad (5.6)$$

Ймовірність безвідмовної роботи при виконанні очікуваного завдання:

$$P_{оч}(\tau) = К_{гот} * P_б(\tau) = 0,99976* 0,9435 = 0,9432 \quad (5.7)$$

Порівняння показників:

$T_{ср}$, год = 17190,99 >1000 год, середній час відновлення функції менше 4 годин, коефіцієнт готовності $K_{гот}$ = 0,99976. Тому резервування елементів САР не потрібне.

Таблиця 5.2 – Дані для побудови графіку залежності ймовірності безвідмовної роботи P(t) від часу при $T_{ср}$ =17190,99 год

t, год	0T_0	0,5T_0	1T_0	1,5T_0	2T_0	2,5T_0	3T_0	3,5T_0	4T_0
$P_c(\tau)$	1	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498	0,0302	0,0183

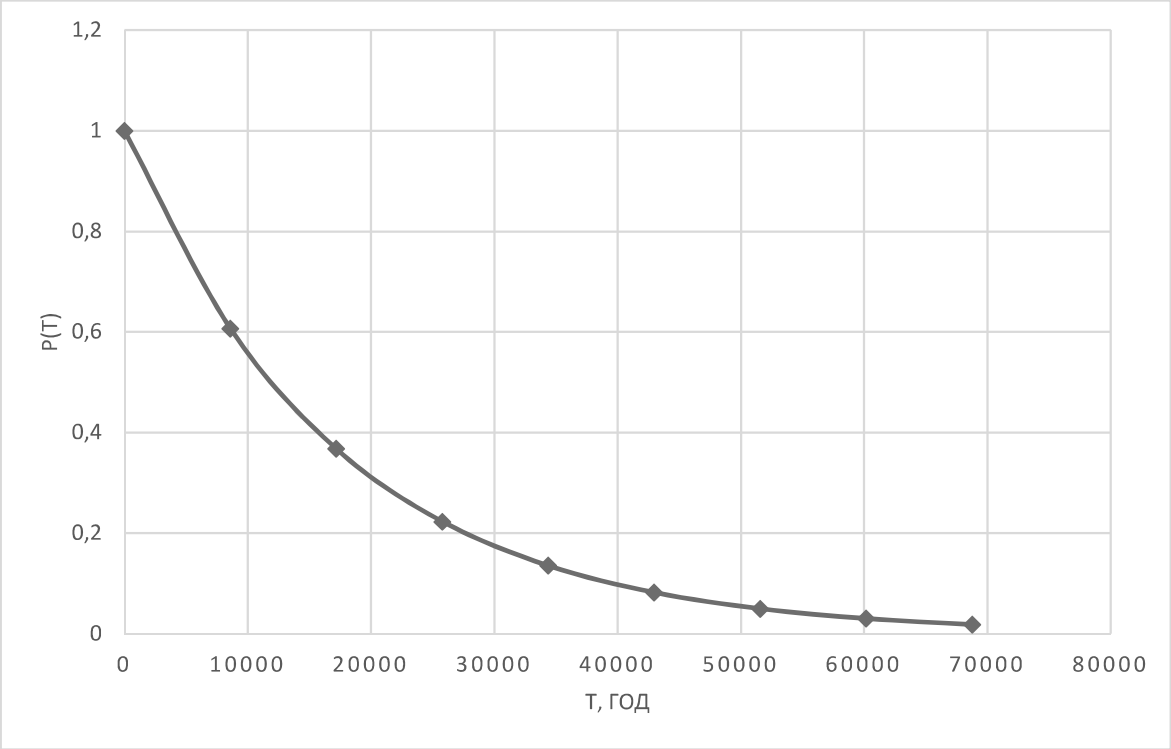


Рисунок 5.1– Графіки залежності ймовірності безвідмовної роботиP(t) від часу при $T_{ср}$ =17190,99 год

6. ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА ВЕСЬ КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Замовна специфікація на весь комплекс технічних засобів системи автоматизації надана у додатку Б.

7. ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

7.1 Організаційне забезпечення системи автоматизації

Організаційне забезпечення (ОЗ) автоматизованих систем управління (АСУ) є комплексним поєднанням методів, інструментів та нормативно-методичної документації, що визначає структуру підрозділів і строго регламентує взаємодію персоналу як між собою, так і з технічним комплексом. Цей вид забезпечення розробляється на початкових етапах проектування баз даних на основі передпроектного обстеження, супроводжуючи інформаційну систему на всіх стадіях її життєвого циклу – від розробки та впровадження до повноцінної експлуатації й технічного супроводження [48, 49].

Для роботи системи автоматизації необхідний персонал, що забезпечує керування технологічним процесом і обслуговування обладнання. Оператор-технолог контролює процес випікання та коригує режими роботи. Оператор АРМ здійснює моніторинг параметрів через SCADA-систему та реєструє аварійні повідомлення. Технічне обслуговування засобів автоматизації виконує інженер КВПіА, електрообладнання – електромеханік, а механічних вузлів – слюсар-ремонтник. ОЗ включає посадові інструкції, регламенти технічного обслуговування та періодичне навчання персоналу.

У межах своїх функцій ОЗ системно поєднує аналіз поточної моделі управління підприємством для виявлення процесів, які підлягають автоматизації, та інженерну підготовку завдань до комп'ютерної реалізації, включаючи формування технічного завдання (ТЗ) і розрахунок техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). Підсумком реалізації ОЗ є оптимізація організаційно-штатної структури та впровадження нових методологій прийняття рішень, що раціоналізує діяльність персоналу АСУ в умовах функціонування та підвищує загальну ефективність менеджменту організації [48, 49].

7.2 Розрахунок техніко-економічних показників

Визначення капітальних вкладень

У зв'язку з розробкою системи автоматизації технологічного процесу передбачається встановлення сучасного програмно-технічного комплексу.

Таблиця 7.1 – Вартість основних технологічних засобів

Найменування приладу	Марка приладу	Кільк.	Ціна од., грн.	Загальна ціна, грн.
1.Термоперетворювач	Тера Модель 1-3	5	500	2500
2.Перетворювач тиску	ПД100-111	4	3540	14160
3.Перетворювач тиску	Сафір МР 7220	2	10000	20000
4.Коріолісний витратомір	LUGB	3	9000	27000
5.Перетворювач вологості	Тера У 2-02	2	3000	6000
6.Тахометр	ТХ01	1	3816	3816
7.Безконтактний ІД	ІДП	1	870	870
8.Норм. перетворювач	NPM-15	5	7514	37570
9.Індикатор	ІТМ-300	6	5802	34812
10.Індикатор	ІТМ-320	5	15108	79740
11.Реєструючий прилад	MAS-100	6	6750	40500
12.Блок ручного керування	БРУ-110	10	15948	159480
13.Пускач	ПБР-21	5	7710	38550
14.Перетворювач частоти	Sinamics G120	4	12000	48000
15.Магнітний пускач	LC1D09BD	1	2087,93	2087,93
16.Виконавчий механізм	МЕО-100/25-0,25	5	11500	57500
17.Електродвигун	AIP112M2	4	8413	33652
18.Електродвигун	AIP80	1	3600	3600
19. Клапан поворотний	25с9300нж	5	8000	40000
20.Датчик положення	ДУП-М	5	1200	6000
21.Блок живлення	БП-50-1К	5	6342	31710
22.Блок живлення	БП-24-2К	3	3852	11556
23.Шасі модулів PLC	BMXXBP0600	1	6676,28	6676,28
24.Блок живлення PLC	BMXCPS3500	1	19044,41	19044,41
25.ПЛК	BMEP581020	1	7014,03	7014,03
26.Модуль AI	BMXAMI0800	1	26322,31	26322,31
27.Модуль AI	BMXAMI0410	1	18883,91	18883,91
27.Модуль AO	BMXAMO0802	1	28131,64	28131,64
28.Модуль DO	BMXDDI0805	1	17211,52	17211,52
29.Комп'ютер	Lenovo	1	40000	40000
Всього	863388,03			

