

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НИІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Розроблення системи автоматичного керування технологічними параметрами парового котлоагрегату»

Спеціальність:

151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ (підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

_____ Коваленко М.О.
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівник бакалаврської роботи

_____ Опришко О.О., к.т.н., доцент
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Коваленко Максиму Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: Розроблення системи автоматичного керування технологічними параметрами парового котлоагрегату.

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" листопада 2024 р. № 2056 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.30

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи. Наукова література та публікації, що відповідають тематиці бакалаврської кваліфікаційної роботи. Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу пароутворення в котлоагрегатах.
2. Дослідження парового котлоагрегата як об'єкта автоматизації.
3. Вибір регуляторів та їх обґрунтування.
4. Дослідження системи автоматичного керування параметрами парового котлоагрегату.
5. Схеми системи автоматизації.

Дата видачі завдання "18" листопада 2024 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____ Опришко О.О.

Завдання прийняв до виконання _____ Коваленко М.О.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 82 сторінок, 11 рисунків, 6 таблиць, 20 джерел, 6 додатків.

Ключові слова: автоматизація, котлоагрегат, регулятор тиску, Arduino, SCADA, LabVIEW, рівень води, розрідження, PI-регулятор, паровий котел.

У дипломному проєкті розроблено систему автоматичного керування технологічними параметрами парового котлоагрегату ДЕ-10-14ГМ. Основна увага приділена регулюванню тиску пари, рівня води у барабані та розрідження в топці. Обрано оптимальні первинні перетворювачі, регулюючі органи та електроприводи.

Для реалізації системи керування використано контролер Arduino Mega. Регулятори синтезовано в середовищі MATLAB Simulink із подальшою реалізацією в програмному коді Arduino IDE. Розроблено повноцінну SCADA-систему в середовищі NI LabVIEW, яка забезпечує візуалізацію технологічних параметрів, управління режимами роботи, логування даних та аварійну сигналізацію.

Також розроблено функціональну схему автоматизації, електричну принципову схему, схему з'єднань, схему підключень. У дипломному проєкті передбачено всі необхідні заходи захисту обладнання та персоналу, включаючи вибір УЗО, автоматичних вимикачів, теплових реле та стабілізаторів живлення.

Результатом виконаної роботи є інтегрована система автоматичного керування, що забезпечує стабільну та безпечну роботу парового котла і може бути безпосередньо впроваджена.

ABSTRACT

Diploma project: 82 pages, 11 figures, 6 tables, 20 sources, 6 appendices.
Keywords: automation, boiler unit, pressure regulator, Arduino, SCADA, LabVIEW, water level, draft, PI controller, steam boiler.

This diploma project presents the development of an automatic control system for the technological parameters of a steam boiler unit DE-10-14GM. The main focus is on the regulation of steam pressure, water level in the drum, and draft pressure in the combustion chamber. The optimal selection of primary transducers, control valves, and electric actuators has been carried out.

The control system is implemented using an Arduino Mega microcontroller. The regulators were synthesized in MATLAB Simulink and then implemented in the Arduino IDE environment. A full-featured SCADA system was developed in NI LabVIEW, providing real-time visualization of process parameters, mode control, data logging, and emergency signaling.

Additionally, a functional automation diagram, an electrical schematic, connection layout, and wiring diagram were developed. The diploma project includes all necessary safety measures for both equipment and personnel, including the selection of RCDs, circuit breakers, thermal relays, and voltage stabilizers.

The result of the project is an integrated automatic control system that ensures stable and safe operation of the steam boiler and is suitable for direct industrial implementation.

Зміст

РЕФЕРАТ	3
ABSTRACT	4
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1 Парові котлоагрегати як технологічна система.	9
1.2 Загальна характеристика котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ.....	9
1.3 Параметри що підлягають контролю та автоматизації	11
1.4 Постановка задачі	12
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	13
2.1 Підхід до формування функціональної схеми	13
2.2 Аналіз функціональної схеми автоматизації.....	13
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	15
3.1 Вибір первинних перетворювачів	15
3.1.1 Вибір приладу для вимірювання рівня води в барабані котлоагрегата	16
3.1.2 Вибір приладу для вимірювання тиску пари в барабані котлоагрегата	17
3.1.3 Вибір термопари для вимірювання температури в топці	18
3.1.4 Вибір датчика наявності полум’я в пальниковому пристрої.....	19
3.1.5 Вибір датчика розрідження.....	20
3.1.6 Вибір засобу вимірювання витрати живильної води	21
3.1.7 Вибір витратоміра пари.....	22
3.1.8 Вибір витратоміра повітря.....	23
3.1.9 Вибір термодатчика для вимірювання температури живильної води	24
3.1.10 Вибір витратоміра для вимірювання витрати природного газу	25
3.2 Вибір виконавчих механізмів	26
3.2.1 Вибір регулювального клапана подачі води.....	28
3.2.2 Вибір сервоприводу до клапана подачі води	30
3.2.3 Вибір живильного насосу води	31
3.2.4 Вибір вентилятора дугтя	31
3.2.5 Вибір повітряної заслінки.....	32
3.2.6 Вибір сервоприводу до повітряної заслінки	33
3.2.7 Вибір димососа	34
3.2.8 Вибір регулювальної заслінки димових газів	35
3.2.9 Вибір сервоприводу до заслінки димових газів	36

3.2.10 Вибір газового клапану	37
3.2.11 Вибір електрозапальника	38
3.2.12 Вибір пристрою сигналізації	39
3.2.13 Вибір мікроконтролера для реалізації логіки автоматизації	39
3.3 Вибір електротехнічної складової.....	40
3.3.1 Вибір засобів живлення системи автоматизації.....	40
3.3.2 Вибір засобів захисту живлення	42
РОЗДІЛ 4 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	45
4.1 Розробка електричної принципової схеми системи автоматизації	45
4.2 Розробка схеми електричних з'єднань	46
4.3 Розробка схеми електричних підключень	47
РОЗДІЛ 5 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ.....	48
5.1 Математичне моделювання об'єкта регулювання тиску пари	48
5.2 Синтез ПІ-регулятора для тиску пари	50
5.3 Побудова математичної моделі системи підтримання рівня води в барабані.....	52
5.4 Синтез ПІ-регулятора для рівня води в барабані.....	54
5.5 Побудова математичної моделі системи підтримання розрідження в топці.....	58
5.6 Синтез ПІ регулятора для розрідження	59
5.7 Побудова математичної моделі системи підтримання рівня витрати повітря відповідно до витрати газу.....	60
5.8 Синтез ПІ регулятора для витрати повітря	61
РОЗДІЛ 6 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОЇ ЛОГІКИ КЕРУВАННЯ ТА SCADA	64
6.1 Програмне забезпечення Arduino MEGA 2560.....	64
6.1.1 Загальна структура програмної логіки	64
6.1.2 Алгоритм переходу між режимами (функція <i>Cases</i>).....	64
6.1.3 Зчитування вхідних сигналів.....	66
6.1.4 Логіка аварійного вимкнення	68
6.1.5 Регулятори технологічних параметрів.....	69
6.1.6 Оновлення вихідних сигналів та LCD.....	71
6.1.7 Формування рядка даних для SCADA.....	73
6.2 Інтерфейс оператора та SCADA в LabVIEW	75
6.2.1 Призначення та загальний огляд системи SCADA.....	75
6.2.2 Архітектура взаємодії Arduino з LabVIEW	76
6.2.3 Побудова фронтальної панелі.....	76

ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
ДОДАТКИ	82
Додаток 1. Фрагмент функціональної схеми автоматизації.....	82
Додаток 2. Фрагмент схеми електричної принципової.....	82
Додаток 3. Фрагмент схеми електричної з'єднань	83
Додаток 4. Фрагмент схеми електричної підключень	83
Додаток 5. Посилання на файл коду в середовищі Arduino IDE.....	84
Додаток 6. Посилання на папку SCADA з програмою та інтерфейсом	84

ВСТУП

Сучасна промислова енергетика неможлива без широкого застосування парових котлів, які забезпечують теплопостачання, технологічні потреби виробництва та роботу енергетичного обладнання. В умовах зростання вимог до надійності, ефективності та безпечності теплоенергетичних установок дедалі актуальнішим стає впровадження засобів автоматизації. Автоматизовані системи керування дозволяють зменшити вплив людського чинника, забезпечити стабільне підтримання технологічних параметрів та оперативне реагування на аварійні ситуації.

Котли типу ДЕ-10-14ГМ залишаються одним із найпоширеніших рішень у промисловості, зокрема у комунальному теплопостачанні. Вони застосовуються як у великих теплоелектроцентралях, так і в локальних системах, де необхідне стабільне теплопостачання та надійна парогенерація для технологічних потреб. Вони характеризуються простою конструкцією, значним ресурсом роботи та стабільними технічними показниками. Водночас більшість таких котлів експлуатуються без сучасної цифрової автоматизації або з мінімальним набором засобів керування. Це створює потенціал для модернізації на базі доступної мікропроцесорної техніки — зокрема, використання Arduino як керувального пристрою, а також датчиків і виконавчих механізмів, що підтримують типові аналогові інтерфейси.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматичного керування технологічними параметрами парового котлоагрегату ДЕ-10-14ГМ. Зокрема, передбачається забезпечити автоматичне регулювання тиску пари, контроль і підтримання рівня живильної води в барабані, а також логічний

контроль наявності полум'я у топці з реалізацією аварійного вимкнення подачі палива.

Об'єктом дослідження виступає технологічний процес виробництва пари у водотрубному котлоагрегаті. Предметом дослідження є засоби та методи автоматизації, що застосовуються для підтримання основних параметрів у допустимих межах. У межах проєкту також розглядається комплексна автоматизація парового котлоагрегату: від вибору та встановлення датчиків і виконавчих механізмів до створення SCADA-інтерфейсу оператора і написання коду керування. Важливим аспектом є узгодження апаратної частини з програмною логікою, структурна побудова системи та вибір технічних засобів, сумісних із контролером Arduino. Okремо розглядаються питання моделювання динаміки регульованих об'єктів, налаштування ПІ-регуляторів, а також реалізації алгоритмів аварійного вимкнення та безпечного запуску обладнання. Усі розробки орієнтовано на практичне впровадження з урахуванням особливостей об'єкта керування.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Парові котлоагрегати як технологічна система.

Паровий котлоагрегат — це теплоенергетичне обладнання, призначене для перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію насиченої або перегрітої водяної пари. Основними компонентами такої технологічної системи є камера згоряння, поверхні нагріву (екрани, конвективні пучки), барабан або колектор, система подачі палива та повітря, а також газовідвідна система. Робота агрегата базується на теплообміні між продуктами згоряння і водою, яка поступово перетворюється на пару.

Для підтримання безперервного процесу пароутворення котлоагрегати мають систему циркуляції, яка може бути природною або примусовою. У випадку природної циркуляції використовується різниця густин між нагрітою та охолодженою водою, що створює циркуляційний контур без потреби в насосах.

Основними параметрами, що характеризують роботу парового котла є тиск і витрата пари, температура в зоні горіння, витрати палива та повітря, рівень води у барабані, а також розрідження у топці.

Важливою особливістю парових котлоагрегатів як технологічної системи є тісний взаємозв'язок між усіма контрольованими параметрами. Наприклад, зниження подачі води впливає на циркуляцію і може призвести до перегріву труб, а зміна подачі повітря або тиску газу — до нестабільного горіння або підвищених викидів.

1.2 Загальна характеристика котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ

Котлоагрегат ДЕ-10-14ГМ є водотрубним, двобарабанним паровим котлом з природною циркуляцією і горизонтальною компоновкою за схемою типу «Д». Він призначений для виробництва насиченої водяної пари в умовах промислового або комунального теплопостачання. Основним видом палива є природний газ; мазутна частина в межах цього проекту не використовується.

Згідно з паспортними характеристиками, котел забезпечує номінальну паропроодуктивність 10 т/год при робочому тиску 1,4 МПа і температурі пари

194 °С. Теплоносій використовується у вигляді насиченої пари без додаткового перегріву.

Конструктивно агрегат складається з верхнього і нижнього барабанів, між якими розташовані трубні поверхні нагріву. Барабани мають діаметр 1000 мм, товщину стінки 13 мм і з'єднані між собою опускними та підйомними трубами. Відстань між барабанами — 2750 мм. Топкова камера утворена трубчастими екранами, що формують її бокові, задню і фронтальну стінки, які інтенсивно сприймають теплове випромінювання полум'я. Конвективна частина розташована зліва від топки і сформована з вертикальних труб у коридорній схемі.

Подача живильної води температурою 100 °С здійснюється у верхній барабан під рівень води, після чого вода надходить до нижнього барабана через опускні труби. Далі вона потрапляє у екранні труби, де відбувається інтенсивний теплообмін із продуктами згоряння, і вода перетворюється на пароводяну суміш. Суміш піднімається у верхній барабан по зливних трубах циркуляційного контуру.

У верхньому барабані відбувається сепарація пароводяної суміші. На першому етапі потік спрямовується направляючими щитами і козирками, які забезпечують попереднє відокремлення важкої фази. Для доочищення пари використовується горизонтальний жалюзійний сепаратор і перфорований лист. Така комбінація забезпечує ефективне відділення вологи, і в паропровід потрапляє тільки суха насичена пара. Вода повертається до циркуляційного контуру через нижній барабан.

Горіння палива відбувається в об'ємі топки, у фронтальній частині якої встановлений пальник типу ГМ-7 (частина базової комплектації). Газ подається через регулюючий клапан та магістраль, оснащену запірною та запобіжною арматурою. Повітря для горіння надходить від дуттєвого вентилятора, а відведення продуктів згоряння забезпечується димососом. Продукти згоряння після топки проходять через конвективну частину, де додатково нагрівають робоче середовище.

Котел має габарити транспортбельного блоку 5710×3030×4028 мм, загальні габарити — 6530×4050×5050 мм. Маса агрегата в заводській комплектації — 17 680 кг. ККД досягає 93,2 % при роботі на газі, що забезпечується оптимальним тепловим навантаженням і мінімальними втратами тепла.

Таким чином, котел ДЕ-10-14ГМ у базовому виконанні є прикладом ефективного об'єкта для автоматизації: з вираженою тепловою інерційністю, критичністю параметрів, добре відомою конструкцією і поширеністю в промисловості. Ці

особливості визначають технічну доцільність розробки сучасної системи автоматичного керування, яка є предметом цього дипломного проєкту.

1.3 Параметри що підлягають контролю та автоматизації

Автоматизація роботи парового котлоагрегата передбачає постійний контроль і регулювання технологічних параметрів, які впливають на стабільність, безпечність і ефективність процесу пароутворення. У випадку котла ДЕ-10-14ГМ система автоматизації орієнтована на підтримання необхідного тиску пари, рівня живильної води у барабані, наявності горіння та інших параметрів, які мають технологічну або аварійну значущість.

Усі ці параметри взаємопов'язані: зміна витрати пари веде до зміни рівня, зменшення подачі повітря може викликати нестабільне горіння, а відхилення температури в зоні топки — сигналізує про перевантаження або несправність.

Таблиця 1.1 – Перелік основних параметрів для автоматизації

№	Параметр	Призначення в САК
1	Наявність полум'я	Керування запуском Аварійний захист
2	Температура в топці	Моніторинг Аварійний захист
3	Розрідження в топці	Регулювання процесу горіння Аварійний захист
4	Витрата газу	Регулювання потужності Аварійний захист
5	Витрата повітря	Керування коефіцієнтом надлишку повітря Забезпечення нормальних умов для утворення продуктів згорання
6	Тиск пари	Основний регульований параметр Аварійний захист

№	Параметр	Призначення в САК
7	Витрата пари	Контроль навантаження
8	Температура живильної води	Контроль
9	Рівень води в барабані	Аварійний захист
10	Витрата живильної води	Регулювання рівня води в барабані

1.4 Постановка задачі

На основі проведеного аналізу технологічного процесу пароутворення у котлоагрегаті ДЕ-10-14ГМ сформульовано основні задачі, що вирішуються в межах даного дипломного проєкту:

- 1) Розробка функціональної схеми автоматизації, що відображає контури регулювання, контролю та аварійного захисту.
- 2) Вибір первинних перетворювачів, виконавчих механізмів, контролера й допоміжного обладнання відповідно до вимог ФСА.
- 3) Побудова математичних моделей основних контурів регулювання з урахуванням паспортних і динамічних характеристик обладнання.
- 4) Синтез регуляторів технологічних параметрів із забезпеченням стійкості та заданої якості регулювання.
- 5) Розробка електричних схем, що реалізують з'єднання елементів системи.
- 6) Реалізація алгоритмів керування.
- 7) Створення SCADA-інтерфейсу для моніторингу параметрів і взаємодії оператора з системою.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Підхід до формування функціональної схеми

Автоматизація парового котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ покликана забезпечити його стабільну, економічну та безпечну експлуатацію в усьому робочому діапазоні навантажень. З урахуванням теплотехнічних характеристик і динамічної поведінки установки, система автоматичного керування повинна підтримувати задані значення основних технологічних параметрів, своєчасно реагувати на зовнішні й внутрішні збурення, а також унеможливити розвиток небезпечних або аварійних режимів.

Схема охоплює технологічні процеси, пов'язані з подачею й регулюванням палива, повітря, пари, води, а також з контролем умов горіння. Для кожного з контурів визначено точки контролю технологічних параметрів і положення виконавчих механізмів. Інформація з контрольованих точок надходить до контролера, який реалізує логіку регулювання, реагування на відхилення та запуск аварійних сценаріїв. Управляючі сигнали, що формуються контролером, впливають на виконавчі елементи, забезпечуючи підтримку заданих режимів.

Функціональна схема будується на основі принципів централізованого керування з можливістю візуалізації процесу та втручання оператора через SCADA-інтерфейс.[2]

2.2 Аналіз функціональної схеми автоматизації

На схемі виділено чотири структуровані контури: контур води, контур пари й газу, контур топки та контур повітря. Кожен контур містить елементи контролю, виконавчі пристрої та вузли індикації/реєстрації, згруповані відповідно до їхнього фізичного розташування — на місці або на щиті керування.

В рамках цієї ФСА прилади (IR) на щиті відповідають за відображення та реєстрацію значень відповідного контуру, а прилади (LCR), (PCR), (TCR (ТОРКА)), (PDCR(AIR)) — за автоматичне керування параметрів яким відповідає перша буква їх назви.

Контур води

У цьому контурі реалізовано контроль і керування подачею живильної води. Елемент М2 позначає двигун живильного насоса, а КМ2 — контактор, через який

здійснюється його пуск. FC3 (W) виконавчий механізм що виконує функцію контролю витрати води. LT1 — рівнемір, що забезпечує вимірювання рівня води в барабані. TT (W) та FT (W) відповідають за контроль температури живильної води та витрати відповідно. На щиті встановлено прилади LCR — контролю рівня, та IR (Water) — блок індикації та реєстрації сигналів, пов'язаних з контуром води.

Контур пари й газу

У цьому контурі зосереджено елементи, що забезпечують контроль параметрів на виході котла та подачу палива. FC2 (G) — контролює витрату газу. PT1 (S) — манометр для вимірювання тиску пари в барабані, FT3 (S) — контролює витрату пари, а FT1 (G) — витрату газу. На щиті встановлені прилади PCR — регулятор контуру пари й палива, та IR (Steam+Gas) — вузол індикації та реєстрації відповідних сигналів.

Контур топки

У цьому контурі зосереджено контроль за наявністю полум'я та температурним режимом у топці. IG1 — пристрій для виявлення полум'я, IGE1 — електрозапальник. TE1 — температурний перетворювач, що контролює умови згоряння. На щиті встановлено два вузли: TCR (Торка) — відповідальний за реагування на критичні умови, та IR (Торка) — блок індикації й реєстрації параметрів у топці.