Сума капіталовкладень на устаткування без урахування ПДВ визначається за формулою:

$$К_{об} = В_{уст}+В_{тр}+В_{зс} \quad (7.1)$$

де $В_{уст}$ - вартість придбаного устаткування, грн; $В_{тр}$ - витрати на транспортування, ($В_{тр}$ = 0,06*$В_{уст}$, грн); $В_{зс}$ - заготівельно-складські витрати, ($В_{зс}$ = 0,05*$В_{уст}$, грн).

$$В_{тр} = 0,06 * 863388,03 = 51803,28 \text{ грн.}$$

$$В_{зс} = 0,05 * 863388,03 = 43169,40 \text{ грн.}$$

$$К_{об} = 863388,03 + 51803,28 + 43169,40 = 958360,71 \text{ грн.}$$

Додаткові капіталовкладення $К_{САР}$ на модернізацію САР визначаються за формулою:

$$К_{САР} = К_{дм}+К_{об}+К_{м} \quad (7.2)$$

де $К_{дм}$ - витрати на демонтаж обладнання, ($К_{дм}$ = 0,05 * $К_{ов}$, грн.); $К_{м}$ - витрати на монтаж обладнання ($К_{м}$ = 0,4 * $К_{ов}$, грн.).

$$К_{дм} = 0,05 * К_{об} = 0,05 * 958360,71 = 47918 \text{ грн.}$$

$$К_{м} = 0,4 * К_{об} = 0,4 * 958360,71 = 383344,28 \text{ грн.}$$

$$К_{САР} = 47918 + 958360,71 + 383344,28 = 1389623 \text{ грн.}$$

Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати включають витрати на заробітну плату, амортизаційні відрахування, витрати на ремонт, витрати на електроенергію, витрати на природній газ, інші витрати, пов'язані з обслуговуванням системи автоматизації у процесі її функціонування.

Загальна сума витрат визначається за формулою:

$$В_{САР} = В_{зп}+В_а+В_р+В_{газ} + В_{ел}+В_{ін} \quad (7.3)$$

де $В_{зп}$ - витрати на заробітну плату, грн; $В_а$ - амортизаційні витрати, грн; $В_р$ - витрати на ремонт (5%), грн; $В_{ел}$ - витрати на електроенергію, грн; $В_{ін}$ - інші витрати, грн.

Річні витрати на ЗП

Для обслуговування системи автоматизації приймається чисельність персоналу n = 28 осіб

Річні витрати на заробітну плату визначаються:

$$В_{зп} = n*ФОП \quad (7.4)$$

де n - кількість працівників; ФОП - річний фонд оплати праці одного працівника з обов'язковими нарахуваннями на соціальні збори.

Фонд оплати праці:

$$ФОП = Ф_{зп}*К_{ін} \quad (7.5)$$

де $К_{ін}$ = 1,1; $Ф_{зп}$ - річні витрати на оплату праці одного працівника з урахуванням нарахувань на фонд оплати праці, грн.

Річна зарплата:

$$Ф_{зп} = 12 * ЗП * (1+0,22) \quad (7.6)$$

де ЗП - середня місячна заробітна плата (ЗП = 20000 грн.); $Н_{зп}$ - нарахування на ФОП (22%).

$$Ф_{зп} = 12 * 20000 * (1+0,22) = 292800 \text{ грн.}$$

$$ФОП = 292800 * 1,1 = 322080 \text{ грн.}$$

$$В_{зп} = 28 * 322080 = 9018240 \text{ грн.}$$

Розрахунок річних амортизаційних відрахувань

Амортизаційні відрахування (Ва) на реновацію придбаного устаткування на соціальні збори підприємства:

$$В_а = К_{САР} * (Н_а/100) \quad (7.7)$$

де $Н_а = 20\%$ - норма амортизації на реновацію.

$$В_а = 0,2 * 1389623 = 277924,6 \text{ грн.}$$

Річні витрати на ремонт

Річні витрати на ремонт визначаються:

$$В_р = 0,05 * К_{САР} \quad (7.8)$$

де 0,05 - коефіцієнт витрат на ремонт.

$$В_р = 0,05 * 1389623 = 69481,15 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії на живлення

Річні витрати електроенергії розраховуються як:

$$В_{ел} = Р_{ел} * Т_{ф} * К_{з} * С_{ел} \quad (7.9)$$

де $Р_{ел}$ - встановлена потужність САР (5 кВт); $Т_{ф}$ = 8640 год - фонд часу роботи; $К_{з}$ = 0,8 - коефіцієнт завантаження; $С_{ел}$ - тариф на електроенергію (4,32 грн/кВт·год).

$$В_{ел} = 5 * 8640 * 0,8 * 4,32 = 149299,2 \text{ грн.}$$

Витрати природнього газу

Витрати природного газу визначаються за формулою:

$$В_{газ} = G * t * С_{газ} \quad (7.10)$$

де G - середня витрата природного газу печі, м³/год (28); t - річний фонд часу роботи обладнання, год (8640); $С_{газ}$ - тариф на природний газ, грн/м³ (29,85).

$$В_{газ} = 28 * 8640 * 29,85 = 7221312 \text{ грн.}$$

Інші витрати

Інші витрати визначаються:

$$В_{ін} = 0,25*(В_{а}+В_{зп}+В_{р}) \quad (7.11)$$

де 0,25 - коефіцієнт інших витрат.

$$В_{ін} = 0,25 * (277924,6 + 9018240 + 69481,15) = 2341411,44 \text{ грн.}$$

$$В_{САР} = 9018240 + 277924,6 + 69481,15 + 7221312 + 149299,2 + 2341411,44 = 19077668,4 \text{ грн.}$$

Валова річна економія витрат

Для визначення економічної ефективності впровадження автоматизованої системи необхідно оцінити зміну основних техніко-економічних показників роботи об’єкта до та після автоматизації.

Згідно з технічними характеристиками печі ПХС-25М її продуктивність знаходиться в межах 14-17 т/добу. Враховуючи наявність простоїв до автоматизації, приймається, що фактична продуктивність складала 14,2 т/добу. Після впровадження системи, що забезпечує стабільність теплового режиму, зниження браку та оптимізацію процесу випікання, продуктивність зростає до 14,5 т/добу.

Річний обсяг виробництва до автоматизації визначається як:

$$B_1 = Q_1 * D = 14{,}2 * 365 = 5183 \text{ т/рік} \quad (7.12)$$

де Q_1 - продуктивність печі до автоматизації, т/добу; D - кількість діб роботи на рік.

Річний обсяг виробництва після автоматизації:

$$B_2 = Q_2 * D = 14{,}5 * 365 = 5292{,}5 \text{ т/рік} \quad (7.13)$$

де Q_2 - продуктивність печі після автоматизації, т/добу.

Таким чином, приріст обсягу виробництва становить:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = 109 \text{ т/рік} \quad (7.14)$$

До впровадження системи автоматизації обслуговування печі здійснювалося персоналом чисельністю 30 осіб.

Загальні витрати на оплату праці:

$$В_{зп}^{до} = n * ФОП = 30 * 322080 = 9662400 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання до автоматизації приймаються на рівні 8% від вартості системи:

$$В_{р}^{до} = 0,08 * К_{САР} = 0,08 * 1389623 = 111169,84 \text{ грн.} \quad (7.15)$$

Витрати електроенергії до автоматизації є більшими через відсутність оптимізації режимів роботи. При встановленій потужності 5,5 кВт вони становлять:

$$В_{до}^{ел} = Р_{ел} * Т_{ф} * К_{з} * С_{ел} = 5,5 \cdot 8640 \cdot 0,8 \cdot 4,32 = 164229,12 \text{ грн.} \quad (7.17)$$

де $Р_{ел}$ - встановлена потужність до впровадження САР (5,5 кВт).

Витрати природного газу до автоматизації:

$$В_{газ} = G_{до} * t * С_{газ} = В_{газ} = 30 * 8640 * 29,85 = 7737120 \text{ грн.} \quad (7.18)$$

де $G_{до}$ - середня витрата природного газу печі, м³/год (30);

Інші витрати визначаються у розмірі 25% від суми витрат на заробітну плату та ремонт:

$$В_{ін}^{до} = 0,25 * (9662400 + 111169,84) = 2443392,5 \text{ грн.} \quad (7.19)$$

Загальні річні витрати до автоматизації:

$$В_{САР}^{до} = 9662400 + 111169,84 + 164229,12 + 7737120 + 2443392,5 = 20118311,5 \text{ грн.}$$

Для оцінки ефективності необхідно визначити питомі витрати на виробництво 1 тонни продукції.

До автоматизації:

$$C_1 = \frac{В_{САР}^{до}}{B_1} = \frac{220118311,5}{5183} = 3881,6 \text{ грн/т} \quad (7.20)$$

Після автоматизації:

$$C_2 = \frac{В_{САР}}{B_2} = \frac{19077668,4}{5292,5} = 3604,7 \text{ грн/т} \quad (7.21)$$

Отже, зниження питомих витрат становить:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 3881,6 - 3600,8 = 276,9 \text{ грн/т} \quad (7.22)$$

Валова економія визначається як добуток зниження питомих витрат на річний обсяг виробництва після автоматизації:

$$Е_{вал} = (С_1 - С_2) \cdot В_2 = 276,9 * 5292,5 = 1465493,25 \text{ грн.} \quad (7.23)$$

Фактична економія визначається з урахуванням того, що система автоматизації вводиться в експлуатацію не з початку року. Приймається, що в розрахунковому році вона працює 6 місяців.

$$E_ф = \frac{E_{вал} * 6}{12} = \frac{1465493,25 * 6}{12} = 732746,6 \text{ грн.} \quad (7.24)$$

Річний економічний ефект

Річний економічний ефект визначається з урахуванням нормативного коефіцієнта економічної ефективності:

$$E_{\text{річн}} = E_{\text{вал}} - E_{\text{н}} \cdot K_{CAP} \quad (7.25)$$

де $E_{\text{н}} = 0{,}15$.

$$E_{\text{річн}} = 1465493{,}25 - 0{,}15 * 1389623 = \ 1257050 \text{ грн.}$$

Термін окупності визначається як:

$$\text{Т}_{\text{ок}} = \frac{\text{К}_{\text{CAP}}}{\text{Е}_{\text{річн}}} = \frac{1389623}{1257050} = \ 1{,}105 \text{ років} \quad (7.26)$$

Отримані результати свідчать про високу економічну ефективність впровадження автоматизованої системи та наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Порівняння техніко-економічних показників до та після автоматизації

Найменування показника	Позначення	Од. вим.	До автоматизації	Після автоматизації	Відхилення
1. Вартість обладнання	$К_{об}$	грн	-	958360,71	-
2. Капітальні вкладення в АСУ	$К_{CAP}$	грн	-	1389623	-
3. Продуктивність печі	Q	т/добу	14,2	14,5	+0.3
4. Річний обсяг виробництва	В	т/рік	5183	5292,5	+109
5. Кількість обслуговуючого персоналу	n	осіб	30	28	−2
6. Витрати на оплату праці	$В_{зп}$	грн	9662400	9018240	−644160
7. Витрати на ремонт	$В_{р}$	грн	111169,84	69481,15	-41688,69
8. Витрати на електроенергію	$В_{ел}$	грн	164229,12	149299,2	−14929,92
9. Витрати природного газу	$В_{газ}$	грн	7737120	7221312	−515808
10. Інші витрати	$В_{ін}$	грн	2443392,5	2341411,44	−101981,06
11. Загальні річні витрати	$В_{CAP}$	грн	20118311,5	19077668,4	−1040643,1
12. Питомі витрати	С	грн/т	3881,6	3604,7	−276,9
13. Валова річна економія	$Е_{вал}$	грн	-	1465493,25	-
14. Фактична економія за перший рік	$Е_{ф}$	грн	-	732746,6	-
15. Річний економічний ефект	$Е_{річн}$	грн	-	1257050	-
16. Термін окупності	$Т_{ок}$	рік	-	1,105	-

8. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

8.1. Аналіз стану виробничої санітарії та гігієни праці

Ефективна та безпечна експлуатація тунельної хлібопекарської печі ПХС-25М регламентується Законом України «Про охорону праці» та комплексом профільних нормативних стандартів, які визначають параметри виробничого середовища. Зокрема, показники мікроклімату контролюються згідно з ДСН 3.3.6.042-99, допустимі рівні шуму (до 80 дБ) - ДСН 3.3.6.037-99, проектування систем вентиляції - ДБН В.2.5-67:2013, а штучне й природне освітлення робочих зон - ДБН В.2.5-28:2018.

Для нейтралізації критичних термічних факторів у зоні печі, де температура може перевищувати 30–35 °С, а відносна вологість сягати 65–85 %, впроваджується ефективна припливно-витяжна вентиляція, локальне відведення пари та суцільна теплоізоляція гарячих поверхонь. Зниження концентрації борошняного пилу, який є алергеном та утворює вибухонебезпечні суміші в діапазоні 10–35 г/м³, досягається герметизацією устаткування, підключенням аспіраційних систем та регулярним вологим прибиранням. Комплексна оптимізація умов праці додатково передбачає конструкційне шумопоглинання агрегатів, ергономічну організацію робочих місць із облаштуванням захисних огороджень і проходів, а також забезпечення персоналу профільним спецодягом і засобами індивідуального захисту [50].

8.2. Організаційно-технічні заходи з охорони праці

Організація охорони праці на підприємстві здійснюється згідно з чинним законодавством України та нормативно-технічною документацією, включно із Законом України «Про охорону праці», Правилами охорони праці при експлуатації електроустановок, вимогами ДСТУ 2583-94 та галузевими

нормативами, які регламентують безпечне виконання технологічних процесів у хлібопекарській промисловості.