Контур повітря

Цей контур забезпечує контроль витрати повітря, розрідження та подачу дуття. M1 та M3 — двигуни вентилятора дуття й димососа відповідно. KM1 та KM3 — контактори для їх пуску. FC1 (Air) та FC4 (Flue) — датчики витрати відповідно для повітря та димових газів. PDT1 — диференційний перетворювач тиску, що контролює розрідження в топці. FT2 (Air) — перетворювач витрати повітря. На щиті знаходяться вузли PDCR (Air) — регулятор подачі повітря та димових газів, IR (Air) — блок індикації.

ACIR (Alarm) — пристрій аварійного стану що з'єднаний з всіма блоками керування та індикації для активного контролю значень та ініціації алгоритму аварійних ситуацій.

Усі контури об'єднані в єдину систему автоматичного керування, де кожен з елементів функціональної схеми має визначене функціональне навантаження.

РОЗДІЛ 3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір первинних перетворювачів

Таблиця 3.1 Перелік первинних перетворювачів

№	Параметр	Тип засобу	Модель	Характеристики	Сигнал	Примітки
1	Рівень води в барабані	Рівнемір	VEGAFL EX 86	TDR, до 4 МПа, до 200 °С, компенсація парової подушки	4–20 мА	Основний контур регулювання
2	Тиск пари в барабані	Датчик тиску	BD Sensors DMP 331	0–1.6 МПа	4–20 мА	Основний контур регулювання
3	Температура в топці	Термопара	Тип К	До 1100 °С, жаростійкий електрод	Напруга	Аварійне вимкнення при перегріві
4	Наявність полум'я	Оптичний датчик	ІЧ-датчик YG1006	Встановлення в лючку спостереження	Дискретний	Аварійне вимкнення при згасанні полум'я
5	Розрідження в топці	Датчик тиску	Sensirion SDP600-125Pa	-100 до +125Па	4–20 мА	Контроль тяги в топці
6	Витрата живильної води	Електромагнітний витратомір	KROHNE OPTIFLU X 4300 C	DN32–40, PTFE, до 150 °С, до 25 бар	4–20 мА	З запасом під економайзер

№	Параметр	Тип засобу	Модель	Характеристики	Сигнал	Примітки
7	Витрата пари	Вихровий витратомір	Siemens SITRANS FX330	DN50, до 240 °С, інтегрована компенсація температури й тиску	4–20 мА (масова)	Повноцінна масова витрата пари
8	Витрата повітря	Термомасовий витратомір	E+E Elektronik EE772	До 60 000 м ³ /год, калібрований під 0–10 000 м ³ /год, до 85 °С	4–20 мА	Співвідношення газ–повітря
9	Температура живильної води	Термометр опору з перетворювачем	WIKA TR10-C + T32	Pt100, до 150 °С, до 25 бар	4–20 мА	Контроль температури перед подачею в барабан
10	Витрата газу	Турбінний витратомір	Silver Automation Instruments – GTFM	До 1000 м ³ /год, до 1.6 МПа, DN50–80	4–20 мА	Моніторинг подачі газу, аналіз співвідношення

3.1.1 Вибір приладу для вимірювання рівня води в барабані котлоагрегата

Підтримання допустимих меж рівня забезпечує безпечну роботу обладнання, запобігає перегріву екранних труб при недостатньому рівні та виносу вологи до парової магістралі при надмірному рівні.

Відповідно до паспортних характеристик котла, номінальний робочий тиск пари становить 1,4 МПа, рівень води в барабані регулюється автоматично в діапазоні

0,3-0,8 м з номінальним значенням 0,5 м. При цьому барабан перебуває під тиском насиченої пари, що створює парову подушку над водяною поверхнею, яка є джерелом похибок для звичайних рівнемірів.

Виходячи з вищенаведених умов експлуатації, прилад для вимірювання рівня повинен відповідати наступним вимогам:

- допустимий тиск не менше ніж 1,6 МПа
- температурна стійкість не нижче 200 °С
- наявність компенсації впливу парової подушки
- стійкість до корозії, відкладень та гідрударів

На основі вищенаведених критеріїв було обрано модель VEGAFLEX 86 виробництва VEGA (Німеччина) — високоточний рівнемір на основі технології часо-імпульсної рефлектометрії (TDR). Цей прилад побудований за принципом вимірювання часу затримки радіохвилі, що проходить по зондованому кабелю до межі розділення фаз (вода/пара) і повертається назад. Такий підхід дозволяє надійно визначати рівень навіть у присутності щільної парової подушки, піни або перемішаних фаз.

VEGAFLEX 86 має такі технічні характеристики:

- робочий тиск: до 4 МПа
- робоча температура: до 200 °С
- точність: ± 2 мм
- вихідний сигнал: 4–20 мА
- спосіб монтажу: фланцевий або різьбовий, верхнє вбудовування в барабан

3.1.2 Вибір приладу для вимірювання тиску пари в барабані котлоагрегата

Тиск пари в паровому барабані котлоагрегата є одним із базових параметрів, що визначають енерговіддачу системи, стабільність парозабезпечення споживачів та безпеку роботи обладнання. Для забезпечення ефективного функціонування системи автоматичного регулювання, значення тиску має бути доступне в реальному часі з високою точністю та надійністю.

До засобу вимірювання тиску пред'являються наступні вимоги:

- діапазон вимірювання — не менше 0...1,6 МПа
- робоча температура — не нижче 200 °С (враховується теплообмін через імпульсну трубку)
- стабільність і точність — похибка не більше $\pm 0,25\%$ від діапазону
- стійкість до гідрударів, вібрацій та вологого середовища

Для реалізації вимірювання обрано датчик тиску моделі DMP 331 виробництва BD Sensors (Німеччина). Це промисловий перетворювач тиску з мембранним сенсором, придатний для тривалої роботи в умовах високих температур і тисків.

Технічні характеристики DMP 331:

- діапазон: 0...1.6 МПа (налаштовується)
- робоча температура середовища: до 125 °С
- робоча температура навколишнього середовища: до 85 °С
- матеріал корпусу: нержавіюча сталь AISI 316L
- захист: IP67
- точність: $\pm 0,25\%$ (за замовленням — $\pm 0,1\%$)
- сигнал на виході: 4–20 мА
- тип монтажу: через адаптер під імпульсну трубку

Для запобігання перегріву сенсорного елемента, датчик встановлюється на імпульсній трубці, що забезпечує температурну декомпресію. Такий спосіб монтажу є стандартом для вимірювання тиску в парових системах і дозволяє використовувати датчик у системах із температурою пари до 200 °С без зниження ресурсу приладу.

3.1.3 Вибір термопар для вимірювання температури в топці

Відхилення температури в топці від допустимого діапазону може вказувати на порушення режиму згоряння, недостатню подачу повітря, пошкодження пальника або зниження ефективності теплообміну.

Згідно з конструкцією котла ДЕ-10-14ГМ, пальник встановлений у передній частині топки, а згоряння палива відбувається в екранізованій камері. Робочі температури в зоні факела можуть досягати 1000–1200 °С, однак для контролю температурного режиму використовується точка спостереження в області відведеної від самого факела.

На основі аналізу вимог було обрано термопару типу К (NiCr–Ni), яка є стандартом для вимірювання високих температур у газовій атмосфері. Основні характеристики обраного типу:

- Діапазон температур: від –40 до +1100 °С
- Матеріал: нікель-хром/нікель-алюміній (NiCr–Ni)
- Спосіб монтажу: через жаростійку гільзу або ізолюючий кожух у кришці лючка

З практичної точки зору, термопара типу К є доступною, надійною та універсальною для вбудування у технологічні отвори, передбачені в конструкції котлів для діагностики температури в топці. Вона забезпечує достатню точність для реалізації аварійної логіки.

Для інтеграції з системою керування термопара підключається до перетворювача термоЕРС у 4–20 мА. Це дозволяє передати сигнал до Arduino або модуля SCADA з відповідною лінеаризацією шкали.

3.1.4 Вибір датчика наявності полум'я в пальному пристрої

Контроль наявності полум'я в пальному пристрої є обов'язковою умовою безпечної експлуатації газового котлоагрегата. У разі згасання факела продовження подачі газу може призвести до утворення вибухонебезпечної суміші в топці та як наслідок, до вибуху при повторному запалюванні. Тому система автоматизації має забезпечити миттєве виявлення згасання полум'я та аварійне припинення подачі газу.

Згідно з конструкцією котла ДЕ-10-14ГМ, спостереження за горінням передбачено через оглядовий лючок, розташований у фронтальній частині топки, поруч із пальником. Це дозволяє використати оптичний (безконтактний) принцип визначення полум'я, що дає значні переваги: мінімальне втручання в конструкцію камери згоряння, відсутність впливу високих температур на чутливі елементи та зручність обслуговування.

Для реалізації функції контролю полум'я у проєкті обрано інфрачервоний датчик YG1006, який працює у спектральному діапазоні характерному випромінюванню вогню при згорянні природного газу (CH₄). Це дає змогу впевнено фіксувати наявність факела, навіть при зміні інтенсивності світіння чи відблиску від стінок.

Основні характеристики ІЧ-датчика YG1006:

- спектральна чутливість: 760...1100 нм
- кут огляду: 60°
- напруга живлення: 3.3–5 В
- вихід: логічний сигнал (LOW при виявленні полум'я)
- час реакції: <15 мс
- температура експлуатації: –25...+85 °С

3.1.5 Вибір датчика розрідження

Контроль розрідження в топці є критично важливим для забезпечення стабільності процесу горіння та запобігання зворотному прориву полум'я. У стабільному режимі значення розрідження в топці для котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ становить приблизно –25 Па. Вихід за межі допустимого діапазону свідчить про порушення в роботі димососа, засмічення газоходу або несправність вентиляції.

До основних вимог до датчика розрідження належать:

- здатність вимірювати значення в низькому діапазоні (менше ± 150 Па)
- наявність уніфікованого аналогового виходу для безпосереднього підключення до контролера
- стійкість до впливу пульсацій тиску та робота при високій температурі в зоні забору імпульсу.

У зв'язку з цим для проекту обрано диференційний сенсор тиску Sensirion SDP600-125Pa, який забезпечує вимірювання в діапазоні від –100 до +125 Па. Забір тиску здійснюється через імпульсну трубку з зоною відбору на корпусі топки.

Прилад має високу точність, стійкий до коливань тиску, а також не потребує калібрування протягом тривалого періоду експлуатації. Його використання дозволяє реалізувати контур регулювання тяги в топці шляхом подачі сигналу на сервопривід регулювальної заслінки в димовому каналі.

3.1.6 Вибір засобу вимірювання витрати живильної води

Контроль витрати живильної води дозволяє виявляти відхилення в роботі насосного обладнання, засмічення арматури або збої в подачі.

У відповідності до паспортних характеристик котла ДЕ-10-14ГМ, номінальна витрата живильної води становить 10 т/год, або приблизно 10–11 м³/год, з урахуванням повернення частини конденсату та парових втрат. За температури близької до насичення (~100 °С), вода має високу корозійну активність та здатність утворювати накип, тому вимірювальний прилад має бути хімічно стійким, без рухомих частин і з можливістю безпечної інтеграції у трубопровід живлення.

Основні вимоги до засобу вимірювання:

- діапазон витрати: не менше 0–15 м³/год
- температура середовища: до 110–120 °С
- тиск середовища: до 1.6–2.0 МПа (з запасом для роботи після насоса)
- відсутність рухомих частин
- можливість фланцевого монтажу

Для вимірювання витрати живильної води було обрано електромагнітний витратомір KROHNE OPTIFLUX 4300 С, який застосовується у промислових умовах для точного безконтактного вимірювання витрат електропровідних рідин.

Основні технічні характеристики OPTIFLUX 4300 С:

- діапазон витрат: настраюється в межах до 25 м³/год
- діаметр труби: DN32 або DN40
- температура середовища: до 150 °С
- робочий тиск: до 25 бар
- точність: ±0.3% від потоку

Особливістю електромагнітного принципу є висока точність незалежно від температури та в'язкості, а також відсутність втрат тиску, оскільки в робочому каналі приладу немає обструкцій. Витратомір не потребує частого обслуговування, стійкий до утворення накипу і повністю відповідає вимогам довготривалої експлуатації в умовах живильної води котельної установки.

3.1.7 Вибір витратоміра пари

Вимірювання витрати пари в паровому котлі є важливою частиною системи автоматизації, що забезпечує контроль продуктивності агрегата, енергооблік, а також дає змогу оцінювати ефективність роботи регулятора тиску.

Згідно з паспортом котла ДЕ-10-14ГМ, номінальна продуктивність агрегата становить 10 т/год насиченої пари, що еквівалентно приблизно 10 000 кг/год. У зв'язку з цим вимірювальний прилад повинен мати відповідний діапазон, здатність точно обробляти масові витрати, враховуючи вплив температури й тиску.

До приладу висуваються наступні технічні вимоги:

- робоче середовище: насичена пара і тиск 1.4 МПа
- діапазон вимірювання: не менше 0...12 т/год
- принцип: масовий витратомір із автоматичною компенсацією густини (температури і тиску);
- відсутність рухомих частин, низький гідравлічний опір;

У результаті технічного порівняння було обрано вихровий витратомір Siemens SITRANS FX330, спеціально призначений для роботи з насиченою парою[11]. Прилад використовує принцип вимірювання частоти вихрів, що виникають за спеціальною вставкою, розташованою в потоці. Частота цих вихрів прямо пропорційна швидкості потоку, а обчислювач на основі інтегрованих сенсорів температури та тиску визначає масову витрату в реальному часі.

Основні характеристики SITRANS FX330:

- робоче середовище: насичена пара;
- діаметр: DN50 (для нашої витрати)
- витрата: до 20 000 кг/год
- температура: до 240 °С
- тиск: до 4 МПа
- вбудовані сенсори: Pt100 + тензодатчик тиску
- точність: $\pm 1\%$ від значення

Особливістю SITRANS FX330 є вбудована компенсація температури та тиску, що дозволяє уникнути встановлення додаткових сенсорів у паропровід. Цей прилад видає готову до використання масову витрату.

У проєкті планується попереднє калібрування приладу на діапазон 0...10 000 кг/год, що відповідає номінальній продуктивності котла. Це дозволяє підвищити точність у робочому діапазоні та мінімізувати похибки.

3.1.8 Вибір витратоміра повітря

У системі автоматизації парового котлоагрегата контроль витрати повітря є необхідним для підтримання оптимального співвідношення «газ–повітря» під час горіння палива. Надлишок повітря впливає на ефективність згоряння, втрати теплоти з димовими газами та на загальний ККД котла. З іншого боку, дефіцит повітря призводить до неповного згоряння газу, утворення чадного газу та зниження теплової потужності.

У проєкті керування котлом ДЕ-10-14ГМ повітря подається дуттєвим вентилятором через регульовану заслінку. Знання фактичної витрати повітря необхідне для:

- формування оптимального співвідношення газ–повітря
- сигналізації про відхилення (засмічення тракту, аварії вентилятора)

Згідно з теплотехнічним розрахунком, при номінальній витраті газу 710 м³/год, стехіометричне співвідношення повітря:газ = 10:1, а з урахуванням коефіцієнта надлишку $\alpha = 1.1-1.3$, розрахункова витрата повітря становить 7810–9230 м³/год. Таким чином, прилад повинен бути здатним вимірювати витрати до 10 000 м³/год з хорошою точністю та стабільністю.

Основні вимоги:

- середовище: неагресивне атмосферне повітря
- діапазон вимірювання: 0...10 000 м³/год
- температура: до 80–85 °С
- діаметр повітропроводу: \approx DN300–DN400
- наявність температурної компенсації

З урахуванням цих вимог обрано витратомір E+E Elektronik EE772, розроблений спеціально для вимірювання великих витрат повітря у вентиляційних каналах і системах спалювання.

Технічні характеристики EE772:

- діапазон витрати: до 60 000 м³/год (з калібруванням на 0–10 000 м³/год)
- температура: до 85 °С

- тиск: до 1.0 МПа
- монтаж: вставний зонд через різьбове або фланцеве з'єднання
- точність: $\pm 1.5\%$

Перевагою EE772 є вбудована температурна компенсація, що дозволяє отримувати масову витрату без зовнішніх сенсорів. Крім того, пристрій не створює перепаду тиску в каналі та працює за будь-якого напрямку потоку. В рамках проєкту передбачено заводське калібрування на діапазон 0...10 000 м³/год, що забезпечить високу точність у робочій зоні.

E+E EE772 забезпечує надійне вимірювання витрати повітря, необхідне для контролю співвідношення горючої суміші, відповідає технічним умовам та легко інтегрується систему автоматизації.

3.1.9 Вибір термодатчика для вимірювання температури живильної води

Температура живильної води використовується для аналітичної перевірки режиму живлення, особливо у випадку модернізації котла з додаванням економайзера, де підігрів води відбувається за рахунок теплоти димових газів.

У базовій конфігурації котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ економайзер не передбачено, однак у перспективі його встановлення є доцільним. У зв'язку з цим обраний температурний датчик повинен мати достатній запас по температурі та тиску, аби не потребувати заміни під час реконструкції або зміни режиму.

Для виконання зазначених вимог обрано промисловий термометр опору WİKA TR10-C у комплекті з перетворювачем сигналу T32, що забезпечує перетворення з Pt100 у уніфікований струмовий сигнал.

Основні характеристики WİKA TR10-C + T32:

- чутливий елемент: Pt100
- температурний діапазон: $-50...+200$ °C
- тиск середовища: до 2.5 МПа
- матеріал занурювальної гільзи: нержавіюча сталь AISI 316L
- спосіб монтажу: через гільзу або напряду
- перетворювач T32: 4–20 мА, точність $\pm 0.1\%$ від діапазону;
- захист корпусу: IP67.

Перевагами такого рішення є:

- стійкість до температурних та тискових перевантажень;
- зручність заміни термоелемента без демонтажу всієї гільзи (у разі знімної вставки);
- відсутність необхідності у зовнішньому джерелі обробки сигналу — перетворення реалізоване у самій голівці датчика;

Таким чином, WİKA TR10-C + T32 забезпечує точне та стабільне вимірювання температури живильної води в умовах, притаманних роботі парового котлоагрегата. Прилад має відповідний запас по робочих параметрах, може бути використаний навіть після встановлення економайзера та відповідає вимогам до надійності та точності в промислових умовах.

3.1.10 Вибір витратоміра для вимірювання витрати природного газу

Контроль витрати палива є одним із ключових елементів у системі автоматизації котельних установок. У контексті проєкту автоматизації парового котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ витрата природного газу є визначальним фактором у формуванні теплової потужності котла та, відповідно, регулюванні тиску пари. Окрім регулювальної функції, вимірювання витрати газу дозволяє:

- аналізувати ефективність роботи котла
- формувати співвідношення газ–повітря для оптимізації горіння
- вести облік споживаного палива в SCADA-системі

Вихідні розрахунки свідчать, що для отримання 10 т/год насиченої пари при ККД $\approx 90\%$ котел споживає орієнтовно 700–710 м³/год природного газу. Враховуючи можливі перевантаження або роботу при неповному навантаженні, витратомір має перекривати діапазон від 0 до 1000 м³/год.

Вимоги до засобу вимірювання:

- середовище: природний газ
- діапазон витрати: до 1000 м³/год
- робочий тиск: до 0.5 МПа (на ділянці після регулятора тиску)
- температура: до 40–50 °С
- стабільна робота при коливаннях витрати та тиску
- стійкість до вібрацій, наявності пилу та можливого конденсату

На основі вищенаведених вимог було обрано турбінний витратомір природного газу від Silver Automation Instruments, з інтегрованим обчислювачем витрати та аналоговим виходом 4–20 мА.