Працівники, які обслуговують печі та автоматизовані системи, зобов'язані проходити повний цикл навчання і перевірки знань з охорони праці, передбачений законом та Типовим положенням про порядок навчання і перевірки знань, включно з усіма видами інструктажів. Для роботи з обладнанням допускаються лише кваліфіковані працівники з групою з електробезпеки не нижче III згідно з вимогами Правил охорони праці. На підприємстві слід розробляти й затверджувати інструкції з охорони праці відповідно до НПАОП 0.00-4.15-98, з врахуванням дій при аварійних ситуаціях. Сторонні особи не допускаються до зони роботи печей, а робочі місця мають утримуватися в належному стані з дотриманням правил виробничої санітарії та безпеки.

На корпусах печей і шафах керування розміщуються попереджувальні знаки відповідно до ДСТУ ISO 7010. Передбачено аварійне вимкнення обладнання за допомогою зручних кнопок «Стоп». Конструкція печі має забезпечувати теплоізоляцію та захист від контактів із гарячими поверхнями згідно з вимогами охорони праці. Працівники забезпечуються індивідуальними засобами захисту: термостійкими рукавицями, спеціальним одягом, захисним взуттям, респіраторами та засобами захисту органів слуху. Регулярно проводиться технічне обслуговування і перевірка систем автоматизації та електрообладнання з веденням відповідної документації [50].

8.3 Електробезпека

Електробезпека на підприємстві є важливою складовою системи охорони праці та спрямована на запобігання ураженню працівників електричним струмом під час експлуатації електрообладнання. Організація безпечної роботи електроустановок здійснюється відповідно до вимог чинного

законодавства України, Правил охорони праці при експлуатації електроустановок та Правил улаштування електроустановок.

Основними причинами електротравматизму є випадковий дотик до струмоведучих частин, пошкодження ізоляції проводів, несправність електрообладнання, а також порушення правил техніки безпеки під час виконання робіт. Небезпеку становлять також металеві частини обладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок аварійної ситуації або короткого замикання [52].

Для забезпечення електробезпеки всі електротехнічні пристрої повинні мати заземлення, передбачаючи захист від коротких замикань, перевантажень і перенапруг; силові кабелі прокладаються в захисних каналах або коробах. та відповідати встановленим технічним вимогам. Струмоведучі частини обладнання мають бути ізольовані або закриті спеціальними огородженнями, що унеможливлюють випадковий контакт працівників із небезпечними елементами. На електрообладнанні та шафах керування розміщуються попереджувальні знаки безпеки [52].

До роботи з електроустановками допускаються лише працівники, які пройшли спеціальне навчання, інструктаж і перевірку знань з електробезпеки. Під час виконання ремонтних або профілактичних робіт обов’язковим є відключення напруги та використання засобів індивідуального захисту: діелектричних рукавиць та гумових килимків, інструменту з ізольованими ручками [52].

8.4. Пожежна безпека

Хлібопекарські підприємства класифікуються як об’єкти пожежної небезпеки категорії В згідно з ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва» [50].

Основні заходи пожежної безпеки полягають у дотриманні вимог ПУЕ щодо електричних з’єднань, шаф керування та автоматизації, зокрема забезпеченні надійності контактів, цілісності ізоляції та захисту від коротких замикань, перевантажень і перегріву.

Живлення печі та електрообладнання має виконуватися через автоматичні вимикачі й пристрої захисного відключення, які гарантують автоматичне знеструмлення при аварійних ситуаціях, відповідно до нормативів з електробезпеки.

Піч повинна перебувати під постійним моніторингом із гарантією автоматичного аварійного відключення при перевищенні нормативних значень, що відповідає вимогам пожежної безпеки технологічних процесів.

Виробничі приміщення мають бути оснащені первинними засобами пожежогасіння, зокрема порошковими вогнегасниками типу ВП-5, ВП-9, згідно з Правилами пожежної безпеки в Україні. Передбачено встановлення автоматичної пожежної сигналізації з димовими або тепловими сповіщувачами та системою оповіщення відповідно до ДБН В.2.5-56:2014.



Рисунок 8.1 – Вогнегасник порошковий ВП-5

8.5 Охорона навколишнього середовища

Процес виробництва хлібобулочних виробів пов'язаний з певними екологічними наслідками, що охоплюють утворення борошняного пилу, теплові викиди, продукти згоряння палива, а також генерацію стічних вод та виробничих відходів.

Основними джерелами емісій визначено пил, що виникає під час транспортування, просіювання та подачі борошна, а також викиди вологого повітря з вентиляційних систем. До цієї категорії також належать продукти згоряння палива, зокрема оксиди азоту й вуглецю. Окрім того, значну частку становлять відходи сировини, використані пакувальні матеріали та побутові відходи. З метою мінімізації негативного впливу на довкілля застосовується комплекс заходів. Це включає встановлення аспіраційних систем, циклонів, фільтрів та пиловловлювачів для очищення повітря, а також забезпечення ефективної припливно-витяжної вентиляції [50].

Крім того, здійснюється контроль теплових викидів, оптимізація режимів функціонування обладнання, впровадження енергозберігаючих технологій та використання автоматизованих систем керування виробничими процесами. Утворення стічних вод після санітарної обробки обладнання та приміщень передбачає їх обов'язкове механічне очищення перед відведенням у каналізаційну систему. Виробничі відходи, своєю чергою, вимагають систематичного збору, належного зберігання та подальшої утилізації згідно з встановленими санітарними нормами й екологічним законодавством [50].

Відповідно до положень Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», підприємство зобов'язане забезпечувати суворе дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) та гранично допустимих викидів (ГДВ) шкідливих речовин в атмосферне повітря.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі розроблено проєкт автоматизації тунельної хлібопекарської печі ПХС-25М із реалізацією системи автоматичного регулювання температурного режиму.

1. У першому розділі було досліджено особливості функціонування тунельної хлібопекарської печі ПХС-25М, розглянуто етапи технологічного процесу випікання та проведено аналіз існуючого рівня автоматизації. Визначено основні недоліки діючої системи керування, а також сформовано схеми матеріальних та інформаційних потоків. Проведений аналіз підтвердив необхідність удосконалення системи регулювання температурного режиму для підвищення якості продукції та зниження енерговитрат.

2. У другому розділі розроблено технічне завдання на створення системи автоматизації. Сформовано вимоги до функціонування системи, визначено її основні задачі, параметри контролю та регулювання, а також вимоги до інформаційного, програмного та технічного забезпечення. Для системи визначено метрологічні характеристики основних параметрів, точність вимірювання та вимоги до архівування, сигналізації й диспетчерського контролю.

3. У третьому розділі виконано проектування системи автоматизації печі ПХС-25М. Обґрунтовано вибір дворівневої модульно-ієрархічної структури системи автоматизації з розподілом на нижній та верхній рівні. Як основний програмований логічний контролер обрано Schneider Electric Modicon M580 BMEP581020, який підтримує сучасні промислові протоколи Ethernet та Modbus і забезпечує можливість подальшого розширення системи. Для реалізації вводу-виводу застосовано модулі аналогового та дискретного вводу-виводу серії X80.

Для вимірювання технологічних параметрів обрано термоелектричні перетворювачі температури, датчики тиску, витратоміри, перетворювачі вологості та датчики розрідження. У системі використані вторинні прилади,

нормуючі перетворювачі та пускачі компанії МІКРОЛ серій НПМ, ІТМ та ПБР. Як виконавчі механізми застосовано електричні однооборотні механізми МЕО-100/25-0,25 для керування регулюючими клапанами та частотні перетворювачі для керування димососами, вентиляторами та приводом конвеєра печі.

У системі реалізовано ПІ-закони регулювання температури, тиску, вологості та тяги. Розроблено алгоритм роботи системи автоматичного регулювання температури спалювальних газів у топках І та ІІ зон. Також розроблено графічний інтерфейс АРМ оператора із відображенням мнемосхем, аварійної сигналізації.

4. У четвертому розділі розроблено комплект технічної документації системи автоматизації. Створено функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми керування та живлення, монтажну комутаційну схему щита КВПіА, схеми зовнішніх з'єднань та загальний вигляд щита КВПіА. Розроблена документація забезпечує можливість практичної реалізації та подальшої експлуатації системи.

5. У п'ятому розділі виконано розрахунок надійності системи автоматизації температурного режиму печі ПХС-25М. Проведено оцінку надійності основних елементів системи, зокрема PLC-контролера Schneider Electric Modicon M580, датчиків Модель 1-3, вторинних приладів МІКРОЛ ІТМ-320, БРУ-110, НПМ-15, пускача ПБР-21, виконавчих механізмів МЕО-100/25-0,25, датчиків ДУП-М та блоку живлення БП-24-2К.

У результаті розрахунків отримано загальну інтенсивність відмов системи $\lambda = 58{,}17 \cdot 10^{-6}$ 1/год, середній час напрацювання до відмови Тср = 17190,99 год, а ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 1000 годин становить Рб(τ) = 0,9435, тобто 94,35 %. Коефіцієнт готовності системи склав Кгот = 0,99976, а ймовірність безвідмовної роботи з урахуванням відновлення - 0,9968. Отримані результати підтверджують, що система відповідає нормативним вимогам, а резервування елементів САР не є необхідним.

6. У шостому розділі сформовано замовну специфікацію на весь комплекс технічних засобів системи автоматизації. Визначено перелік обладнання необхідний для впровадження системи автоматизації.

7. У сьомому розділі розглянуто організаційне забезпечення системи автоматизації та виконано розрахунок техніко-економічних показників. Вартість обладнання системи автоматизації склала 958360,71 грн, а загальні капітальні вкладення у впровадження СА - 1389623 грн. У результаті впровадження системи автоматизації продуктивність печі зросла з 14,2 до 14,5 т/добу, а річний обсяг виробництва - з 5183 до 5292,5 т/рік. Кількість обслуговуючого персоналу скоротилась з 30 до 28 осіб, що дозволило зменшити витрати на оплату праці на 644160 грн на рік. Також зменшилися витрати на природний газ на 515808 грн, електроенергію - на 14929,92 грн, ремонт обладнання - на 41688,69 грн, а загальні річні витрати підприємства знизилися на 1040643,1 грн. Питомі витрати на виробництво 1 т продукції зменшилися з 3881,6 до 3604,7 грн/т. Валова річна економія склала 1465493,25 грн, річний економічний ефект - 1257050 грн, а термін окупності системи автоматизації становить 1,105 року, що підтверджує високу економічну ефективність впровадження розробленої системи.

8. У восьмому розділі розглянуто питання техніки безпеки, виробничої санітарії, електробезпеки, пожежної безпеки та охорони навколишнього середовища. Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації хлібопекарської печі та запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів для забезпечення безпечних умов праці персоналу.

Отже, у результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено ефективну систему автоматичного регулювання температурного режиму тунельної хлібопекарської печі ПХС-25М, яка забезпечує стабільність технологічного процесу, підвищення якості хлібобулочних виробів та покращення енергоефективності виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Тунельні печі в хлібопекарській промисловості. Частина 1: види та джерела тепла. URL: https://ten24.com.ua/ua/blog/tunnelnye-pechi-v-khlebopekarskoy-promyshlennosti-chast-1/ (дата звернення: 05.02.2026)

2. Тунельні хлібопекарські печі : навч. посіб. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. URL: https://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/tunelni-hlibopekarski-pechi.pdf (дата звернення: 10.02.2026).

3. Тунельні каркасно-металічні печі з циклотермічним обігріванням. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/5193779/page:10/ (дата звернення: 10.02.2026).

4. Принципова технологічна схема одержання хлібобулочних виробів. Збереження хліба. Основні якісні характеристики. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/12487750/page:10/ (дата звернення: 18.02.2026).

5. Хлібобулочний цех. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/5740103/page:4/ (дата звернення: 18.02.2026).

6. Київхліб - лідер хлібобулочної галузі України. Alvivagroup. URL: https://alvivagroup.com/ua/kiyivhlib-lider-hlibobulochnoyi-galuzi-ukrayini/ (дата звернення: 25.02.2026).

7. Запорізький хлібозавод №5 URL: https://hlibodar.com.ua/?factory=zp-hlebozavod-5 (дата звернення: 25.02.2026).

8. Tunnel Oven. Hasborg. URL: https://www.hasborg.eu/produkt/piec-tunelowy.html (дата звернення: 25.02.2026).

9. Bakery tunnel ovens. J4 s.r.o. URL: https://www.j4.cz/en/products/bakery-tunnel-ovens (дата звернення: 25.02.2026).

10. Проектування систем автоматизації : навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко - Д.: Національний гірничий університет, 2013. - 268 с. URL: https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0053800.pdf (дата звернення: 28.02.2026).

11. Оцінка якості управління. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/5685680/page:18/ (дата звернення: 15.03.2026).

12. Датчики температури (термоперетворювачі). Тера. URL: https://ao-tera.com/ua/1-3 (дата звернення: 16.03.2026).

13. Датчики тиску загальнопромислові ПД100. Aqteck. URL: https://aqteck.ua/ua/datchyky/pd100-di-111-171-181-datchyky-tysku-zagalnopromyslovi (дата звернення: 16.03.2026).

14. Тягонапороміри, напороміри, тягоміри. Манометр-Харків. URL: https://manometr-kharkiv.com/wp-content/uploads/2021/10/501_%D0%9D%D0%95_21.1.pdf (дата звернення: 16.03.2026).

15. Перетворювач вологості та температури. Тера. URL: https://ao-tera.com/ua/yth4-20 (дата звернення: 16.03.2026).

16. Тахометр багатофункціональний ТХ01. Aqteck. URL: https://aqteck.ua/ua/prystroji-kontrolju-ta-keruvannja/th01-bagatofunkcionalnii-tahometr (дата звернення: 16.03.2026).

17. Безконтактні індуктивні датчики ІДП. Aqteck. URL: https://aqteck.ua/ua/datchyky/idp-bezkontaktni-induktyvni-datchyky (дата звернення: 16.03.2026).