Технічні характеристики обраної моделі:

- тип: турбінний витратомір для газу
- витрата: до 1000 м³/год (калібрований на 0–800 м³/год для точності)
- тиск: до 1.6 МПа
- температура: до 60 °С
- діаметр: DN50 або DN80 (залежно від конфігурації)
- точність: ±1.0–1.5% від діапазону
- монтаж: міжфланцевий або фланцевий, горизонтальне розміщення

Перевагами цієї моделі є висока точність у стабільному потоці, зручність підключення до стандартних промислових протоколів та відсутність необхідності у зовнішньому обчислювачі — інтегрована система автоматично формує масову або об'ємну витрату з урахуванням температури та тиску.

3.2 Вибір виконавчих механізмів

Таблиця 3.2 Перелік виконавчих механізмів

№	Назва виконавчого механізму	Тип / принцип дії	Модель	Сигнал керування	Призначення
1	Регулювальний клапан подачі води	Кульовий клапан	Gruner BOFB5025KB DN50	–	Регулювання подачі живильної води в барабан
2	Сервопривід клапана води	Пропорційний електропривід	Gruner 227CS-024-10	0–10 В	Керування регулювальним клапаном подачі води

№	Назва виконавчого механізму	Тип / принцип дії	Модель	Сигнал керування	Призначення
3	Насос живильної води	Вертикальний багатоступеневий насос	Lowara 15SV10F110T	Контактор	Подача води в котел під тиском
4	Вентилятор дуття	Відцентровий вентилятор	ВЦ 14-46 №5	Контактор	Подача повітря в топку
5	Повітряна заслінка	Поворотна заслінка	Вентс КРВ 400	–	Регулювання подачі повітря
6	Сервопривід повітряної заслінки	Пропорційний електропривід	Siemens GCA161.1U	0–10 В	Керування повітряною заслінкою
7	Димосос	Відцентровий вентилятор	ВЦ 14-46 №5	Контактор	Видалення продуктів згоряння
8	Регулювальна заслінка димових газів	Поворотна заслінка	DN500, фланцева, AISI 304	-	Корекція розрідження
9	Привід заслінки димових газів	Пропорційний поворотний електропривід	Siemens GCA161.1U	0–10 В	Керування положенням заслінки на димоході
10	Регулювальний газовий клапан	Електромеханічний з пропорційним керуванням	Dungs DMV-DLE 520/11 DN100 + VPM 10	0–10 В	Регулювання подачі газу до пальника
11	Електрозапальник	Іскровий	Honeywell (Satronic) ZT 931 (ZT931)	Контактор	Запалювання газу в пальнику

№	Назва виконавчого механізму	Тип / принцип дії	Модель	Сигнал керування	Призначення
12	Кнопка СТАРТ	Тактовий перемикач(не фіксується)	22мм	5 В через pull-up	Відповідний сигнал на контролер
13	Кнопка СТОП	Тактовий перемикач	22мм	5 В через pull-up	Відповідний сигнал на контролер
14	Кнопка АВАРІЯ	Тактовий перемикач	22мм	5 В через pull-up	Відповідний сигнал на контролер
15	Світлозвукова сигналізація	Світлозвукова	AD16-22SM 24V Red	24В (реле)	Сигналізація аварійного стану
16	Дисплей параметрів	LCD	20x40	I ² C	Контроль параметрів
17	Цифровий контролер	Програмованій	Arduino Mega2560	UART	Комплексне

Кнопки СТАРТ, СТОП, АВАРІЯ підключаються до цифрових входів Arduino з використанням внутрішніх підтягуючих резисторів Pull-Up. У стані спокою логічний рівень дорівнює 1, а при натисканні кнопки — пін замикається на землю, формуючи логічний 0. Такий підхід зменшує потребу у зовнішніх резисторах і спрощує монтаж.

3.2.1 Вибір регулювального клапана подачі води

У контурі регулювання рівня води в барабані парового котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ застосовується регулювальний клапан, який змінює витрату подачі живильної води відповідно до команди від ПІ-регулятора. Клапан встановлюється на живильному трубопроводі перед входом до барабана, і має забезпечувати точну пропорційну зміну витрати води відповідно до сигналу керування.

Вихідні технічні умови:

Таблиця 3.3 Вихідні технічні умови для клапана подачі води

Параметр	Значення	Джерело
Номінальна продуктивність котла	10 т/год пари	Паспорт котла ДЕ-10-14ГМ
Необхідна витрата води	10–11 м ³ /год (з урахуванням повернення конденсату)	Розрахунок згідно з режимною картою
Робочий тиск води	До 1.6 МПа (на виході насоса)	Характеристики насоса
Робоча температура води	До 100 °С	Режим роботи котла
Сигнал керування	0–10 В	Характеристики
Монтаж	На горизонтальному трубопроводі, DN50	Проектна схема трубопроводів

Розрахунок пропускної здатності (Kv):

Пропускна здатність клапана обрано на основі номінальної витрати та перепаду тиску:

$$Kv = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}} = \frac{11}{\sqrt{1}} = 11 \quad (3.1)$$

де:

- Q=11м³/год — максимальна витрата;
- ΔP=1.0бар — перепад тиску через клапан (за умовами живильної лінії);
- Kv=11— мінімально допустима пропускна здатність.

З урахуванням запасу, рекомендоване значення **Kv ≥ 12**.

Обраний пристрій:

На основі зазначених параметрів було обрано регулювальний клапан Gruner BOFB5025KB DN50 з наступними характеристиками:

- тип: кульовий клапан
- прохідний діаметр: DN50
- Kv ≈ 13
- матеріал корпусу: латунь з антикорозійним покриттям

- тиск: до 1.6 МПа
- температура: до 110 °С
- приєднання: внутрішнє різьбове або фланцеве (залежно від конфігурації)
- керування: через окремих електропривід (0–10 В)

Обрана модель забезпечує необхідну точність регулювання витрати води, має достатній запас по пропускній здатності, стійка до температури та тиску у живильному контурі. Конструкція клапана дозволяє гнучке налаштування разом із сервоприводом і забезпечує повну сумісність із рештою системи.

3.2.2 Вибір сервоприводу до клапана подачі води

Для керування положенням регулювального клапана Gruner BOFB5025KB DN50 необхідно застосувати пропорційний електропривід, що забезпечує обертання штока кульового механізму в діапазоні 0–90°. Привід повинен відповідати умовам експлуатації: приймати аналоговий сигнал 0–10 В, працювати в умовах підвищеної температури та мати достатній крутний момент для приводу клапана діаметром DN50.

Обрана модель:

Gruner 227CS-024-10 — електропривід поворотної дії з пропорційним аналоговим керуванням.

Технічні характеристики:

- живлення: 24 В АС/DC
- сигнал керування: 0–10 В
- крутний момент: 10 Н*м
- кут повороту: 90°
- час повного повороту: 60 с
- захист: IP54
- робоча температура: –10...+60 °С
- зворотний сигнал положення: 0–10 В (опціонально)

Модель Gruner 227CS-024-10 рекомендована виробником для використання з клапанами DN50–DN65 серії BOFB, що підтверджує її сумісність. Привід забезпечує плавне регулювання положення кульового механізму відповідно до аналогового сигналу. Його робочі характеристики перевищують мінімальні вимоги, що гарантує надійну і точну роботу в умовах теплового навантаження і вологого середовища.

3.2.3 Вибір живильного насосу води

Живильний насос є основним виконавчим механізмом, що забезпечує подачу води до барабана котла під необхідним тиском. У нашому випадку насос працює в режимі вкл/викл відповідно до сигналу керування, який формується системою підтримання рівня в барабані. Параметри насоса повинні забезпечувати надійну подачу необхідного об'єму води при температурі до 100 °С і тиску понад 14 бар.

Обрана модель:

Lowara 15SV10F110T — вертикальний багатоступеневий насос високого тиску, призначений для подачі чистої води в системах з високим робочим тиском.

Технічні характеристики:

- продуктивність: до 24 м³/год (в межах регулювання)
- напір: до 147.7 м
- робочий тиск: до 16 бар
- температура води: до +120 °С
- потужність двигуна: 11 кВт
- живлення: 3×400 В, 50 Гц
- матеріал: AISI 304 (нержавіюча сталь)
- приєднання: DN50, фланцеве
- захист: IP55
- маса: близько 108 кг

Обраний насос відповідає всім вимогам за напором, продуктивністю та температурними обмеженнями. Його конструкція дозволяє роботу при тривалих навантаженнях без перегріву, що особливо важливо для стабільної подачі води до барабана. Керування насосом здійснюється через пусковий пристрій (контактор).

3.2.4 Вибір вентилятора дуття

Вентилятор дуття є важливим виконавчим механізмом, що забезпечує подачу повітря до топки для горіння палива. Повітряний потік регулюється заслінкою, а сам вентилятор працює з фіксованою швидкістю, відповідно до потреб системи в максимальному надходженні повітря. Вентилятор повинен мати

достатній тиск і продуктивність, щоб забезпечити повне згоряння газу за будь-якого навантаження.

Вихідні технічні умови:

- максимальна витрата повітря — до 11 700 м³/год (з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1.3$)
- мінімальна необхідна витрата — близько 3500 м³/год (30% потужності котла)
- тиск у системі — 500–600 Па (з урахуванням опору повітряного тракту, включно з топкою, газовим трактом, фільтрами)
- спосіб керування — вмикання та вимикання через контактор
- тип живлення — трифазне, 3×400 В

Обрана модель:

ВЦ 14-46 №5 — відцентровий вентилятор з переднім загином лопаток, призначений для подачі повітря в теплові агрегати з підвищеним гідравлічним опором.

Технічні характеристики:

- продуктивність: до 13 000 м³/год
- повний тиск: до 590 Па
- потужність електродвигуна: 5.5 кВт
- оберти: 1450 об/хв
- живлення: 3×400 В
- монтаж: горизонтальний, підлоговий
- напрям обертання: правий
- матеріал виконання: сталь, захищене лакофарбове покриття

Обрана модель має запас продуктивності і тиску, що дозволяє їй працювати ефективно навіть при частковому перекритті повітряної заслінки. Вона повністю відповідає вимогам до дуттевої системи котла ДЕ-10-14ГМ та є поширеним рішенням для промислових котлів відповідної потужності.

3.2.5 Вибір повітряної заслінки

Регулювання витрати повітря до камери згоряння у даному проєкті реалізується за допомогою поворотної повітряної заслінки, розташованої після вентилятора дуття. Така конструкція дозволяє змінювати об'єм поданого повітря без зміни частоти обертів двигуна вентилятора, що спрощує управління та забезпечує стабільну роботу системи.

Вихідні технічні умови:

- витрата повітря до 11 700 м³/год (при $\alpha = 1.3$)
- мінімальна витрата не менше 3500 м³/год
- температура повітря не вище +60 °С
- тип керування — аналогове, сигнал 0–10 В
- тип монтажу — в каналі перед подачею до топки
- форма перерізу кругла або прямокутна (стандарт каналу вентилятора);

Обрана модель:

Вентс КРВ 400 — регульовальна поворотна заслінка для систем вентиляції з високою продуктивністю.

Технічні характеристики:

- тип: поворотна, одностулкова
- діаметр: 400 мм
- матеріал: оцинкована сталь
- температура експлуатації: –30...+80 °С
- кріплення: фланцеве
- привід: зовнішній, сумісний з аналоговим керуванням

Обрана заслінка відповідає перерізу дуттєвого каналу, не створює надлишкового опору та дозволяє точно дозувати подачу повітря. Вона розрахована на роботу з повітрям при температурах, характерних для дуттєвих систем котлів, і має достатню механічну міцність для тривалого використання.

3.2.6 Вибір сервоприводу до повітряної заслінки

Поворотна заслінка, встановлена на лінії подачі повітря до камери згоряння, вимагає приводу, здатного забезпечити точне позиціонування в усьому діапазоні від 0 до 90°. Керування здійснюється сигналом 0–10 В. Привід має забезпечувати достатній крутний момент для повороту заслінки діаметром 400 мм, працювати в безперервному режимі та відповідати температурним умовам монтажу поблизу вентилятора.

Вихідні технічні умови:

- керуючий сигнал — 0–10 В (аналоговий);
- живлення — 230 В АС;
- температура довкілля — до +50 °С;

- монтаж — зовнішній, на фланці заслінки;
- кут повороту — 90°;
- тривалість роботи — безперервна;
- сумісність — з моделлю заслінки Вентс КРВ 400.

Обрана модель:

Siemens GCA161.1U — електропривід для повітряних і димових заслінок з функцією пропорційного керування та зворотною пружиною.

Технічні характеристики:

- тип: поворотний електропривід
- крутний момент: 18 Н*м
- живлення: 24 В АС/DC
- керування: 0–10 В
- час повного повороту: 90 с
- температура експлуатації: –32...+55 °С
- функція повернення: є (механічна пружина)
- індикація: шкала положення
- ступінь захисту: IP54

3.2.7 Вибір димососа

Димосос відповідає за видалення продуктів згоряння з камери топки, забезпечуючи необхідне розрідження в газоході та стабільну тягу в системі. У нашому проекті димосос працює в постійному режимі, без регулювання швидкості. Його вибір повинен забезпечити надійне видалення димових газів в обсязі, що відповідає максимально можливій витраті палива, а також подолання аеродинамічного опору газоходу.

Вихідні технічні умови:

- об'єм газів на виході — до 9500 м³/год (за максимального навантаження)
- довжина газоходу — до 5 м
- температура газів — не більше 250 °С
- тип живлення — 3×400 В
- вимога до монтажу — підлогове горизонтальне встановлення

Обрана модель:

ВЦ 14-46 №5 — промисловий відцентровий димосос, призначений для видалення газів із котельних установок середньої потужності.

Технічні характеристики:

- продуктивність: до 13 000 м³/год
- повний тиск: до 590 Па
- діаметр робочого колеса: 500 мм
- оберти: 1450 об/хв
- електродвигун: 5.5 кВт
- тип живлення: 3×400 В
- напрям обертання: правий
- конструкція: сталь, пофарбована, привід через муфту або жорстке з'єднання
- монтаж: підлоговий, горизонтальний

Обрана модель має достатній запас як по витраті, так і по тиску, що дозволяє забезпечити надійне розрідження навіть при несприятливих умовах. Димосос сумісний із типовими фланцевими підключеннями та дає можливість встановлення додаткових елементів (заслінки, датчики, глушники). Його робота стабільна в широкому діапазоні навантажень, що робить його придатним для експлуатації в складі нашого котлоагрегата.

3.2.8 Вибір регулювальної заслінки димових газів

Оскільки димосос у нашій системі працює без частотного регулювання, для тонкого коригування тяги та об'єму димових газів передбачено встановлення регулювальної заслінки на виході перед димососом. Це дає змогу впливати на створюване розрідження в топці, не змінюючи швидкість обертання вентилятора. Заслінка має забезпечувати надійну герметизацію, бути стійкою до високих температур і не створювати турбулентності, що впливають на ефективність видалення димових газів.

Вихідні технічні умови:

- об'ємна витрата димових газів — до 9500 м³/год
- температура газів — до 250 °С
- тиск перед заслінкою — до 600 Па
- тип монтажу — фланцеве з'єднання на круглий патрубок
- спосіб керування — аналоговий сигнал 0–10 В (через сервопривід)
- робоче середовище — продукти згоряння природного газу

Обрана модель:

Поворотна заслінка DN500, виконана з жаростійкої сталі AISI 304, з фланцевим приєднанням і можливістю встановлення електроприводу з аналоговим керуванням.

Технічні характеристики:

- тип: поворотна
- діаметр: 500 мм
- температура робочого середовища: до 600 °С
- тиск: до 10 кПа (із запасом)
- матеріал: корпус та диск — AISI 304
- ущільнення: термостійке, графітове або метал-метал
- приєднання: фланцеве (DIN)
- монтажне положення: горизонтальне або вертикальне

Ця заслінка є стандартним елементом регулювання потоку в промислових димових каналах. Вона дозволяє точно обмежити витрату газів без порушення основного потоку і є ідеальним рішенням у випадку, коли димосос працює з постійною продуктивністю. Разом із сервоприводом (розглядається у наступному підпункті) вона забезпечує плавне позиціонування заслінки та автоматизовану інтеграцію в контур підтримання розрідження.

3.2.9 Вибір сервоприводу до заслінки димових газів

Для забезпечення автоматичного регулювання положення заслінки на виході димових газів необхідно застосувати електропривід поворотного типу з можливістю прийому аналогового сигналу 0–10 В. Привід має забезпечити надійне позиціонування заслінки діаметром 500 мм у всьому робочому діапазоні та витримувати підвищену температуру навколишнього середовища (через близькість до димоходу), а також аварійно повертати заслінку в базове положення при зникненні сигналу.

Вихідні технічні умови:

- діаметр заслінки — 500 мм
- керуючий сигнал — 0–10 В (аналоговий)
- кут повороту — 90°
- необхідний момент — не менше 15 Н*м
- живлення — 24 В AC/DC

- робоча температура — до +60 °C
- додаткові вимоги — аварійне повернення (зворотна пружина)

Обрана модель:

Siemens GCA161.1U — електропривід для повітряних і димових заслінок з функцією пропорційного керування та зворотною пружиною.

Технічні характеристики:

- тип: поворотний електропривід;
- крутний момент: 18 Н*м;
- живлення: 24 В AC/DC
- керування: 0–10 В
- час повного повороту: 90 с
- температура експлуатації: –32...+55 °C
- функція повернення: є (механічна пружина)
- індикація: шкала положення
- ступінь захисту: IP54

Цей привід забезпечує надійну і точну роботу в умовах підвищеної температури та має усі необхідні функції для інтеграції в систему автоматизації. Його використання в парі з заслінкою димового каналу дозволяє точно налаштувати тягу в топці шляхом контролю розрідження без зміни швидкості димососа.

3.2.10 Вибір газового клапану

Регулювання подачі газу визначає теплову потужність, стійкість полум'я і величину тиску пари. У нашому проєкті потрібен пристрій, що забезпечить як повний потік при пікових навантаженнях, так і точне пропорційне регулювання у динамічних режимах.

Для цього обрано електромеханічний клапан Dungs DMV-DLE 520/11 DN100 з модулем VPM 10. Така конфігурація дозволяє здійснювати плавне керування за аналоговим сигналом 0–10 В, що сумісне з Arduino через відповідний підсилювач ШІМ. Пристрій витримує навантаження до 750 м³/год, що повністю покриває максимальну витрату газу котла (≈700 м³/год), не створюючи значного перепаду тиску.

Клапан DMV-DLE працює у двоступеневому режимі: основне відкриття та точне дозування. Модуль VPM 10 виконує функцію виконавчого контролера,

забезпечуючи стабільність положення та аварійне відсічення при зникненні сигналу або живлення.

Основні параметри:

- максимальна витрата: до 750 м³/год
- робочий тиск: до 0.5 МПа
- керуючий сигнал: 0–10 В DC
- ступінь захисту: IP54

Клапан Dungs DMV-DLE 520/11 з VPM 10 забезпечує високу пропускну здатність, точне регулювання подачі газу та вбудовані засоби безпеки. Він відповідає вимогам до стабільної та безпечної роботи пальникового пристрою в автоматизованому режимі.

3.2.11 Вибір електрозапальника

Для надійного розпалу газоповітряної суміші використовується іскровий електрозапальник з високовольтним трансформатором. Основна вимога до пристрою — стабільна генерація іскри з частотою не менше 20 Гц і здатність працювати в умовах підвищеної температури поблизу топки.

Обрана модель Honeywell (Satronic) ZT 931 відповідає вимогам за електричними параметрами, має компактні габарити, стандартне кріплення та сумісна з типовими пальниками[14]. Вивід жаростійкого електрода здійснюється через окремий люк спостереження, а сам модуль розміщується поза гарячою зоною топки.

Основні характеристики:

- тип: іскровий трансформатор запалювання
- напруга виходу: до 15 кВ
- частота іскри: ≈ 20 Гц
- живлення: 230 В AC
- розташування: поза топкою, з виводом електрода через термостійкий кабель

Забезпечує якісну, потужну іскру навіть при високому тиску або інтенсивному повітряному потоці.

Сумісний з типовими конфігураціями газових паливних систем і легко монтується під контрольним боксом пальника.

Honeywell ZT 931 забезпечує швидкий і стабільний запуск полум'я, має високий ресурс і може бути легко інтегрований у схему автоматизації.

3.2.12 Вибір пристрою сигналізації

Для сигналізації аварійного стану використано комбінований світлозвуковий пристрій, що подає візуальний і звуковий сигнали одночасно. Такий підхід забезпечує оперативне інформування персоналу незалежно від умов освітлення або шуму в котельному приміщенні.

Обрана модель AD16-22SM 24V Red — це світлозвуковий індикатор з живленням 24 В DC, що керується через вихід реле. Вона сумісна з більшістю систем автоматизації, має компактну конструкцію та стандартний розмір 22 мм для встановлення в щит керування.

Основні характеристики:

- тип: комбінований світлозвуковий сигналізатор
- колір: червоний
- звуковий тиск: ≥ 85 дБ
- живлення: 24 В DC
- монтаж: отвір $\varnothing 22$ мм
- інтерфейс: керування через вихід реле Arduino
- застосування: аварійна індикація в системі керування котлом

Пристрій AD16-22SM дозволяє надійно та чітко сигналізувати про спрацювання аварійного алгоритму, відповідає стандартам промислової безпеки й оптимально інтегрується у щит керування котлоагрегатом.

3.2.13 Вибір мікроконтролера для реалізації логіки автоматизації

У даному проєкті в якості центрального контролера обрано **Arduino Mega 2560**[9]. Вибір обумовлений специфікою об'єкта автоматизації — парового котлоагрегату ДЕ-10-14ГМ, який потребує одночасного зчитування численних аналогових та цифрових сигналів, реалізації керуючої логіки, формування PWM-сигналів для виконавчих механізмів, а також передачі даних до SCADA-системи.

Arduino Mega має значну кількість вхідних/вихідних ліній:

- 54 цифрових входи/виходи, з яких 15 можуть працювати як PWM-виходи;
- 16 аналогових входів, що дозволяє зчитувати сигнали з датчиків рівня, тиску, температури тощо без необхідності у зовнішньому мультиплексорі;
- 4 апаратні послідовні порти UART, що особливо важливо для інтеграції з SCADA через Serial-підключення.

До переваг використання Arduino Mega також належить підтримка роботи з дисплеями через інтерфейс I²C без потреби у розширенні кількості портів. Відкрита архітектура та велика спільнота користувачів спрощують процес розробки, налагодження та тестування системи. Контролер легко програмується через зручне середовище Arduino IDE, що дозволяє оперативно вносити зміни до логіки керування. Крім цього, Arduino Mega підтримує формування PWM-сигналів, що використовуються у даному проєкті для керування модулями перетворення сигналу 0–10 В, через які реалізується керування аналоговими виконавчими механізмами.

Усі вхідні сигнали, що використовуються у схемі (аналогові датчики з виходом 4–20 мА через шунти, цифрові входи, температурні датчики, інфрачервоні датчики полум'я тощо), можуть бути оброблені безпосередньо Arduino Mega, що спрощує загальну архітектуру проєкту.

Враховуючи реальну кількість необхідних входів/виходів, стабільну роботу та гнучкість при модифікації логіки, Arduino Mega повністю задовольняє вимоги до апаратної платформи автоматизації.

3.3 Вибір електротехнічної складової

3.3.1 Вибір засобів живлення системи автоматизації

Система автоматизації котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ включає одночасну роботу як силових виконавчих механізмів, так і мікропроцесорної логіки, що потребує організації багаторівневої системи живлення з різними класами напруг.

Основні рівні напруги, що використовуються в проєкті:

Таблиця 3.3 Рівні напруги

Напруга	Тип струму	Основні споживачі	Джерело або спосіб формування
400 В АС	Трифазний	Двигуни вентилятора дуття, насоса, димососа	Зовнішня трифазна мережа, автоматичні вимикачі QF
230 В АС	Однофазний	Електрозапальник, живлення БЖ 24В	Однофазна мережа 230 В, через УЗО QDF
24 В DC	Постійний	Електроприводи заслінок, логічні реле, світлозвукова сигналізація, частина датчиків	Блок живлення Mean Well NDR-240-24
9 В DC	Постійний	Контролер Arduino Mega (через вхід VIN)	UBEC-модуль із живленням від 24 В
5 В DC	Постійний	Датчики (MAX6675, YG1006), І ² С-дисплеї, малопотужна логіка	UBEC-модуль із живленням від 24 В та Arduino

Mean Well NDR-240-24— імпульсний блок живлення на DIN-рейку, забезпечує стабільну напругу 24 В для всієї низьковольтної периферії, з номінальним струмом до 10 А[15].

UBEC (Matek Micro BEC) — перетворює 24 В на 9 В для живлення Arduino Mega через VIN, та перетворює 24 В на 5В для живлення чутливих цифрових елементів, уникаючи перегріву Arduino. Постачаються по 3шт та всі можуть працювати і в режимі 5В і в режимі 9В[8].

Мережеве живлення 400/230 В — безпосередньо подається на електродвигуни та блок живлення через автоматичні вимикачі та контактори.

3.3.2 Вибір засобів захисту живлення

Таблиця 3.4 Рівні захисту системи та реалізовані засоби

Рівень захисту	Область дії	Реалізовані засоби
Захист від струмів витоку	Весь щит живлення 230/400 В	Пристрої захисного вимкнення (УЗО\QDF)
Захист від короткого замикання	Силові кола двигунів, живлення БЖ	Автоматичні вимикачі QF1–QF4
Тепловий захист двигунів	Двигуни вентилятора, насоса, димососа	Теплові реле КК1–КК3
Захист від імпульсних перенапруг	24 В	Варистор RV1

Опис реалізованих методів захисту

- 1) Загальний мережевий захист реалізовано через пристрої захисного вимкнення (УЗО) типу АС, які встановлюються на вході щита. Вони забезпечують відключення у разі струмів витоку понад 30 мА, 100 мА відповідно, що є стандартом для захисту персоналу від ураження електричним струмом та захисту від пожеж.

Диференційні вимикачі QDF1–QDF3 (для двигунів 3×400 В)

- Модель: **ABB F204AC-40/0.1**
- Тип: АС
- Номінальний струм: **40 А**
- Струм спрацювання: **100 мА**
- Призначення: захист від струмів витоку у трифазних колах з потужними електродвигунами

Застосування УЗО з струмом спрацювання 100 мА дозволяє уникнути помилкових спрацювань під час пуску електродвигунів, зберігаючи при цьому загальну безпеку експлуатації.

Диференційний вимикач (QDF4)

- Модель: **Schneider Electric A9R41225** (Acti9 iID)
- Тип: А
- Номінальний струм: 6 А
- Струм спрацювання: 30 мА
- Призначення: захист від струмів витоку та ураження електричним струмом
- Переваги: стійкість до імпульсних навантажень від електрозапальника

2) Автоматичні вимикачі (QF1–QF3) призначені для захисту окремих силових ліній: двигуна димососа, вентилятора дуття та живильного насоса. Вони розраховані на струм 16 А та мають характеристику С, що забезпечує відсіч у разі короткого замикання або перевантаження.

Автоматичні вимикачі QF1–QF3 (двигуни 3×400 В)

1. QF1 (насос Lowara 15SV10F110T, 11 кВт)
 - Модель: **Schneider Electric A9F78325**
 - Тип: С
 - Номінальний струм: **25 А**
 - Вимикаюча здатність: 6 кА
2. QF2, QF3 (вентилятор дуття та димосос, двигуни 5.5 кВт)
 - Модель: **Schneider Electric A9F78316**
 - Тип: С
 - Номінальний струм: **16 А**
 - Вимикаюча здатність: 6 кА

Автоматичний вимикач QF4 захищає однофазне живлення.

Автоматичний вимикач (QF4)

- Модель: **Schneider Electric A9F74104**
- Тип: С
- Номінальний струм: 4 А
- Вимикаюча здатність: 4.5 кА
- Призначення: захист від коротких замикань та перевантаження

3) Теплові реле (КК1–КК3) підключені послідовно з контакторами відповідних двигунів. Вони реагують на тривале перевищення струму, викликане, наприклад, механічним заклинюванням. При спрацюванні реле розривають коло керування контактором.

Теплові реле КК1–КК3

- КК1 (насос 11 кВт, $I_n \approx 18.7$ А)
 - Модель: **Schneider Electric LRD21**
 - Діапазон струму спрацювання: 12–18 А
- КК2, КК3 (вентилятор дуття та димосос, по 5.5 кВт, $I_n \approx 9.34$ А)
 - Модель: **Schneider Electric LRD16**
 - Діапазон струму спрацювання: 9–13 А

4) Варистор S10K30 (RV1) встановлений на вході живлення 24 В DC. Він виконує функцію захисту від імпульсних перенапруг, які можуть виникнути внаслідок грозових розрядів або комутаційних процесів. При перевищенні порогової напруги варистори миттєво знижують свій опір, відводячи надлишкову енергію та запобігаючи пошкодженню блоку живлення й електронних компонентів системи.

Варистор (RV1)

- Модель: **EPCOS S14K60**
- Номінальна напруга: 60 В
- Напруга спрацювання: ~ 100 В
- Імпульсний струм спрацювання: до 4500 А
- Призначення: захист виходу блоку живлення 24 В від імпульсних перенапруг і комутаційних перешкод

РОЗДІЛ 4 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розробка електричної принципової схеми системи автоматизації

Електрична принципова схема системи автоматизації котлоагрегату ДЕ-10-14ГМ побудована на основі контролера Arduino Mega та охоплює два основні контури: силовий та керування. Вона відображає логіку підключення основних виконавчих механізмів, первинних перетворювачів, засобів захисту та інтерфейсів обміну даними.

Загальна структура схеми

Схема складається з наступних функціональних блоків:

1. Контур силового живлення двигунів — включає автоматичні вимикачі QF1, QF2, QF3, контактори КМ1–КМ3, теплові реле КК1–КК3 та двигуни М1–М3. Додатковий захист усієї силової частини реалізований через диференційні вимикачі QDF1–QDF3, які забезпечують захист від струмів витоку та підвищують рівень електробезпеки.
2. Контур живлення системи автоматизації — реалізований через блок живлення на DIN-рейці (24 В), з вбудованим варистором для захисту, та подальшим розгалуженням на стабілізовані лінії 9 В і 5 В для живлення мікроконтролера та слаботочних пристроїв. Стабілізатори DC/DC забезпечують необхідні рівні напруги для різних модулів (датчики, дисплеї, логіка). Живлення 230 В подається безпосередньо до блоку живлення, а також до електрозапальника, який вимагає змінної напруги для створення високовольтного імпульсу запалювання.
3. Контур керування — побудований на основі Arduino Mega. Для підключення дисплеїв (LCD) використано I²C-інтерфейс (пін D20, D21), цифрові та аналогові входи (A0–A8, D2–D32) застосовуються для зчитування даних з датчиків і подачі сигналів керування на виконавчі пристрої. Для забезпечення сумісності термопари з Arduino застосовано спеціалізований модуль MAX6675, який виконує перетворення сигналу термопари типу К у цифровий формат. У нашій реалізації цей модуль підключений до пінів D52 (SCK), A2 (CS) та D50 (SO), як це визначено у коді програми. Бібліотека MAX6675 дозволяє вказати будь-який пін для керування вибором пристрою.
4. Контур захисту — до цього блоку віднесено всі захисні елементи, незалежно від їх розміщення у схемі живлення або керування. До нього

належать: диференційні вимикачі QDF1–QDF3 (тип АС, 100 мА, 40 А), які захищають силову частину від струмів витоку, теплові реле КК1–КК3, що забезпечують захист від перевантаження двигунів, автоматичні вимикачі QF1–QF3 для загального захисту силових ліній, та QDF4, який виконує функцію захисту логічної частини й обслуговуючого персоналу. Окремо встановлено автомат QF4 для живлення 230В.

5. Система керування виконавчими механізмами — керування двигунами реалізовано через реле КМ1–КМ3, керування електрозапальником та сигналізацією через КМ4 і КМ5 відповідно. Електромагнітні клапани, регульовальні приводи отримують сигнал керування через перетворювачі (DAS, тобто ЦАП) PWM → 0–10 В. Дисплеї (LCD) використовуються для локального виведення значень основних параметрів та підключаються до Arduino через інтерфейс I²C із живленням від стабілізованої лінії 5 В.

Усі малопотужні компоненти (датчики, дисплеї, логіка) живляться від окремих стабілізованих джерел (5 В і 9 В), підключених до 24 В лінії через DC/DC-перетворювачі.

Резистори на 250 Ом використовуються для перетворення сигналів 4–20 мА у напругу для зчитування Arduino (через аналогові входи).

Розроблена ЕП-схема забезпечує надійне та розділене живлення силових і логічних ланцюгів, дозволяє реалізувати керування всіма основними механізмами котла та забезпечує контроль параметрів за допомогою Arduino Mega. Вона забезпечує захист від перевантажень і струмів витоку.

4.2 Розробка схеми електричних з'єднань

На передній панелі розміщено органи оперативного управління: кнопки керування (SB1–SB3), світлодіодні індикатори, автоматичні вимикачі QF1–QF4, а також комбінований світлозвуковий сигналізатор. Ці елементи забезпечують базовий інтерфейс взаємодії оператора з системою та первинний захист кола живлення.

Задня панель виконує основну функцію комутації та розподілу живлення. На ній розміщено блок живлення БЖ1, модулі реле (R1–R8), теплові реле (КК1–КК3), силові пускачі (КМ1–КМ3), драйвери DAS та інші допоміжні вузли. Усі з'єднання між логічними сигналами керування від контролера Arduino та виконавчими механізмами реалізовано через відповідні комутаційні елементи.

Бічна панель використовується для розміщення клемників ХТ1, ХТ2 та ХТ3, які забезпечують вихідні підключення до зовнішніх пристроїв. Кожен клемник структурно поділений за функціональним призначенням: окремо для силового живлення, сигналів керування та живлення не силових пристроїв.

4.3 Розробка схеми електричних підключень

Схема підключень відображає фізичні зв'язки між приладами, встановленими в щиті керування, і зовнішніми системами — зокрема щитом живлення, двигунами, первинними перетворювачами, сервоприводами та сигнальними лініями.

Усі з'єднання виконані через клемні затискачі, згруповані по трьох панелях (ХТ1, ХТ2, ХТ3). На схемі показано підключення кожного елемента до відповідної клеми, а також умовне об'єднання провідників одного типу (наприклад, живлення 24 В або GND) у спільну магістраль для зручності читання зображення. Такі магістралі формуються графічно з метою підвищення читабельності, але логічно відповідають підключенню до визначених клемних точок у щиті живлення (ЩЖ).

Окремо виведено клеми для:

- живлення 230 В АС та 400 В АС
- постійного живлення 24 В, 9 В, 5 В
- спільної землі GND
- захисного заземлення РЕ

Усі споживачі живлення підключаються до відповідних клем на стороні щита керування, звідки об'єднані магістралі подаються до щита живлення. Підключення захисного заземлення (РЕ) виконано окремо через виділену клемну шину.

Список обладнання на схемі містить як унікальні позначення за ФСА (наприклад, ТЕ-1, РТ-1, FT-2), так і позначення типу приладу та, за потреби, модельні назви. Це забезпечує узгодженість між схемами електропідключення, функціональною схемою автоматизації та структурною схемою електричного живлення.

РОЗДІЛ 5 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ

5.1 Математичне моделювання об'єкта регулювання тиску пари

Одним з основних параметрів, які підлягають регулюванню в системі автоматизації котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ, є тиск насиченої пари у барабані. Цей параметр безпосередньо визначає ефективність теплообміну, стабільність роботи технологічного процесу та безпеку системи. У рамках даного проєкту регулювання здійснюється шляхом зміни подачі природного газу до пальника.

Початкові умови та фізична суть процесу

Процес регулювання тиску пари ґрунтується на зміні теплоти, що надходить до водогрійної частини котла, та викликає випаровування води в екранних трубах. Зі збільшенням подачі палива зростає кількість теплоти, що спричиняє зростання об'єму пари та відповідно — тиску в паровому просторі барабана. Зменшення подачі палива, навпаки, призводить до зниження інтенсивності випаровування й падіння тиску.

З урахуванням великої інерційності теплообміну та затримки у відповідній реакції пари, об'єкт має характеристики аперіодичної ланки першого порядку із запізненням.

Визначення робочого діапазону

За паспортом котла ДЕ-10-14ГМ:

- номінальна продуктивність — 10 т/год або 2.78 кг/с;
- робочий тиск — 1.0–1.4 МПа;
- температура насиченої пари — близько 194 °С;
- живильна вода подається при ≈ 100 °С;
- потужність пальника — ≈ 6.9 МВт;
- тип палива — природний газ.

Система працює у режимі змінної продуктивності від 30 % до 100 %, що еквівалентно зміні подачі газу від 213 до 710 м³/год. При цьому тиск пари коливається в межах 1.0–1.4 МПа, отже робочий діапазон тиску складає:

$$\Delta P = 1.4 - 1.0 = 0.4 \text{ МПа} \quad (5.1)$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення

Згідно з моделюванням та теплотехнічними даними, приріст тиску на 0.4 МПа спостерігається при збільшенні подачі газу з 0 % до 100 %, тобто:

$$\Delta u = 100 \%$$

Звідси коефіцієнт підсилення:

$$K = \Delta P / \Delta u = 0.4 / 100 \approx 0.004 \text{ МПа на } 1 \% \text{ подачі газу (5.2)}$$

Це означає, що кожен 1 % відкриття регулювального клапана дає приріст тиску приблизно на 0.004 МПа.

Оцінка інерційності об'єкта

Для визначення часової постійної системи розглядалася модель теплового накопичення у паровому об'ємі. Відомо, що:

- маса пари в барабані ≈ 6.3 кг;
- теплоємність насиченої пари — близько 2100 Дж/(кг·К);
- потужність пальника — 6.9 МВт.

Орієнтовний час нагріву парового об'єму на ΔT , що відповідає 0.4 МПа тиску ($\approx 10\text{--}15$ °С), становить приблизно 180 с.

З урахуванням інерційності теплообміну, площі нагріву та властивостей трубок, стала часу (τ) об'єкта визначена емпірично та узгоджена з результатами моделювання:

$$T = 60 \text{ с}$$

Запізнення системи

Окрім теплової інерційності, система має виражене запізнення реакції — час, що проходить між зміною подачі палива і появою помітного ефекту у вигляді зростання тиску. Це пов'язано із запізненням займання, передачі тепла через трубні стінки, інерцією маси пари.

За результатами експериментального моделювання в Simulink встановлено:

$$L = 5.64 \text{ с}$$

Передатна функція об'єкта

З урахуванням вищенаведених значень, передатна функція об'єкта регулювання тиску пари в барабані набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{0.004}{60*s+1} * e^{(-5.64s)} \quad (5.3)$$

де:

- 0.004 — підсилення (МПа/1 %);
- 60 с — стала часу об'єкта;
- 5.64 с — запізнення реакції.