18. Digital Vortex Flow Meter DN100. URL: https://ytauto.en.made-in-china.com/product/KdWxrFvYnEhD/China-Digital-Vortex-Flow-Meter-DN100-DN80-DN50-Air-Gas-Steam-Flow-Meter-Lugb.html (дата звернення: 16.03.2026).

19. Індикатор-вимірювач технологічних параметрів ІТМ-300. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/indikator-vimiruvac-tehnologicnih-parametriv-itm-300 (дата звернення: 16.03.2026).

20. Індикатор-вимірювач технологічних параметрів двоканальний з архівуванням ІТМ-320. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/indikator-vimiruvac-tehnologicnih-parametriv-dvokanalnij-z-arhivuvannam (дата звернення: 16.03.2026).

21. Модуль збору та архівування даних. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/modul-zboru-ta-arhivuvanna-danih (дата звернення: 16.03.2026).

22. Блок живлення імпульсний одноканальний БП-50-1К. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/blok-zivlenna-impulsnij-odnokanalnij-bp-50-1k (дата звернення: 16.03.2026).

23. БП-24-2К - Блок живлення трансформаторний, двоканальний. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/blok-zivlenna-impulsnij-transformatornij (дата звернення: 16.03.2026).

24. Універсальний нормуючий перетворювач НПМ-15. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/universalnij-normuucij-peretvoruvac-odkokanalnij-npm-15 (дата звернення: 16.03.2026).

25. Програмний логічний контролер M580 L10 DIO. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMEP581020/ (дата звернення: 18.03.2026).

26. Програмований логічний контролер Modicon M580. Electrocentr. URL: https://www.electrocentr.com.ua/products/plc/m580.html (дата звернення: 18.03.2026).

27. Модулі Modicon X80. Electrocentr. URL: https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/plc/m580/Modicon_X80_catalog_2023_ua.pdf (дата звернення: 18.03.2026).

28. Імпульсні джерела живлення Modicon Power Supply. Electrocentr. URL: https://www.electrocentr.com.ua/ua/products/power-supply/modicon_power_supply.html (дата звернення: 18.03.2026).

29. Schneider Electric Unity Pro XL V12 Installation File with Licence. URL : https://seamless-automation.com/shop/softwares/schneider-electric-unity-pro-xl-v12/ (дата звернення: 18.03.2026).

30. Блок живлення BMXCPS3500. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMXCPS3500/ (дата звернення: 18.03.2026).

31. Модуль аналогових входів BMXAMI0800. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMXAMI0800/ (дата звернення: 18.03.2026).

32. Модуль аналогових виходів BMXAMO0802. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMXAMO0802/ (дата звернення: 18.03.2026).

33. Модуль релейних виходів BMXDRC0805. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMXDRC0805/ (дата звернення: 18.03.2026).

34. EcoStruxure Control Expert (Unity Pro). Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product-range/548-ecostruxure-control-expert-unity-pro/ (дата звернення: 18.03.2026).

35. 6-слотове шасі Modicon M580 BMXXBP0600. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/BMXXBP0600/ (дата звернення: 18.03.2026).

36. Ніколаєнко А. М. Програмування ПЛК у Softlogic-системі. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 203 с.

37. Пускач безконтактний реверсивний, однофазний ПБР-21. Microl. URL: https://microl.ua/ua/product/puskac-bezkontaktnij-reversivnij-odnofaznij?srsltid=AfmBOoqVyRfmpgo0oPwMFCEIAJupVjNrg6EQ9ZRPz8eavPU-rweNzL0R (дата звернення: 19.03.2026).

38. Виконавчий механізм МЕО-100. Стандарт-М. URL: http://standart-m.com.ua/kipia/ispolnitelnye-mehanizmy-meo/ispolnitelnyj-mehanizm-meo-100?mova=uk (дата звернення: 19.03.2026).

39. Блок ручного керування універсальний БРУ-110. Мікрол. URL: https://microl.ua/ua/product/blok-rucnogo-keruvanna-universalnij (дата звернення: 19.03.2026).

40. Дистанційний покажчик положення ДУП-М. Укрспецавтомат. URL: https://ukrspecavtomat.com.ua/uk/products/distancionnyj-ukazatel-polozheniya-dup-m/ (дата звернення: 19.03.2026).

41. Siemens SINAMICS G120 Manual. URL: https://www.manualslib.com/manual/745918/Siemens-Sinamics-G120.html#manual (дата звернення: 19.03.2026).

42. Електродвигун АИР 112М2. АИР. URL: https://аир.com.ua/uk/katalog_elektrodvyguniv_air/air-112m2-7-5-kvt-3000-ob-hv/ (дата звернення: 19.03.2026).

43. Електродвигун АИР 80. АИР. URL: https://аир.com.ua/katalog_elektrodvigatelei_air/air-80/ (дата звернення: 19.03.2026).

44. Контактор TeSys Deca LC1D09BD. Schneider Electric. URL: https://www.se.com/ua/uk/product/LC1D09BD/ (дата звернення: 19.03.2026).

45. Клапан регульований поворотний 25с9300нж Ду50 Ру40. Prom. URL: https://prom.ua/ua/p577771353-klapan-reguliruyuschij-povorotnyj.html (дата звернення: 28.05.2026)

46. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : підручник. Кривий Ріг, 2023. 557 с.

47. Полянський Г. О. Методичні вказівки до розрахунку надійності систем автоматизованого керування. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 24 с.

48. Організаційне забезпечення. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/10816050/page:3/ (дата звернення: 07.05.2026).

49. Організаційне забезпечення автоматизованих систем. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/8604227/page:3/#14 (дата звернення: 07.05.2026)

50. Забезпечення охорони праці. Studfile. URL: https://studfile.net/preview/5585169/page:12/ (дата звернення: 20.05.2026).

51. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. [Чинний від 24.11.1992]. Київ, 1992.

52. Електробезпека. ot-kiev.ua. URL: https://www.ot.kiev.ua/new_page_30.htm (дата звернення: 21.05.2026).

53. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98 : наказ Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.1998 № 4. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text (дата звернення: 25.05.2026).

54. Правила улаштування електроустановок : ПУЕ : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0476732-17#Text (дата звернення: 25.05.2026).

55. Про пожежну безпеку : Закон України від 17.12.1993 № 3745-XII. [Чинний від 01.01.1994]. Київ, 1994.

56. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. [Чинний від 26.06.1991]. Київ, 1991.

57. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 01.12.1999]. Київ : МОЗ України, 1999. 42 с.

58. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинний від 01.12.1999]. Київ : МОЗ України, 1999. 34 с.

59. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 01.01.2014]. Київ : Мінрегіон України, 2013. 149 с.

60. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний від 01.10.2018]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 137 с.

61. ДСТУ 2583-94. Обладнання технологічне для хлібопекарської промисловості. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.01.1995]. Київ : Держстандарт України, 1994. 25 с.

62. ДСТУ ISO 7010:2019. Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки. [Чинний від 01.07.2020]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 80 с.

63. НПАОП 0.00-4.15-98. Положення про розробку інструкцій з охорони праці. [Чинний від 29.01.1998]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998. 20 с.

64. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). [Чинний від 01.06.2017]. Київ : Міненерговугілля України, 2017.

65. Правила охорони праці при експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний від 09.02.2018]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018.

66. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 30.12.2014]. Київ : МВС України, 2014.