5.2 Синтез ПІ-регулятора для тиску пари

Завданням даного підпункту є розрахунок та перевірка ПІ-регулятора для автоматичного підтримання тиску насиченої пари у барабані котлоагрегата ДЕ-10-14ГМ у межах заданого робочого діапазону. Синтез здійснюється на основі математичної моделі, отриманої у п. 4.1, з урахуванням фізичних характеристик об'єкта.

Вихідні передумови

Передатна функція об'єкта згідно формулі (5.3):

$$W(s) = \frac{0.004}{60 * s + 1} * e^{(-5.64s)}$$

Керувальна дія: подача газу у відсотках (0–100 %)

Вихід: тиск пари в МПа

Діапазон регулювання тиску: 1.0–1.4 МПа

Робоча зона: 30–100 % потужності пальника.

Вибір методу налаштування

Враховуючи наявність значного запізнення ($L = 75$ с), для синтезу регулятора приймається емпіричний підхід, який дозволяє підібрати параметри ПІ-регулятора, орієнтуючись на бажану поведінку системи (стабільність, відсутність перерегулювання, прийнятний час встановлення).

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора

Пропорційна складова:

Підсилення об'єкта становить:

$$K = 0.004 \text{ МПа/1 \%}$$

Звідси:

$$K_p = 1 / K = 1 / 0.004 \approx 175.1 \text{ (\% / МПа)} \quad (5.4)$$

Інтегральна складова:

У нашому випадку:

$$T_i = 18.6 \text{ с}$$

Передатна функція ПІ-регулятора

ПІ-регулятор описується передатною функцією у вигляді:

$$W_{PI}(s) = K_p \cdot (1 + 1 / (T_i \cdot s)) \quad (5.5)$$

Після підстановки параметрів отримаємо:

$$W_{PI}(s) = 175.1 \cdot (1 + 1 / (18.6 \cdot s)) \quad (5.6)$$

де:

$K_p = 175.1$ (% / МПа) — коефіцієнт підсилення,

$T_i = 18.6$ — час інтегрування.

Реалізація в Simulink

Схема моделювання складається з наступних компонентів:

Step — задання уставки тиску (наприклад, перехід з 1.2 до 1.3 МПа);

Sum — розрахунок похибки (уставка – зворотній зв'язок);

ПІ-регулятор — реалізований з $K_p = 175.1$, $T_i = 18.6$;

Передатна функція об'єкта — $0.004 / (18.6s + 1)$;

Transport Delay — запізнення 5.64 с;

Saturation — обмеження виходу 0–100 %;

Scope — візуалізація тиску та керуючого сигналу.

Масштабування та обґрунтування діапазону

Модель об'єкта описує зміну тиску пари у відносному діапазоні 0–0.4 МПа. Для приведення результатів до реального діапазону використовується зсувне перетворення:

$$P_{\text{вихід}} = P_{\text{модель}} + 1.0$$

Таким чином, якщо в результаті моделювання отримано значення $P_{\text{модель}} = 0.3$ МПа, то фактичний тиск пари становить:

$$P_{\text{вихід}} = 0.3 + 1.0 = 1.3 \text{ МПа}$$

Вхідний сигнал Step у моделі також подається у фізичних одиницях — без масштабування, наприклад як 1.2, 1.3 МПа тощо. Це дозволяє одразу порівнювати результати моделювання з паспортними даними та технічними вимогами до об'єкта.

Результати моделювання

- Система стабільна в межах 1.0–1.4 МПа.
- Реакція на зміну уставки плавна, без осциляцій та перерегулювання.
- Повний час встановлення: ~ 5 хв (з урахуванням фізичного запізнення).
- Вихідний сигнал регулятора логічний — наприклад, при похибці 0.1 МПа дається $\approx 17.5\%$ подачі.

5.3 Побудова математичної моделі системи підтримання рівня води в барабані

Рівень води в барабані парового котла є критично важливим параметром, підтримка якого в межах допустимих значень необхідна для безпечної та ефективної експлуатації агрегату. При зниженні рівня існує ризик перегріву парових труб, а при підвищенні — виносу води з паром до споживачів. У рамках цього проєкту рівень регулюється шляхом зміни витрати живильної води, що подається через керований клапан.

Для побудови динамічної моделі розглянемо залежність зміни рівня води від різниці між подачею води та її витратою в процесі пароутворення.

Вихідні технічні дані

Площа дзеркала води в барабані (S) $\approx 0.785 \text{ м}^2$ (за діаметром 1 м)

Максимальна витрата живильної води: $15 \text{ м}^3/\text{год} = 0.00417 \text{ м}^3/\text{с}$

Мінімальна витрата пари при навантаженні 30 %: $\approx 0.00114 \text{ м}^3/\text{с}$

Робочий рівень: 0.5 м

Допустимий діапазон зміни рівня: 0.3–0.8 м ($\Delta h = 0.5$ м)

Розрахунок коефіцієнта підсилення

Максимальна швидкість підйому рівня води при повному відкритті клапана (100 %) обчислюється за формулою:

$$dh/dt = Q_{вх} / S \quad (5.7)$$

де:

$Q_{вх} = 0.00417 \text{ м}^3/\text{с}$ — витрата живильної води при 100 % відкритті клапана,

$S = 0.785 \text{ м}^2$ — площа дзеркала води у барабані.

Підставимо значення:

$$dh/dt = 0.00417 / 0.785 \approx 0.00531 \text{ м/с} \quad (5.8)$$

Тоді коефіцієнт підсилення, що відображає зміну рівня на 1 % відкриття клапана:

$$K = 0.00531 / 100 = 0.0000531 \text{ м/с на 1 \% подачі води} \quad (5.9)$$

Визначення сталої часу

Рівень води у барабані повинен змінюватися в межах 0.3–0.8 м, тобто на $\Delta h = 0.5$ м. З урахуванням розрахованої максимальної швидкості підйому рівня води при повному відкритті клапана (100 %) — приблизно 0.00531 м/с — час, необхідний для досягнення цього рівня, становить:

$$t = 0.5 / 0.00531 \approx 94.2 \text{ с} \quad (5.10)$$

Для системи першого порядку, що описується аперіодичною ланкою, типова стала часу (T) визначається як приблизно третина від повного часу реакції. Таким чином:

$$T \approx 94.2 / 3 \approx 31.4 \text{ с} \quad (5.11)$$

З огляду на наявність додаткових гідравлічних інерцій, коливань у подачі води та механічних затримок у клапані, для подальших розрахунків приймається округлене значення:

$$T = 37.7 \text{ с}$$

Передатна функція

Поведінка рівня води в реакції на зміну подачі описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{(T*s+1)} \quad (5.12)$$

Після підстановки параметрів маємо:

$$W(s) = \frac{0.0000531}{(37.7*s+1)} \quad (5.13)$$

де:

вхід — % відкриття клапана подачі води;

вихід — рівень води у метрах.

Ця передатна функція надалі використовується для синтезу ПІ-регулятора.

5.4 Синтез ПІ-регулятора для рівня води в барабані

Для забезпечення надійного та безпечного функціонування парового котлоагрегата необхідно підтримувати рівень води в барабані в межах допустимого діапазону. Регулювання цього параметра здійснюється шляхом зміни витрати живильної води через керування регулювальним клапаном. У цьому підпункті проведено синтез ПІ-регулятора, який забезпечує стабільну підтримку рівня з урахуванням динаміки об'єкта, описаної у п. 4.3.

Передатна функція об'єкта

За результатами моделювання та фізичних розрахунків, передатна функція, що описує зміну рівня води у барабані в реакції на зміну витрати подачі води, згідно формулі (5.13) має вигляд:

$$W(s) = \frac{0.0000531}{(37.7*s+1)}$$

де:

вхід — % відкриття регулювального клапана (0–100 %),

вихід — рівень води у барабані, м.

Вибір методу налаштування

Для синтезу ПІ-регулятора застосовано метод обернення підсилення (inverse gain tuning), що забезпечує зрозумілу залежність між похибкою рівня і керуючим сигналом. Параметри інтегрування визначаються на основі сталої часу об'єкта.

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора

Коефіцієнт підсилення об'єкта:

$$K = 0.0000531 \text{ (м/1 \%)}$$

Пропорційна складова регулятора:

$$K_p = 1 / K = 1 / 0.0000531 \approx 18\,833 \text{ (\% на 1 м похибки)} \quad (5.14)$$

Час інтегрування регулятора приймається рівним сталі часу об'єкта:

$$T_i = 37.7 \text{ с}$$

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(s) = 18833 \cdot (1 + 1 / (37.7 \cdot s)) \quad (5.15)$$

де:

- 18833 — коефіцієнт підсилення регулятора (%/м),
- 37.7 с — час інтегрування.

Реалізація в Simulink

Модель регулювання реалізовано в середовищі Simulink:

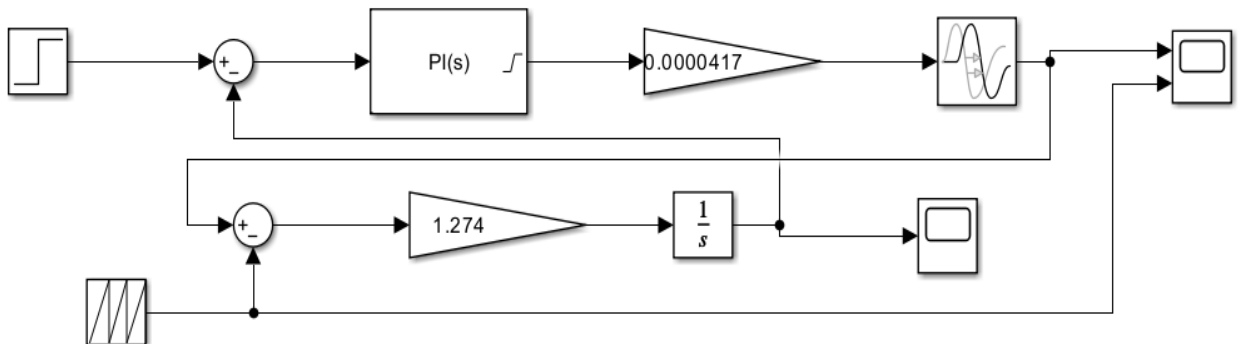


Рис. 5.1

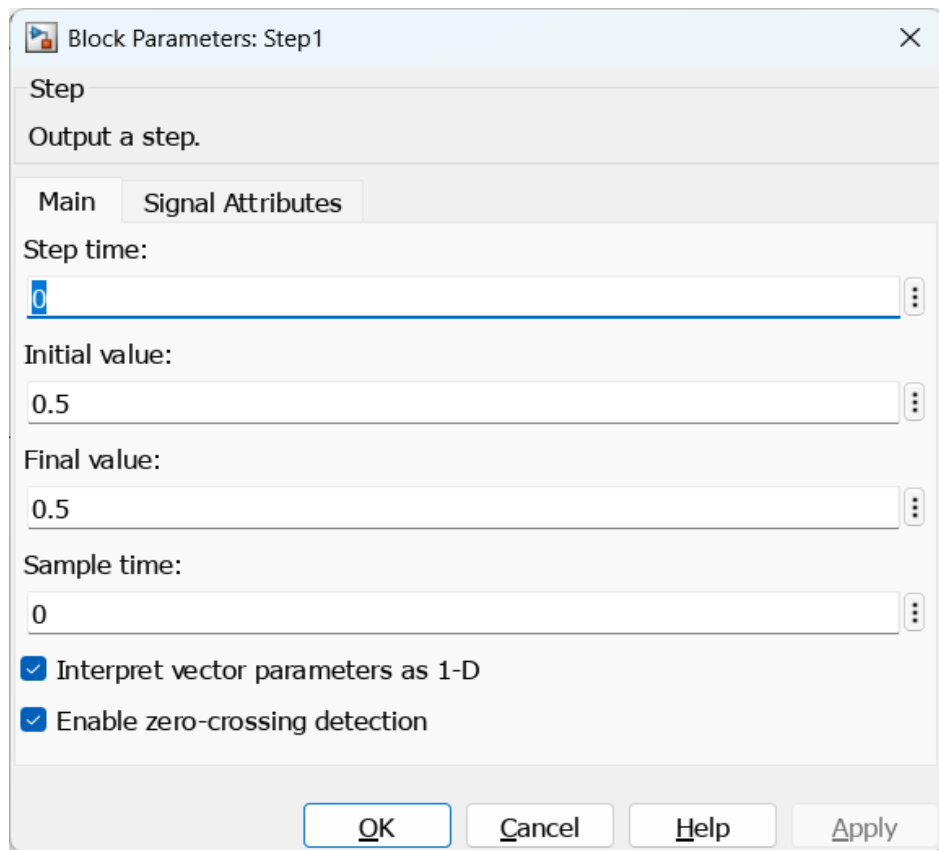


Рис. 5.2

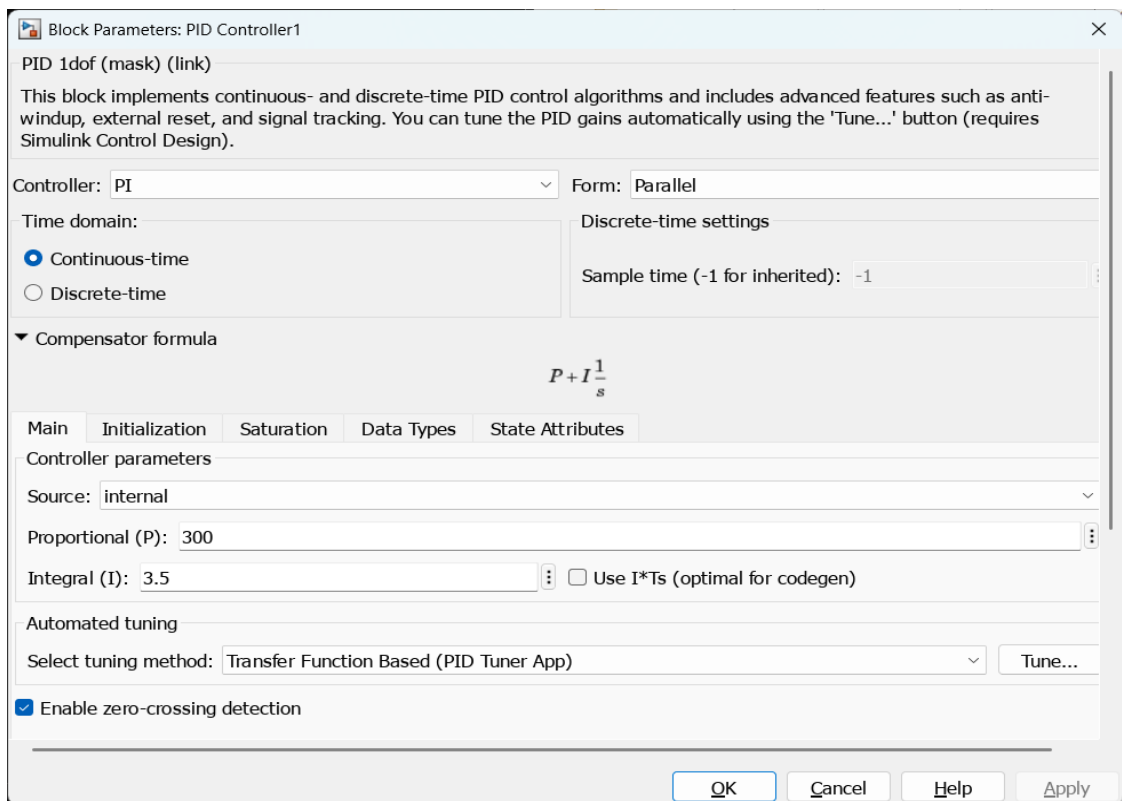


Рис. 5.3

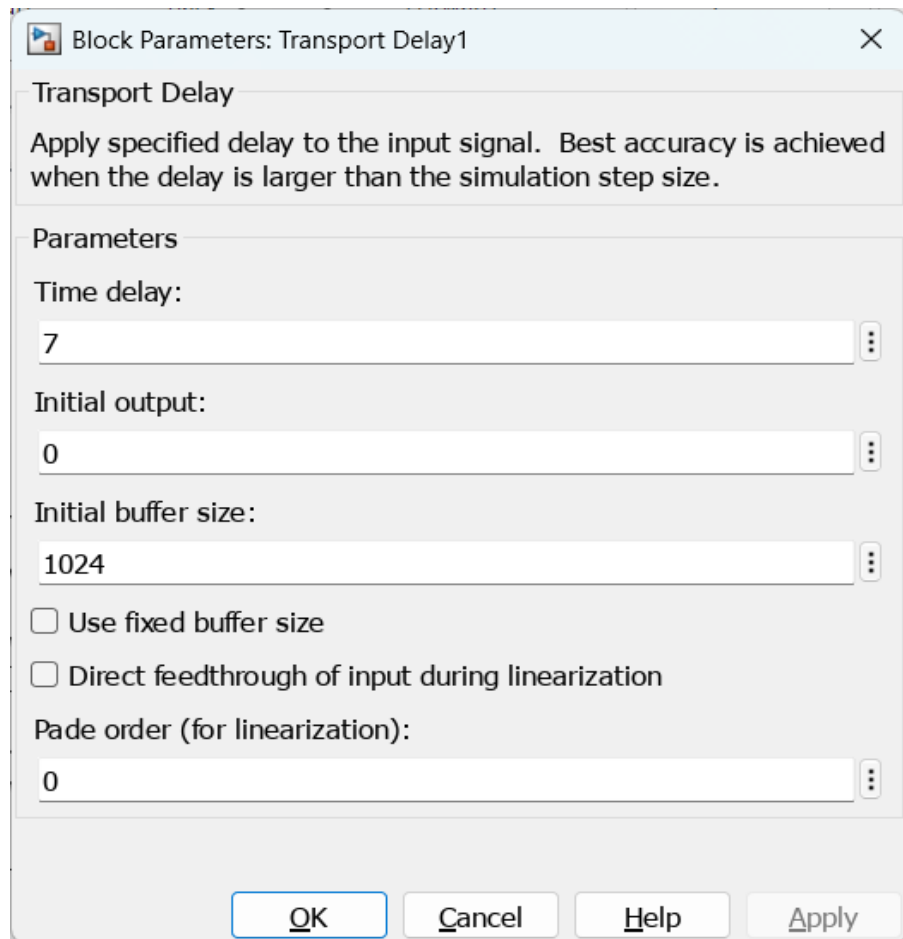


Рис. 5.4

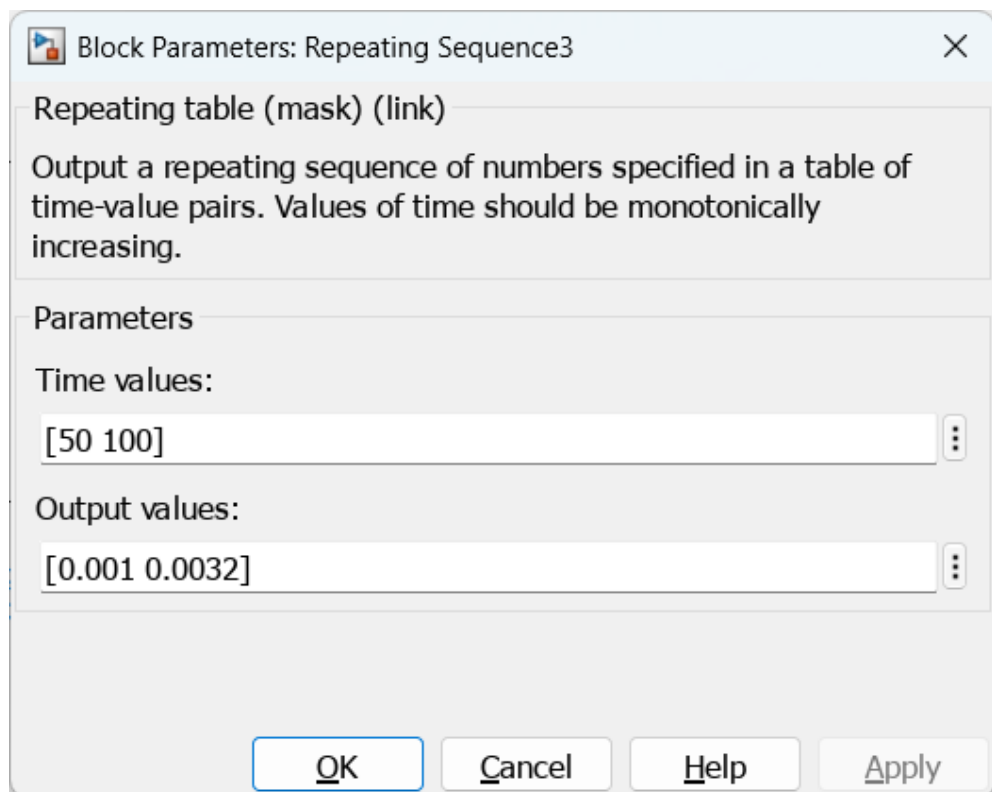


Рис. 5.5

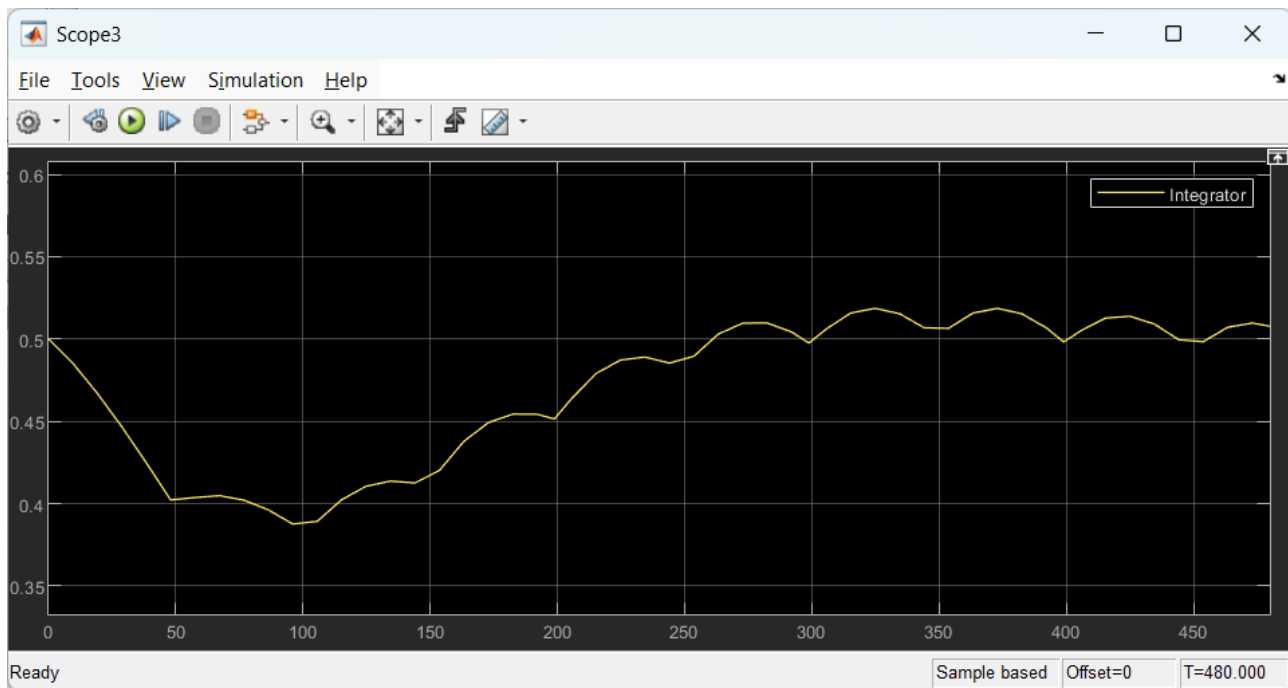


Рис. 5.6

Результати моделювання

Система є стійкою, без осциляцій.

Час встановлення відповідає фізичній інерційності процесу

При похибці в 0.1 м регулятор формує сигнал, який обмежується Saturation до 100 % подачі.

Реакція регулятора є логічною та передбачуваною.

5.5 Побудова математичної моделі системи підтримання розрідження в топці

Контроль розрідження в топці є важливою складовою безпечної та ефективної роботи парового котла. Надмірне або недостатнє розрідження може призвести до зворотного потоку димових газів або порушення умов горіння. Для реалізації регулювання розрідження використовується заслінка димових газів із приводом Siemens GCA161.1U, яка встановлюється у прямокутному каналі з розмірами отвору 1623 × 324 мм.

Вихідні технічні дані

- Оптимальне значення розрідження: -25 Па

- Допустиме відхилення: ± 5 Па
- Регулювання здійснюється шляхом зміни положення заслінки перед димососом
- Сигнал керування формується на основі даних з датчика Sensirion SDP600-125Pa

Обґрунтування побудови моделі

Вплив заслінки на розрідження залежить не лише від її положення, а й від конструкції димового каналу, геометрії трубопроводів, витрати повітря і газу. Через це точна передатна функція об'єкта може змінюватися для кожного конкретного встановлення котла.

З огляду на це, у межах цього проєкту не визначається числове значення коефіцієнта підсилення K . Для моделювання застосовується загальна структура аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = K / (T \cdot s + 1) \quad (5.16)$$

де:

- K — коефіцієнт підсилення (визначається емпірично після монтажу обладнання);
- T — стала часу, пов'язана з інерційністю системи димовидалення.

Для моделювання приймається типова стала часу:

$$T = 20 \text{ с}$$

Таким чином, динаміка системи описується як:

$$W(s) = K / (20s + 1) \quad (5.17)$$

де: вхід — % відкриття заслінки; вихід — розрідження в топці, Па.

5.6 Синтез ПІ регулятора для розрідження

Метою є підтримання розрідження на рівні -25 Па шляхом автоматичного керування положенням регулювальної заслінки димових газів. Уставка фіксована, зворотний зв'язок формується з датчика розрідження Sensirion SDP600-125Pa.

.Передатна функція об'єкта

На основі припущень, описаних у п. 4.5, передатна функція системи згідно (5.18) має вигляд:

$$W(s) = K / (20s + 1)$$

де коефіцієнт K визначається після інсталяції котла та налаштування димовидалення.

Логіка регулятора реалізована у функції `updateFlueDamperControl()`. Після встановлення обладнання параметри K_p та T_i будуть визначені експериментально на основі характеристик реальної системи.

5.7 Побудова математичної моделі системи підтримання рівня витрати повітря відповідно до витрати газу

З метою забезпечення стехіометричного співвідношення між газом і повітрям у процесі горіння, система підтримання витрати повітря реалізується як залежність подачі повітря від витрати газу. На основі аналізу енергетичних характеристик для природного газу встановлено, що для спалювання 1 м^3 метану (CH_4) потрібно $\approx 9.5 \text{ м}^3$ повітря (у стехіометричному співвідношенні). З урахуванням коефіцієнта надлишку повітря $\lambda = 1.23$ маємо:

$$1 \times 9.5 \times 1.23 \approx 11.7 \text{ м}^3 \text{ повітря на } 1 \text{ м}^3 \text{ природного газу} \quad (5.19)$$

Подача повітря в котел забезпечується вентилятором ВЦ 14-46 №5, продуктивністю до $13\,000 \text{ м}^3/\text{год}$. Регулювання здійснюється за допомогою повітряної заслінки ВЕНТС КРВ 400 з приводом Siemens GCA161.1U, який має повний час відкриття 150 с . З урахуванням цього, було побудовано динамічну модель системи у вигляді аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = 130 / (15s + 1) \quad (5.20)$$

де: $K = 130 \text{ м}^3/\text{год}$ на 1% відкриття заслінки (визначено виходячи з максимальної витрати повітря $\approx 13\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ при 100% відкритті заслінки), $T = 15 \text{ с}$ — стала часу системи (оцінено з урахуванням інерційності приводу Belimo SM230ASR, час повного відкриття якого становить 150 с ; типовою сталою часу для таких виконавчих механізмів приймається $\approx 1/10$ від повного часу ходу, тобто 15 с).

Ця модель враховує механічну інерційність приводу. Вхід моделі — $\%$ відкриття заслінки, вихід — витрата повітря у $\text{м}^3/\text{год}$.

5.8 Синтез ПІ регулятора для витрати повітря

Для підтримання співвідношення газ : повітря на рівні 1 : 11.7 було реалізовано ПІ-регулятор, який забезпечує автоматичне регулювання відкриття повітряної заслінки відповідно до поточної витрати газу. Уставка на витрату повітря формується в реальному часі як:

$$Q_{\text{пов_зад}} = Q_{\text{газ}} \times 11.7 \quad (5.21)$$

Зворотний зв'язок формується на основі сигналу з витратоміра повітря, масштабованого в межах 0–13000 м³/год.

Передатна функція об'єкта

Передатна функція аперіодичної ланки, що моделює поведінку системи згідно формулі (5.20):

$$W(s) = 130 / (15s + 1)$$

де: вхід — % відкриття повітряної заслінки, вихід — витрата повітря, м³/год.

Параметри ПІ-регулятора

Налаштування здійснено в середовищі Simulink Отримані параметри:

- Пропорційна складова: $K_p = 0.005$
- Інтегральна складова: $K_i = 0.000167$
- Час інтегрування: $T_i = K_p / K_i \approx 30$ с

Передатна функція ПІ-регулятора: $W_{PI}(s) = 0.005 \cdot (1 + 1 / (30s))$

Реалізація в Simulink

Модель реалізовано в середовищі Simulink. Основні елементи схеми:

- Step — моделює зміну витрати газу (наприклад, 0 → 600 м³/год),
- Gain — множення на 11.7 (для формування уставки витрати повітря),
- Sum — формування похибки,
- PID Controller (PI) — з параметрами $K_p = 0.005$, $T_i = 30$ с,
- Об'єкт регулювання — передатна функція: $130 / (15s + 1)$,

- Saturation — обмеження сигналу в межах 0–100 %,
- Scope — відображення витрати повітря і керуючого сигналу.

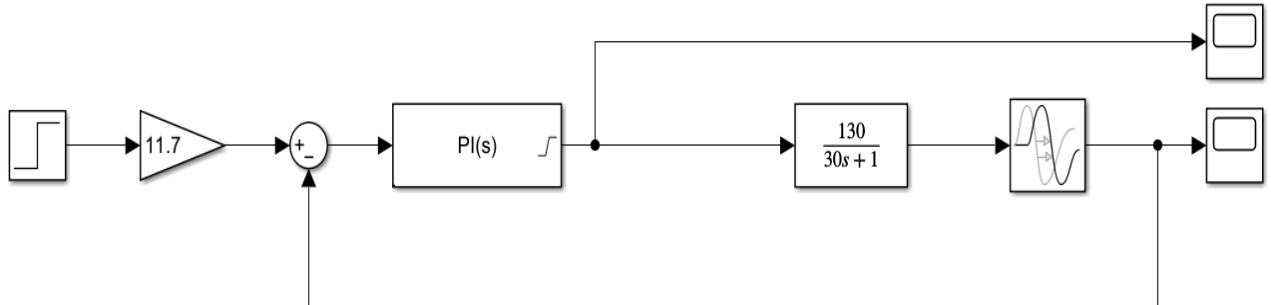


Рис. 5.7

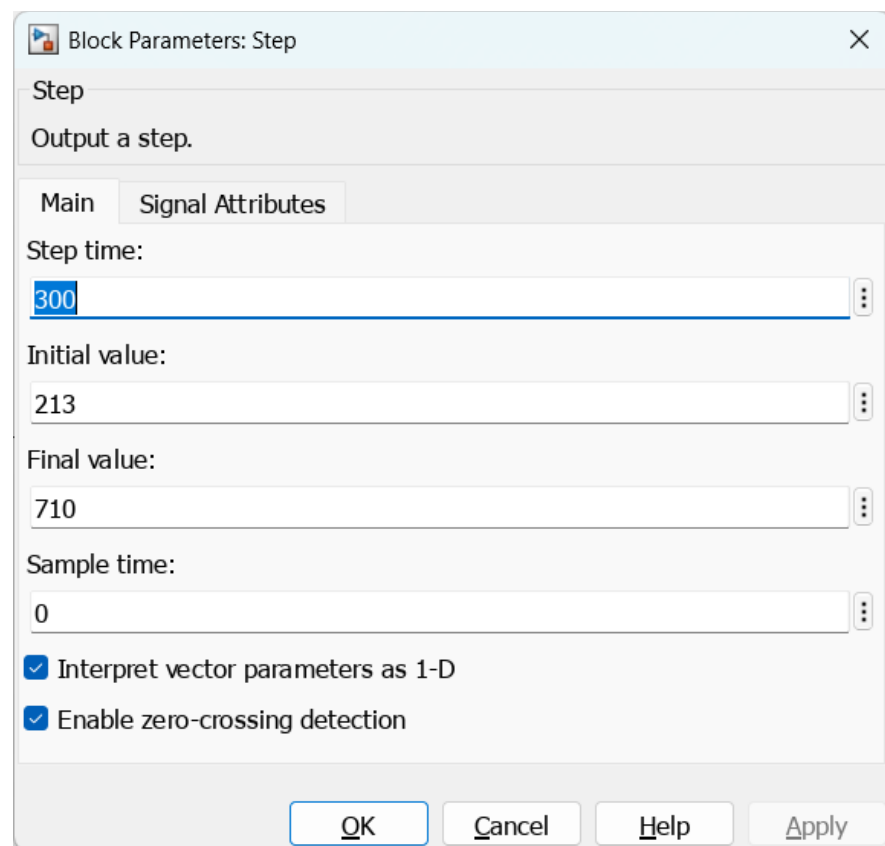


Рис. 5.8

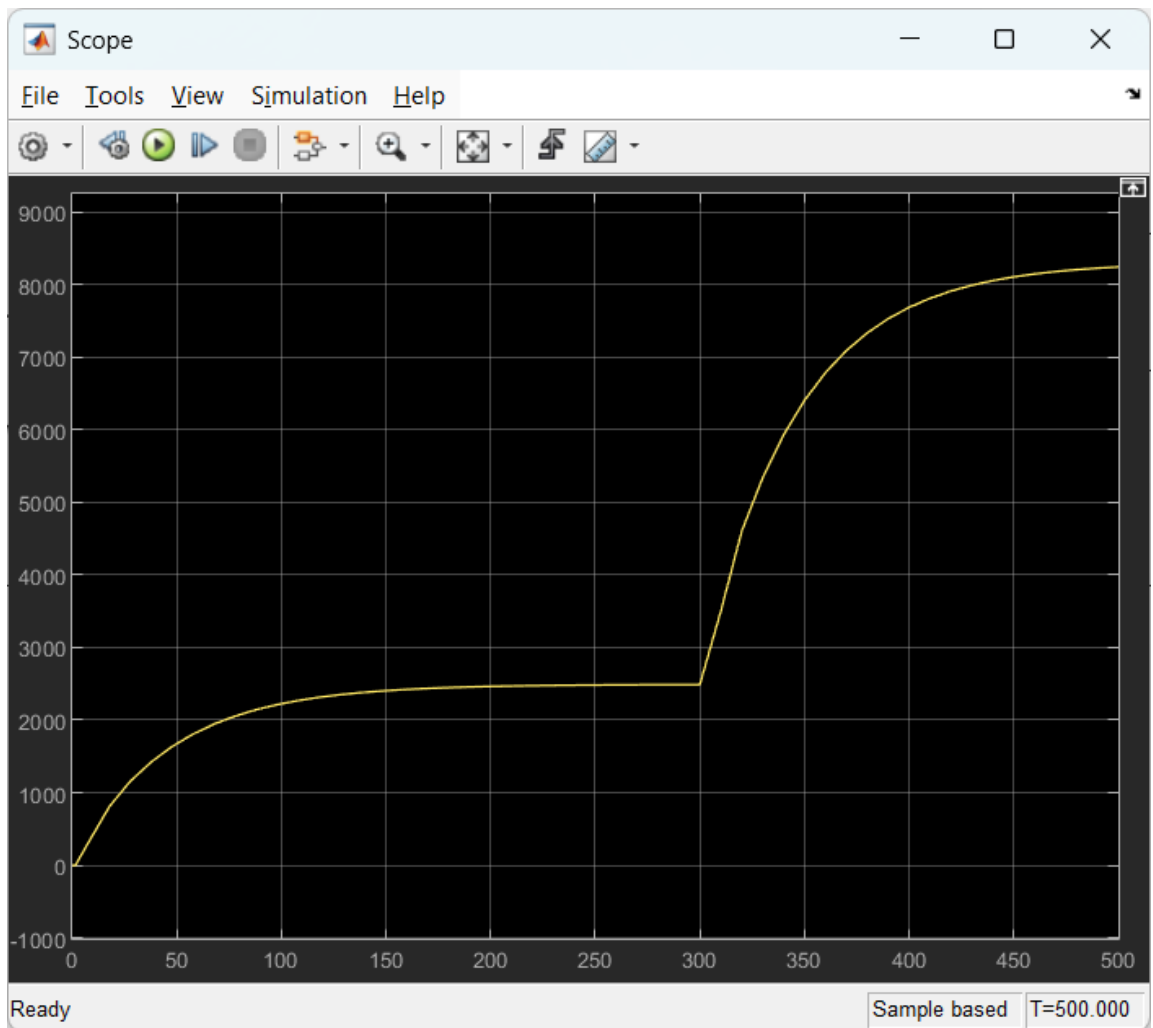


Рис. 5.9

Результати моделювання

Реакція системи є стійкою, плавною, без коливань. Система виходить на заданий режим при зміні витрати газу, дотримуючись цільового співвідношення. Регулятор не допускає перерегулювання або перевищення допустимого рівня сигналу.

Регулятор реалізований в Arduino у вигляді функції `controlAirFlow()`, оновлюваної з періодом 0.2 с.

РОЗДІЛ 6 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОЇ ЛОГІКИ КЕРУВАННЯ ТА SCADA

6.1 Програмне забезпечення Arduino MEGA 2560

6.1.1 Загальна структура програмної логіки

Програма розділена на дві ключові функції — *setup()* та *loop()*, які виконуються автоматично. Функція *setup()* виконується один раз при запуску або перезавантаженні пристрою і містить ініціалізацію входів/виходів, дисплеїв, таймерів та початкових станів. Функція *loop()* — основний цикл, що безперервно виконується і реалізує логіку керування.

Окрім основних функцій, у проєкті застосовано низку власних функцій: *Cases()*, *checkForEmergencyConditions()*, *readSensors()*, *controlSteamPressure()* тощо. Вони структуровано поділяють функціональність коду, спрощують читання та можливе редагування. Були застосовані таймери (*millis()*), щоб уникнути блокуючих затримок (*delay()*).

Як захід безпеки був реалізований модуль WDT (WatchDogTimer). Кожного циклу таймер модуля має оновитися, якщо цього не відбувається – система виявляє зависання.

Посилання на файл повного коду в середовищі Arduino IDE в додатках.