67. Санітарні правила для підприємств хлібопекарської промисловості. Київ : МОЗ України, 1996.

68. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с.

69. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с.

70. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с.

71. ChatGPT. URL: https://chatgpt.com/

72. Міняйло Н. О., Ендік Т. В., Лепехов Р. О. SoftLogic-системи як інструмент прототипування прикладних програм для систем управління. Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні «Інженерні інновації та розбудова національної економіки» (15–16 травня 2025 року, м. Запоріжжя) / наук. ред. Н. Г. Метеленко ; Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. С. 937-940.

73. Лепехов Р., Задерновський М., Єрофєєва А.А. Аналіз перспектив впровадження новітніх технологій у SCADA-системи та автоматизацію енергетичних підприємств. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2026»: у 4 т. / Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2026. Т.3. С. 218-220.

Додаток А

Програмна реалізація управління температурою спалювальних газів в топках I і II зон

```
PROGRAM PLC_PRG
VAR
    StartBtn : BOOL;
    StopBtn : BOOL;
    BtnAuto : BOOL;
    BtnManual : BOOL;
    BtnPlus1 : BOOL;
    BtnMinus1 : BOOL;
    BtnPlus2 : BOOL;
    BtnMinus2 : BOOL;
    SystemRunning : BOOL := FALSE;
    AutoMode : BOOL := FALSE;
    ManualMode : BOOL := FALSE;
    Temp1 : REAL := 0.0;
    Temp2 : REAL := 0.0;
    ValvePos1 : REAL := 0.0;
    ValvePos2 : REAL := 0.0;
    ValveTarget1 : REAL := 0.0;
    ValveTarget2 : REAL := 0.0;
    Error1 : REAL := 0.0;
    Error2 : REAL := 0.0;
    Integral1 : REAL := 0.0;
    Integral2 : REAL := 0.0;
    HighTempAlarm1 : BOOL := FALSE;
    HighTempAlarm2 : BOOL := FALSE;
    LowTempAlarm1 : BOOL := FALSE;
```

```
    LowTempAlarm2 : BOOL := FALSE;
    TempReady1 : BOOL := FALSE;
    TempReady2 : BOOL := FALSE;
END_VAR
VAR CONSTANT
    SetPoint1 : REAL := 500.0;
    SetPoint2 : REAL := 500.0;
    Kp : REAL := 1.8;
    Ki : REAL := 0.0225;
    ManualStep : REAL := 1.0;
    ValveMoveStep : REAL := 2.0;
    HeatCoef : REAL := 0.5;
    CoolCoef : REAL := 0.05;
END_VAR

// Старт
IF StartBtn THEN
    SystemRunning := TRUE;
END_IF;
// Стоп
IF StopBtn THEN
    SystemRunning := FALSE;
    AutoMode := FALSE;
    ManualMode := FALSE;
    ValveTarget1 := 0.0;
    ValveTarget2 := 0.0;
    Integral1 := 0.0;
    Integral2 := 0.0;
    // Віджати всі кнопки
    StartBtn := FALSE;
```

```
    BtnAuto := FALSE;
    BtnManual := FALSE;
    BtnPlus1 := FALSE;
    BtnMinus1 := FALSE;
    BtnPlus2 := FALSE;
    BtnMinus2 := FALSE;
END_IF;
// Вибір режиму
IF SystemRunning THEN
    // Авто режим
    IF BtnAuto THEN
        AutoMode := TRUE;
        ManualMode := FALSE;
        // Віджати ручний режим
        BtnManual := FALSE;
    END_IF;
    // Ручний режим
    IF BtnManual THEN
        ManualMode := TRUE;
        AutoMode := FALSE;
        // Віджати авто режим
        BtnAuto := FALSE;
    END_IF;
END_IF;
// Якщо ручний режим активний, авто режим завжди
вимкнений
IF ManualMode THEN
    AutoMode := FALSE;
END_IF;
// Якщо авто режим активний, ручний режим вимкнений
```

```
IF AutoMode THEN
    ManualMode := FALSE;
END_IF;
// Ручний режим
IF SystemRunning AND ManualMode THEN
    // Топка зони I
    IF BtnPlus1 THEN
        ValveTarget1 := ValveTarget1 + ManualStep;
    END_IF;
    IF BtnMinus1 THEN
        ValveTarget1 := ValveTarget1 - ManualStep;
    END_IF;
    // Топка зони II
    IF BtnPlus2 THEN
        ValveTarget2 := ValveTarget2 + ManualStep;
    END_IF;
    IF BtnMinus2 THEN
        ValveTarget2 := ValveTarget2 - ManualStep;
    END_IF;
END_IF;
// Авто режим
IF SystemRunning AND AutoMode THEN
    // Топка зони I
    Error1 := SetPoint1 - Temp1;
    Integral1 := Integral1 + Error1;
    // Обмеження інтегратора
    IF Integral1 > 1000.0 THEN
    Integral1 := 1000.0;
    END_IF;
    IF Integral1 < -1000.0 THEN
```

```
    Integral1 := -1000.0;
    END_IF;
    ValveTarget1 :=
        (Kp * Error1) +
        (Ki * Integral1);
    // Топка зони II
    Error2 := SetPoint2 - Temp2;
    Integral2 := Integral2 + Error2;
    // Обмеження інтегратора
    IF Integral2 > 1000.0 THEN
    Integral2 := 1000.0;
    END_IF;
    IF Integral2 < -1000.0 THEN
    Integral2 := -1000.0;
    END_IF;
    ValveTarget2 :=
        (Kp * Error2) +
        (Ki * Integral2);
END_IF;
// Обмеження клапанів
IF ValveTarget1 > 100.0 THEN
    ValveTarget1 := 100.0;
END_IF;
IF ValveTarget1 < 0.0 THEN
    ValveTarget1 := 0.0;
END_IF;
IF ValveTarget2 > 100.0 THEN
    ValveTarget2 := 100.0;
END_IF;
IF ValveTarget2 < 0.0 THEN
```

```
    ValveTarget2 := 0.0;
END_IF;
// Плавний рух клапана зони I
IF ValvePos1 < ValveTarget1 THEN
    ValvePos1 := ValvePos1 + ValveMoveStep;
    IF ValvePos1 > ValveTarget1 THEN
        ValvePos1 := ValveTarget1;
    END_IF;
END_IF;
IF ValvePos1 > ValveTarget1 THEN
    ValvePos1 := ValvePos1 - ValveMoveStep;
    IF ValvePos1 < ValveTarget1 THEN
        ValvePos1 := ValveTarget1;
    END_IF;
END_IF;
// Плавний рух клапана зони II
IF ValvePos2 < ValveTarget2 THEN
    ValvePos2 := ValvePos2 + ValveMoveStep;
    IF ValvePos2 > ValveTarget2 THEN
        ValvePos2 := ValveTarget2;
    END_IF;
END_IF;
IF ValvePos2 > ValveTarget2 THEN
    ValvePos2 := ValvePos2 - ValveMoveStep;
    IF ValvePos2 < ValveTarget2 THEN
        ValvePos2 := ValveTarget2;
    END_IF;
END_IF;
// Нагрів топки 1
Temp1 :=
```

```
    Temp1 +
    (HeatCoef * ValvePos1 / 100.0) -
    CoolCoef;
// Нагрів топки 2
Temp2 :=
    Temp2 +
    (HeatCoef * ValvePos2 / 100.0) -
    CoolCoef;
// Обмеження температури
IF Temp1 > 550.0 THEN
    Temp1 := 550.0;
END_IF;
IF Temp1 < 0.0 THEN
    Temp1 := 0.0;
END_IF;
IF Temp2 > 550.0 THEN
    Temp2 := 550.0;
END_IF;
IF Temp2 < 0.0 THEN
    Temp2 := 0.0;
END_IF;
// Перевірка досягнення робочої температури
IF (Temp1 >= 490.0) AND (Temp1 <= 510.0) THEN
    TempReady1 := TRUE;
END_IF;
IF (Temp2 >= 490.0) AND (Temp2 <= 510.0) THEN
    TempReady2 := TRUE;
END_IF;
// Аварія топки I
IF TempReady1 THEN
```

```
    // Висока температура
    IF Temp1 >= 540.0 THEN
        HighTempAlarm1 := TRUE;
    ELSE
        HighTempAlarm1 := FALSE;
    END_IF;
    // Низька температура
    IF Temp1 <= 460.0 THEN
        LowTempAlarm1 := TRUE;
    ELSE
        LowTempAlarm1 := FALSE;
    END_IF;
ELSE
    HighTempAlarm1 := FALSE;
    LowTempAlarm1 := FALSE;
END_IF;
// Аварія топки II
IF TempReady2 THEN
    // Висока температура
    IF Temp2 >= 540.0 THEN
        HighTempAlarm2 := TRUE;
    ELSE
        HighTempAlarm2 := FALSE;
    END_IF;
    // Низька температура
    IF Temp2 <= 460.0 THEN
        LowTempAlarm2 := TRUE;
    ELSE
        LowTempAlarm2 := FALSE;
    END_IF;
```

```
ELSE
    HighTempAlarm2 := FALSE;
    LowTempAlarm2 := FALSE;
END_IF;
```