6.1.2 Алгоритм переходу між режимами (функція *Cases*)

Функція *Cases()* визначає логіку зміни режимів роботи парового котла залежно від стану системи та сигналів керування. Передбачено п'ять основних режимів:

- *STOPPED* — зупинено
- *STARTING* — продувка і запуск
- *RUNNING* — штатна робота
- *STOPPING* — зупинка
- *EMERGENCY* — аварійне вимкнення

У кожному режимі система виконує певні дії з виконавчими механізмами, відповідно до вимог безпеки та логіки процесу. Перехід між режимами реалізується через умови, перевіряючи вхідні сигнали та параметри процесу:

- з *STOPPED* у *STARTING*: при натисканні кнопки "ПУСК" або команди з SCADA
- з *STARTING* у *RUNNING*: при виявленні полум'я та досягненні мінімального тиску
- з *RUNNING* у *STOPPING*: при натисканні кнопки "СТОП"
- у *EMERGENCY*: при спрацюванні аварійних умов

У режимі *STARTING* реалізується спеціальний алгоритм розгону. Він передбачає попередню продувку, запалювання пальника та поступове збільшення подачі газу від початкового значення (30%) до максимального (100%) впродовж контрольованого часу. Водночас вентилятори вже працюють, а подача води контролюється для запобігання перегріву барабана. Лише після успішного завершення етапу розгону (фіксація стабільного полум'я та досягнення тиску не менше 1.0 МПа) система переходить до режиму *RUNNING*.

У режимі *RUNNING* система працює в штатному режимі автоматичного регулювання. подача повітря, газу, води та димових газів керується за допомогою ПІ-регуляторів, реалізованих у коді. Задані значення параметрів можуть змінюватись оператором із SCADA, при цьому регулятори адаптуються до оновлених уставок. *fan_on*, *exhaust_fan_on* та *pump_on* залишаються активними постійно, при цьому *pump_on* активується лише тоді, коли *pwm_val_water_valve* > 0.

У режимі *STOPPING* реалізується контрольоване припинення роботи. подавання газу припиняється, а пальник (*igniter_on*) вимикається. При цьому вентилятори продовжують працювати ще певний час для забезпечення продувки камери згоряння. Після завершення всіх дій система переходить у режим *STOPPED*.

У режимі *STOPPED* система очікує на команду запуску. Усі виконавчі механізми перебувають у вимкненому стані, а параметри не регулюються. Відображення поточних значень триває, що дозволяє оператору контролювати стан котла в режимі очікування.

У режимі *EMERGENCY* усі виконавчі механізми примусово вимикаються, а також активується світлова та звукова сигналізація (*led_sound_alarm_on*). Цей режим має найвищий пріоритет і не залежить від інших умов — він активується миттєво у разі виявлення небезпечних параметрів (наприклад, відсутність

полум'я, перевищення тиску, вихід води за межі тощо). Скасування аварії можливе лише вручну, через перезапуск системи.

6.1.3 Зчитування вхідних сигналів

Зчитування вхідних сигналів здійснюється у спеціалізованих функціях, які відповідають за інтерфейс з фізичними кнопками, SCADA-системою, а також сенсорними модулями.

- Кнопки керування: *btn_start*, *btn_stop*, *btn_emergency* — перевіряються через *digitalRead()* з відповідних пінів. Сигнали формують перехід між режимами та ініціюють запуск або аварійне вимкнення.
- Команди з SCADA: *scada_btn_start*, *scada_btn_stop*, *scada_btn_emergency* — зчитуються через порт *Serial*, обробляються у функції *readSCADAButtons()* за допомогою *Serial.readStringUntil('\n')* та розділення на підкомпоненти через коми. Крім кнопок, передається також встановлене значення тиску пари (*pressure_steam_setpoint*).

Формат отриманого рядка із SCADA:

1,0,0,1.35

де:

- 1 — *scada_btn_start* увімкнено,
- 0 — *scada_btn_stop* вимкнено,
- 0 — *scada_btn_emergency* вимкнено,
- 1.35 — заданий тиск пари в МПа.

Обробка SCADA-команди виконується з перевіркою кількості ком:

```
if (firstComma > 0 && secondComma > firstComma && thirdComma >
secondComma) {
```

```
    scada_btn_start = input.substring(0, firstComma).toInt() > 0;
```

```
    scada_btn_stop = input.substring(firstComma + 1, secondComma).toInt() > 0;
```

```
    scada_btn_emergency = input.substring(secondComma + 1, thirdComma).toInt() >
0;
```

```
    pressure_steam_setpoint = input.substring(thirdComma + 1).toFloat();
```

```
pressure_steam_setpoint = constrain(pressure_steam_setpoint, 1.0, 1.4);  
}
```

Сенсорні сигнали: зчитуються у функції *readSensors()* і включають такі параметри:

- *water_level* — рівень води в барабані котла (0–1 м)
- *pressure_steam* — тиск пари (0–1.6 МПа)
- *vacuum_firebox* — розрідження в топці (–500...20 Па)
- *water_flow* — витрата живильної води (0–15 м³/год)
- *steam_flow* — витрата пари (0–10 т/год)
- *air_flow* — витрата повітря (0–13000 м³/год)
- *feedwater_temp* — температура живильної води (0–100 °С)
- *gas_flow* — витрата газу (0–900 м³/год)
- *temp_firebox* — температура в топці (°С, вимірюється окремим модулем)
- *flame_detected* — логічний сигнал наявності полум'я (інверсна логіка: LOW = є полум'я)

Ці дані отримуються наступним чином:

```
water_level    = safeMapAnalog(A0, 1.0, 5.0, 0.0, 1.0);    // 0–1 м  
pressure_steam = safeMapAnalog(A1, 1.0, 5.0, 0.0, 1.6);    // 0–1.6 МПа  
vacuum_firebox = safeMapAnalog(A3, 1.0, 5.0, -500.0, 20.0); // –500...20 Па  
water_flow     = safeMapAnalog(A4, 1.0, 5.0, 0.0, 15.0);    // м3/год  
steam_flow     = safeMapAnalog(A5, 1.0, 5.0, 0.0, 10.0);    // т/год  
air_flow       = safeMapAnalog(A6, 1.0, 5.0, 0.0, 13000.0); // м3/год  
feedwater_temp = safeMapAnalog(A7, 1.0, 5.0, 0.0, 100.0);   // °С  
gas_flow       = safeMapAnalog(A8, 1.0, 5.0, 0.0, 900.0);   // м3/год  
temp_firebox   = tempSensor.readCelsius();                 // °С  
flame_detected = (digitalRead(pin_flame_detected) == LOW); // Логіка інверсна
```

Функція *safeMapAnalog()* виконує зчитування з аналогового входу та масштабування до фізичного діапазону значень. Ці значення зберігаються у

відповідних змінних та використовуються як зворотний зв'язок у регуляторах або логіці аварійного захисту.

6.1.4 Логіка аварійного вимкнення

Логіка аварійного вимкнення реалізована через функцію *checkForEmergencyConditions()*, яка викликається в основному циклі *loop()* з метою безперервного моніторингу критичних параметрів системи. У разі виявлення небезпечного стану (наприклад, відсутність полум'я, перевищення допустимого тиску пари, критичний рівень води в барабані), система миттєво переводиться в режим *EMERGENCY*.

Функція складається з трьох окремих блоків перевірок:

1) Аварії, що спрацьовують у будь-якому режимі:

— Натискання кнопки аварійного вимкнення (*btn_emergency* або *scada_btn_emergency*) миттєво активує аварійний режим і записує повідомлення через *logEvent("EMERGENCY: Emergency button pressed")*.

2) Аварії під час запуску (*STARTING*):

— Якщо протягом 15 секунд після активації запальника не зафіксовано полум'я (*!flame_detected*), вважається, що розпал не відбувся — аварія.

— Якщо після 90 секунд запуску немає прогресу у зростанні тиску пари, температури камери згоряння або недостатнє розрідження, це вважається ознакою несправності запуску.

— Додатково перевіряються граничні значення рівня води (*water_level < 0.3 || > 0.8*) та температури живильної води (*< 30°C або > 150°C*).

3) Аварії під час нормальної роботи (*RUNNING*):

— Якщо втрата полум'я триває понад 3 секунди, вважається, що горіння припинилось (*logEvent("EMERGENCY: Flame lost for more than 3 seconds during operation")*).

— Якщо тиск пари виходить за межі 0.8–1.5 МПа, активується захист.

- Температура камери згоряння понад 900°C викликає зупинку.
- Розрідження у топці слабше ніж -20 Па також причина для аварії.
- Ненормальні витрати повітря ($< 2500\text{ м}^3/\text{год}$) або газу ($> 750\text{ м}^3/\text{год}$) вказують на несправність.
- У разі відкритого водяного клапану при відсутності витрати води ($\text{pwm_val_water_valve} > 10$, але $\text{water_flow} < 0.1\text{ м}^3/\text{год}$) — виявляється несправність подачі води.

У разі спрацювання будь-якої з умов:

- Змінна *system_state* встановлюється в *EMERGENCY*
- Увімкнення аварійного сигналу через *led_sound_alarm_on = true*
- Миттєве припинення дії всіх механізмів
- Логування конкретної причини через *logEvent()*

Функція *checkForEmergencyConditions()* працює незалежно від активного режиму і викликається кожен цикл, забезпечуючи безперервний контроль безпеки. Така структура гарантує швидке реагування на позаштатні ситуації.

6.1.5 Регулятори технологічних параметрів

Для підтримання стабільності технологічного процесу в системі автоматизації впроваджено кілька незалежних контурів регулювання. Кожен контур реалізовано у вигляді окремої функції з ПІ-регулятором, адаптованим під конкретний технологічний параметр. Нижче наведено короткий опис логіки реалізації та роботи відповідних функцій.

Регулювання тиску пари — *controlSteamPressure()*

Ця функція реалізує ПІ-регулятор для підтримання заданого значення тиску пари в барабані котла. Вхідним параметром є *pressure_steam*, зворотний зв'язок з аналогового сенсора. Задане значення передається з SCADA-системи через змінну *pressure_steam_setpoint*.

Різниця між заданим і фактичним значенням масштабується, проходить через алгоритм ПІ-регулятора, після чого результат обмежується від 0 до 100 (% відкриття регулювального клапана газу).

Регулювання рівня води — *controlWaterLevel()*

Контур регулювання рівня води в барабані здійснюється на основі змінної *water_level* та заданого значення, яке фіксовано на рівні 0.5 м. Результат ПІ-регулювання — значення ширини імпульсу для керування положенням клапана подачі води.

У разі, якщо значення *water_level* виходить за безпечні межі (0.3–0.8 м), втручання у керування здійснює функція *checkForEmergencyConditions()*, яка переводить систему в аварійний режим.

Регулювання витрати повітря — *controlAirFlow()*

Функція підтримує витрату повітря пропорційно до витрати газу відповідно до стехіометричного коефіцієнта 11.7. Вхідні параметри — *gas_flow* та *air_flow*. Обчислюється поточне відношення, порівнюється з еталонним, і формується сигнал для регулювання положення заслінки повітря *pwm_val_air_damper*.

Після ПІ-регулювання результат масштабується до 0–255 та передається на широтно-імпульсний вихід, який керує аналоговим приводом заслінки.

Регулювання розрідження — *updateFlueDamperControl()*

Ця функція керує положенням димової заслінки з метою підтримання заданого розрідження в топці (–25 Па). Аналізується значення з сенсора *vacuum_firebox*, яке порівнюється з цільовим. На основі результату працює ПІ-регулятор, вихід якого керує значенням *pwm_val_flue_damper* — сигналом на привід заслінки димових газів.

Як і в інших випадках, сигнал обмежується у межах допустимого діапазону. У випадках сильного відхилення від норми (вище –20 Па) спрацьовує аварійне вимкнення.

Усі регулятори реалізовано без затримок та з періодом оновлення 1 цикл *loop()*. Для кожного з них попередньо проведено розрахунок коефіцієнтів підсилення та сталих часу на основі математичного моделювання, наведеного в розділі 4.

Приклад	реалізації	в	кодї:
(Регулятор	тиску		пари)
<pre>void controlSteamPressure() {</pre>			

```
    unsigned long now = millis();
```

```
    if (now - lastUpdate_steam >= (unsigned long)(dt_steam * 1000)) {
```

```
        lastUpdate_steam = now;
```

```

//Задане значення тиску в МПа в оновленні Case running
//Зсув на 1.0 МПа приводимо до моделі (0–0.4)
float pressure_set_model = pressure_steam_setpoint_real - 1.0;
float pressure_feedback_model = pressure_steam - 1.0;
//Відхилення
float error = pressure_set_model - pressure_feedback_model;
//Інтегрування
integral_steam = error * dt_steam;
//Обчислення дії регулятора
float output = Kp_steam * error + (Kp_steam / Ti_steam) * integral_steam;
//Обмеження сигналу в межах 0-100
pwm_val_gas_valve = constrain(output, 0.0, 100.0);
}

```

6.1.6 Оновлення вихідних сигналів та LCD

У процесі кожного циклу виконання основної програми (*loop()*) система оновлює значення керуючих сигналів, що формуються регуляторами, а також параметри, які мають бути відображені на локальному дисплеї та передані до SCADA. Це забезпечується централізованою функцією *updateOutputs()*, яка керує як аналоговими, так і цифровими виходами.

Оновлення виконавчих механізмів включає:

- Широтно-імпульсне керування для формування сигналу 0–10 В через перетворювач:
 - *pwm_val_water_valve* — положення клапана води
 - *pwm_val_air_damper* — положення повітряної заслінки
 - *pwm_val_flue_damper* — положення заслінки димових газів
 - *pwm_val_gas_valve* — положення газового клапана
- Цифрові сигнали для вмикання/вимикання обладнання:

- *pump_on* — насос подачі живильної води
- *fan_on* — вентилятор дуття
- *exhaust_fan_on* — димосос
- *igniter_on* — електрозапальник
- *led_sound_alarm_on* — світлозвуковий сигналізатор

Уривок функції *updateOutputs()*:

```
void updateOutputs() {
    // PWM сигнали (аналогові виходи через конвертер 0–10 В)
    analogWrite(pin_pwm_water_valve, map(pwm_val_water_valve, 0, 100, 0, 255));
    analogWrite(pin_pwm_air_damper, map(pwm_val_air_damper, 0, 100, 0, 255));
    analogWrite(pin_pwm_flue_damper, map(pwm_val_flue_damper, 0, 100, 0, 255));
    analogWrite(pin_pwm_gas_valve, map(pwm_val_gas_valve, 0, 100, 0, 255));

    // Дискретні сигнали (керування реле)
    digitalWrite(pin_led_sound_alarm, led_sound_alarm_on ? HIGH : LOW);
    digitalWrite(pin_pump_on, pump_on ? HIGH : LOW);
    digitalWrite(pin_fan_on, fan_on ? HIGH : LOW);
    digitalWrite(pin_exhaust_fan_on, exhaust_fan_on ? HIGH : LOW);
    digitalWrite(pin_igniter_on, igniter_on ? HIGH : LOW);
}
```

Крім того, виведення значень параметрів на дисплей (LCD 20x4) здійснюється окремою функцією *updateLcd1()*. Вона виводить ключові дані в реальному часі, постійно оновлюючи останні значення:

- *pressure_steam* — тиск пари, МПа
- *steam_flow* — витрата пари, т/год
- *vacuum_firebox* — розрідження в топці, Па
- *water_level* — рівень води, м

Уривок функції *updateLcd1()*:

```

void updateLcd1() {
    lcd1.setCursor(12, 0); lcd1.print("    ");
    lcd1.setCursor(12, 0); lcd1.print(String(pressure_steam, 2));

    lcd1.setCursor(12, 1); lcd1.print("    ");
    lcd1.setCursor(12, 1); lcd1.print(String(steam_flow, 2));

    lcd1.setCursor(12, 2); lcd1.print("    ");
    lcd1.setCursor(12, 2); lcd1.print(String(vacuum_firebox, 0));

    lcd1.setCursor(12, 3); lcd1.print("    ");
    lcd1.setCursor(12, 3); lcd1.print(String(water_level, 2));
}

```

Цей підхід забезпечує зручне представлення основних параметрів для оператора без потреби звернення до SCADA. Очистка області перед оновленням значень запобігає відображенню залишкових символів від попередніх чисел.

6.1.7 Формування рядка даних для SCADA

Для забезпечення моніторингу в реальному часі та інтеграції з SCADA, мікроконтролер формує компактний рядок даних, який передається через порт (*Serial*) у фіксованому форматі. Це дає змогу стабільно передавати ключові параметри на комп'ютерну систему збору, обробки та візуалізації інформації.

Формування здійснюється у функції *sendToSCADA()*, яка викликається в кожному циклі програми. Вона послідовно надсилає значення параметрів через *Serial.print()*, розділяючи їх крапкою з комою. Для останнього значення використовується *Serial.println()*, щоб завершити рядок. Усі значення подаються без форматування, у числовому вигляді або як логічні стани (0/1).

Передаються такі параметри:

- *system_state* — числовий код поточного режиму (0–4)

- *pressure_steam* — тиск пари, МПа
- *water_level* — рівень води, м
- *temp_firebox* — температура в топці, °С
- *vacuum_firebox* — розрідження в топці, Па
- *feedwater_temp* — температура живильної води, °С
- *air_flow* — витрата повітря, м³/год
- *steam_flow* — витрата пари, т/год
- *water_flow* — витрата води, м³/год
- *gas_flow* — витрата газу, м³/год
- *flame_detected* — наявність полум'я (логічний сигнал)
- *btn_start*, *btn_stop*, *btn_emergency* — сигнали з фізичних кнопок керування
- *pwm_val_water_valve*, *pwm_val_air_damper*, *pwm_val_flue_damper*, *pwm_val_gas_valve* — керувальні сигнали на регулювальні ВМ, %
- *pump_on*, *fan_on*, *exhaust_fan_on*, *igniter_on* — дискретні стани виконавчих механізмів

Уривок функції:

```
void sendToSCADA() {
    Serial.print(system_state); Serial.print(";");

    Serial.print(pressure_steam); Serial.print(";");
    Serial.print(water_level); Serial.print(";");
    Serial.print(temp_firebox); Serial.print(";");
    Serial.print(vacuum_firebox); Serial.print(";");
    Serial.print(feedwater_temp); Serial.print(";");
    Serial.print(air_flow); Serial.print(";");
    Serial.print(steam_flow); Serial.print(";");
    Serial.print(water_flow); Serial.print(";");
    Serial.print(gas_flow); Serial.print(";");
```

```

Serial.print(flame_detected); Serial.print(";");
Serial.print(btn_start); Serial.print(";");
Serial.print(btn_stop); Serial.print(";");
Serial.print(btn_emergency); Serial.print(";");

Serial.print(pwm_val_water_valve); Serial.print(";");
Serial.print(pwm_val_air_damper); Serial.print(";");
Serial.print(pwm_val_flue_damper); Serial.print(";");
Serial.print(pwm_val_gas_valve); Serial.print(";");

Serial.print(pump_on); Serial.print(";");
Serial.print(fan_on); Serial.print(";");
Serial.print(exhaust_fan_on); Serial.print(";");
Serial.println(igniter_on);
}

```

Такий підхід забезпечує простоту зчитування даних на боці SCADA-системи, а також дозволяє легко відслідковувати логіку роботи котла та аналізувати її у реальному часі.

6.2 Інтерфейс оператора та SCADA в LabVIEW

6.2.1 Призначення та загальний огляд системи SCADA

SCADA-система виконує роль операторського інтерфейсу для відображення стану парового котла й подання керувальних сигналів. Основні функції SCADA: моніторинг технологічних параметрів, управління станами котла через кнопки *СТАРТ*, *СТОП*, *АВАРІЯ*, введення заданого значення тиску пари, а також ведення журналу повідомлень про події та аварії з подальшим збереженням в файл.