Додаток Б

Замовна специфікація на комплекс технічних засобів

Позиція	Найменування та технічна характеристика обладнання й матеріалів, завод-виробника	Тип, марка обладнання	Одиниця вимірювання		Код завода виробника	Код обладнання, матеріалу	Ціна одиниці, грн	Кількість	Маса одиниці обладнання, кг
			Наймен.	Код					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Прилади та засоби автоматизації									
1а,1б,2а,2б,3а	Термоперетворювач ДСТУ EN 60584-1:2016	Тера Модель 1-3	шт.				500	5	0.5
4а,5а,5б,6а	Перетворювач тиску EN175301-803	ПД100-111	шт.				3 540	4	0.2
7а, 7б	Перетворювач тиску ДСТУ OIML D 11:2019	Сафір-М 7220	шт.				10000	2	5.8
8а, 9а, 10а	Коріолісний витратомір	LUGB	шт.				9000	3	10
11а,11б, 11в, 11ґ	Перетворювач вологості	Тера "Y" 2-02	шт.				3000	2	0.5
13б	Тахометр	ТХ01	шт.				3816	1	0.5
13а	Безконтактний індуктивний датчик	ІДП	шт.				870	1	0.2
1д, 1г, 2д, 2г, 3б	Нормуючий перетворювач	NPM-15	шт.				7514	5	0.3
3г, 4, 8,6б, 8б, 9б, 10б	Індикатор	ІТМ-300	шт.				5802	6	0.25
1ж, 2е, 9б, 7б, 11е	Індикатор	ІТМ-320	шт.				15108	5	0.25
3в, 4г, 6г, 8в, 9в, 10в	Реєструючий прилад	MAS-100	шт.				6750	6	0.25
2к, 2н, 5в, 5п, 6в, 7г, 7к, 11к, 12а, 13а	Блок ручного керування	БРУ-110	шт.				1594.8	10	0.5
2а,2о,5к,5ч,6е	Пускач безконтактний реверсивний	ПБР-21	шт.				7710	5	4
7д,7а, 11а, 13г	Перетворювач частоти	Sinamics G120	шт.				12000	4	2
2к,2п,5а,5ф,6ж	Виконавчій механізм	МЕО-100/25-0,25	шт.				11500	5	19
7е,7к, 11к, 13д	Електродвигун	AIP112M2	шт.				84.13	4	4.9
12в	Електродвигун	AIP80	шт.				3600	1	14
2р,2ч,5к,5п,6ж	Клапан поворотний	25с9300нж	шт.				8000	5	
12б	Магнітний пускач	LC1D09B0	шт.				2087,93	1	0.48
2н,2с,5п,5р,6э	Дистанційний покажчик положення валу виконавчого механізму	ДУП-М	шт.				1200	5	0.6
3в,4,5в,5с,6в	Блок живлення	БП-50-1к	шт.				634.2	5	0.35
1в,2в,11в	Блок живлення	БП-24-2к	шт.				3852	3	1.2
2. Агрегатні комплекси та засоби обчислювальної техніки									
	Шасі модулів PLC	BMXXBP0600	шт.				6676,28	1	0.79
	Блок живлення PLC	BMXCPS3500	шт.				19044,41	1	0.36
	Програмований логічний контролер	BMEP581020	шт.				70140,25	1	0.849
	Аналоговий модуль вводу	BMXAMI0800	шт.				26232,31	1	0.165
	Аналоговий модуль вводу	BMXAMI0410	шт.				18883,91	1	0.143
	Аналоговий модуль виводу	BMXAMO0802	шт.				28131,64	1	0.15
	Дискретний модуль виводу	BMXDRC0805	шт.				17211,52	1	0.189
	Комп'ютер для SCADA	Lenovo	шт.				40000	1	6.5
3. Щити та пульти управління									
	Панель щита КВПіА	Vector VS Shark	шт.				13150	1	
4. Електроапаратура									
В1	Автоматичний вимикач	6kA 2P 16A C, Resi9	шт.				507,94	1	0.24
В2-В10	Автоматичний вимикач	ВА 47-60 2р 3А 6кА З ІЕК	шт.				119	9	0.24
31	Запобіжник плавкий	6А 250В 6х30	шт.				5	1	0.005
32-310	Запобіжник плавкий	ETI CH 5x20 HF 4 A 250V	шт.				15	9	0.005
КК	Клемна колодка		шт.				200	1	0.016
	Клемна колодка		шт.				100	4	0.008
5. Трубопровідна арматура									
	Гофро-труба D25/18.3 мм, PVC внутр./зовнішня з протяжкою	Тр ПВХ 25х6.7	м				23,38	154	
6. Кабелі та провода									
1,2	Дріт компенсаційний ГОСТ 1791-67	ПТП ХА 2х0,75	м				55	20	
5,7	Кабель контрольний ДСТУ Б В.2.5-32:2007	АКВВГ 7х2.5	м				23,14	70	
6,8	Кабель контрольний ДСТУ Б В.2.5-32:2007	АКВВГ 3х2.5	м				20,09	78	
3,4	Кабель ВВГ 4х2,5 нгд ЗЗКМ	ВВГНГД 4х2.5	м				33,8	10	
7. Монтажні матеріали									
ДД1, ДД2	DIN-рейка	35х15х1,5 мм	м				486	2	1.2