Кнопки *СТАРТ* і *СТОП* активні лише у відповідних режимах для запобігання некоректним переходам. Як середовище реалізації використано LabVIEW.

Інтерфейс побудований для інтуїтивного сприйняття та індикатори розміщені відповідно до свого реального розташування, що дає змогу швидко і чітко орієнтуватися серед наданих даних.

Посилання на файл програми SCADA в додатках.

6.2.2 Архітектура взаємодії Arduino з LabVIEW

Взаємодія здійснюється через послідовний порт (*Serial*). Arduino формує рядок даних, розділений символом ";", що включає значення фізичних параметрів (наприклад, *pressure_steam*, *water_level*, *flame_detected* тощо), а також цифрові сигнали від кнопок керування. Зі сторони LabVIEW до Arduino передаються керувальні команди: *scada_btn_start*, *scada_btn_stop*, *scada_btn_emergency*, а також задане значення тиску пари для регулятора тиску.

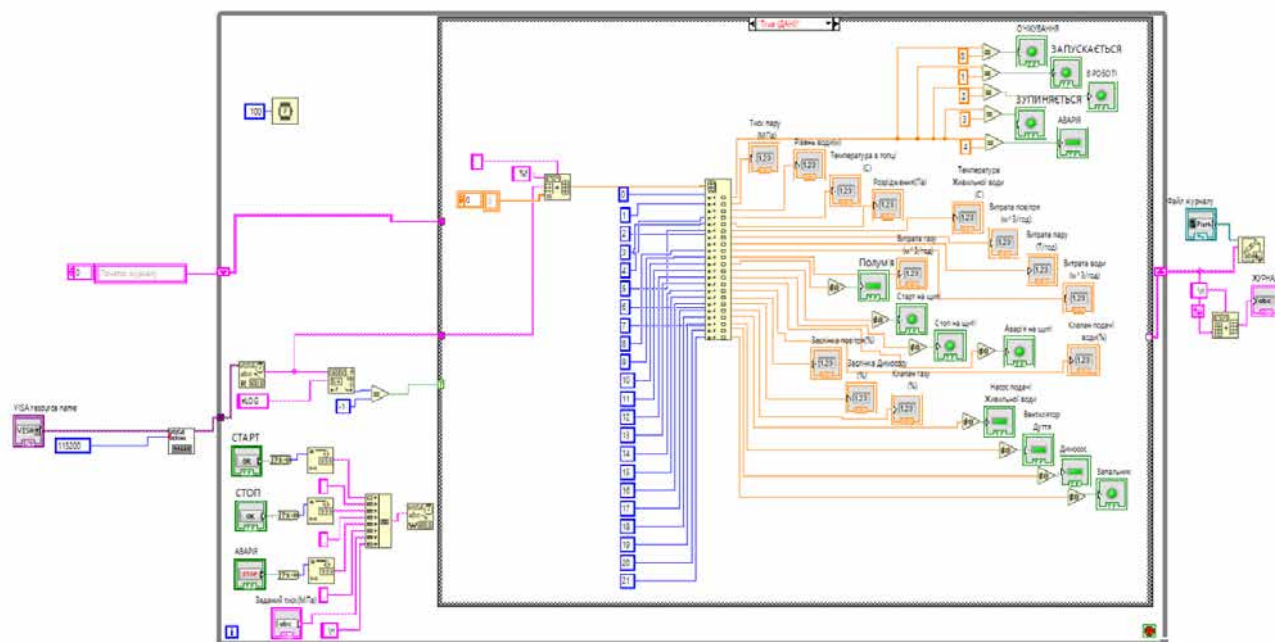


Рис. 6.1 Програма SCADA

6.2.3 Побудова фронтальної панелі

Фронтальна панель SCADA побудована на основі логіки об'єкта керування. Вона містить:

- числові індикатори сенсорів та виконавчих механізмів
- світлові індикатори виконавчих механізмів що керуються пускачами.

- світлову індикацію аварійних станів та поточного режиму
- кнопки *СТАРТ*, *СТОП*, *АВАРІЯ* для дистанційного керування
- поле для введення бажаного значення тиску пари
- поле "ЖУРНАЛ" куди виводяться повідомлення з контролера
- поле вибору файла для збереження журналу

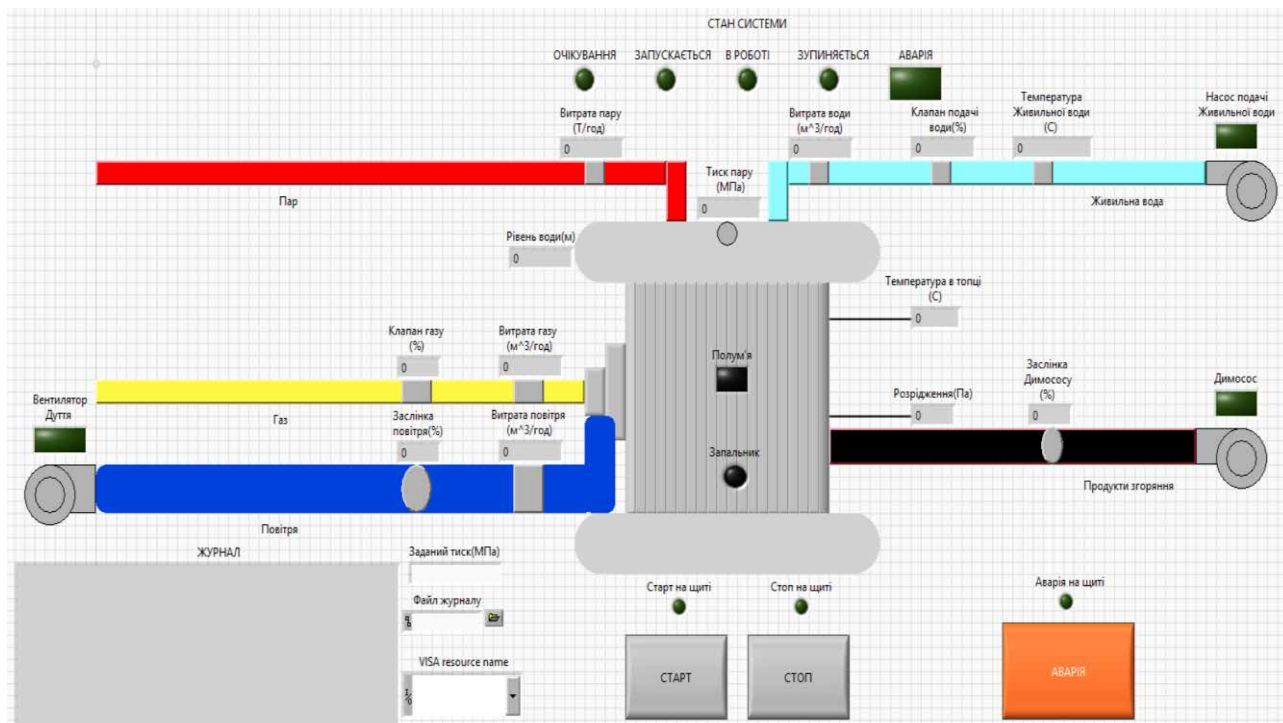


Рис. 6.2 Фронтальна панель SCADA

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було повністю реалізовано систему автоматичного керування технологічними параметрами парового котлоагрегату ДЕ-10-14ГМ. Розробка охоплює всі ключові складові: математичне моделювання об'єкта керування, розробку алгоритмів регулювання, підбір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, а також створення повного комплексу схем автоматизації, живлення й підключення.

У процесі виконання роботи було проведено математичне моделювання динаміки технологічних об'єктів, що підлягають регулюванню: тиску пари, рівня води, витрати повітря та розрідження в топці. Моделі формувались поетапно — з урахуванням фізичної природи процесів, наявних затримок, типу збурення, а також практичної реалізації вимірювальних засобів.

У разі регулювання розрідження в топці розробка ускладнювалась через обмежену інформацію щодо геометрії димових каналів, яка значною мірою залежить від конкретного об'єкта встановлення. Оскільки котел ДЕ-10-14ГМ є промисловим обладнанням, що може експлуатуватись у різних конфігураціях та з різною архітектурою димових каналів, геометричні характеристики (довжина, перетин, кількість поворотів тощо) можуть суттєво впливати на динаміку процесу і, відповідно, на параметри регулятора. Тому модель побудована за узагальненими оцінками, а регулятор рекомендовано доналаштувати після введення об'єкта в експлуатацію. Разом з тим, побудована структура регулятора дозволяє враховувати змінні параметри без повної перебудови логіки.

Для досягнення оптимального режиму згоряння під час синтезу регулятора витрати повітря були враховані основні закономірності горіння природного газу, включаючи стехіометричне співвідношення газу та повітря, а також коефіцієнт надлишку повітря. Регулятор було реалізовано з урахуванням автоматичної взаємодії із витратою газу, що дало змогу мінімізувати втрати тепла, підвищити повноту згоряння та забезпечити енергоефективність роботи котлоагрегату.

Для вимірювання параметрів були обґрунтовано підібрані первинні перетворювачі, з урахуванням їх точності, умов монтажу, принципу дії та сумісності з Arduino. Такий підхід дозволив забезпечити надійне зчитування фізичних величин, необхідних для реалізації керування, а також гарантувати точність сигналів зворотного зв'язку для кожного з розроблених регуляторів.

У ролі виконавчих механізмів було застосовано електромагнітні клапани, регулювальні заслінки з сервоприводами, електродвигуни з релейним

керуванням, а також модулі керування аналоговими сигналами. Реалізовано чітке розділення силових та керуючих ланцюгів, забезпечено захист від перевантаження, коротких замикань та струмів витоку. Обрані пристрої (вентилятор, димосос, насос, заслінки і регулювальні клапани, електрозапальник) мають відповідність умовам експлуатації парових котлів.

Під час розробки програмної реалізації було безпосередньо реалізовано всю логіку керування режимами роботи котла. Робота охоплювала створення структури послідовного автоматичного запуску, що передбачає попередню перевірку усіх критичних сигналів, запуск допоміжних механізмів і поступовий вихід на робочий режим. Було впроваджено контроль аварійних станів, можливість ручного втручання в процес, а також реалізовано цифрові регулятори всіх основних параметрів — тиску пари, рівня води, витрати повітря і розрідження. Уся система захищена функціями самодіагностики, ведення журналу, логікою аварійного реагування з пріоритетом безпеки та можливістю відновлення роботи після аварій за визначеними умовами.

SCADA-система, реалізована у середовищі LabVIEW, забезпечує інтерфейс оператора для керування процесом: відображення параметрів, керування станами, задавання уставок і ведення журналу подій. Особлива увага приділена візуальній структурі — оператор бачить топологію об'єкта, значення основних параметрів і сигнали тривоги у реальному часі, має все необхідне для контролю процесів.

Було створено комплект робочої документації, що включає функціональну схему автоматизації, електричну принципову схему, схему електричних підключень, схему зовнішніх з'єднань та монтажну схему. Усі схеми відповідають вимогам ДСТУ, забезпечують повне охоплення підключень та інтерфейсів усіх компонентів системи.

Таким чином, реалізована система демонструє завершений цикл проектування автоматизованої системи — від теоретичного аналізу і моделювання до апаратної реалізації та налагодження віртуального інтерфейсу. Завдяки врахуванню фізичних характеристик, реальних умов експлуатації та практичних обмежень, система може бути адаптована до різних конфігурацій парових котлів, що забезпечує її гнучкість і потенціал для широкого промислового впровадження.

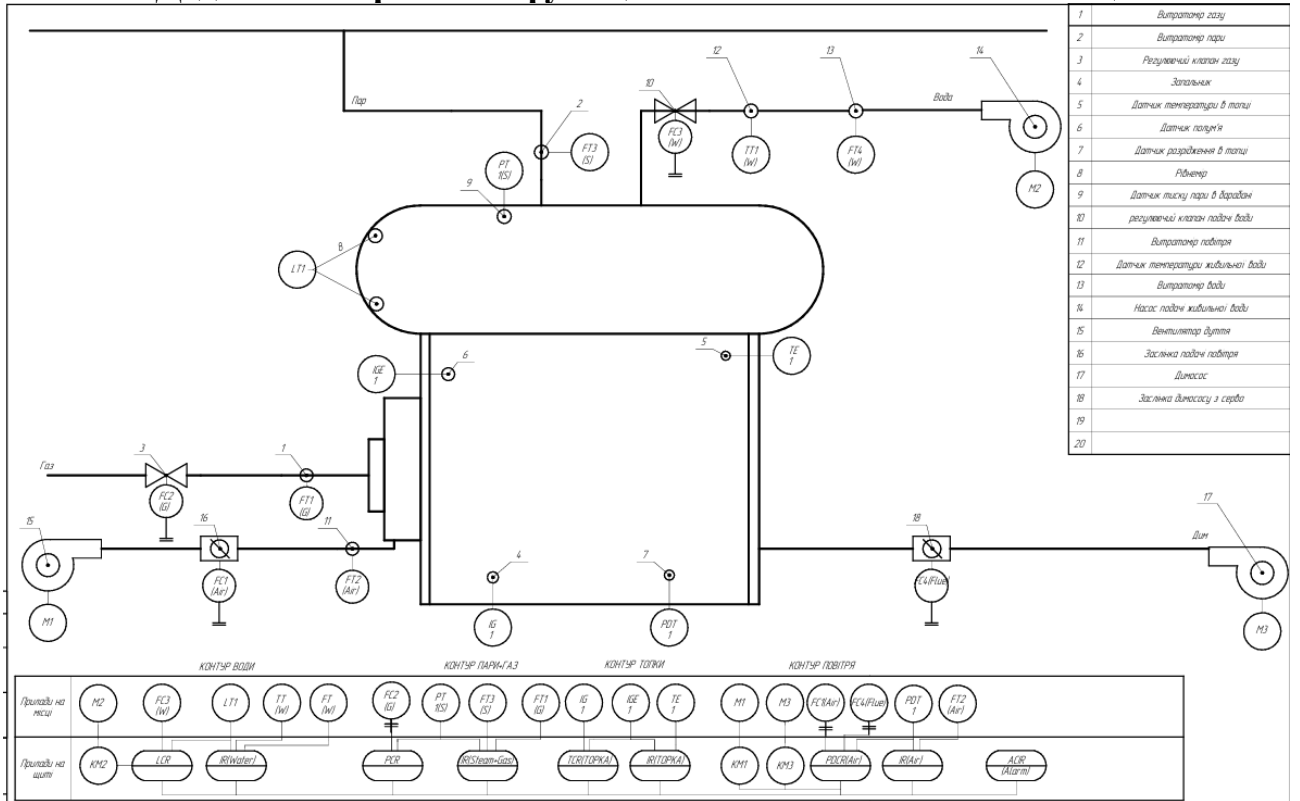
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дмитро Лісовик. Циркуляція котла ДЕ, 2017. *YouTube*.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=_hUJc8g_-X0 (дата звернення: 17.06.2025).
2. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. Чинний від 2009-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2008.
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53238 (дата звернення: 17.06.2025).
3. ДСТУ 4095-2002. Автоматизація технологічних процесів. Терміни та визначення понять. Чинний від 2003-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2002. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=30788 (дата звернення: 17.06.2025).
4. ДСТУ EN 61511-1:2017. Функціональна безпека. Системи безпеки, пов'язані з технологічними процесами. Частина 1: вимоги до систем, що використовують електричні/електронні/програмовані електронні засоби. Чинний від 2018-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2017.
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83892 (дата звернення: 17.06.2025).
5. ДСТУ EN 746-2:2013. Основні вимоги до промислового теплового обладнання. Частина 2. Спеціальні вимоги до обладнання, що спалює горючі матеріали. Чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2013.
6. ДСТУ ІЕС 61131-3:2008. Програмовані логічні контролери. Частина 3. Мови програмування. Чинний від 2009-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2008. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=29910 (дата звернення: 17.06.2025).
7. ДСТУ ISO 12100:2014. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання і зменшення ризику. Чинний від 2015-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2014.
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=62931 (дата звернення: 17.06.2025).
8. Стабілізатор напруги Matek Micro ВЕС 6~30V to 5V/9V-ADJ - 3 шт
- *Радіокеровані моделі та аксесуари: інтернет магазин радіокерованих*

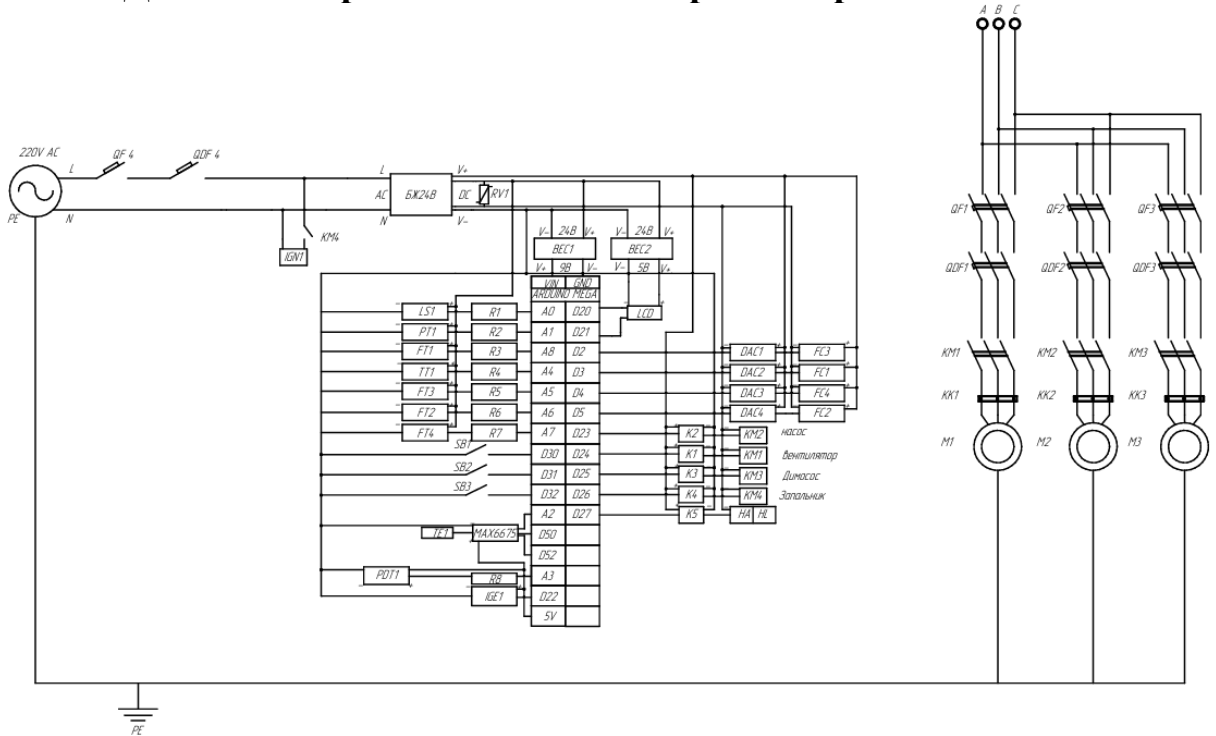
- моделей, радіокеровані моделі літака - modelistam.com.ua.*
URL: <https://modelistam.com.ua/stabilizator-napryajeniya-matek-micro-bec-p-46178> (дата звернення: 17.06.2025).
9. Arduino MEGA 2560.- URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (дата звернення: 17.06.2025).
10. Технічна документація Siemens на витратомір SITRANS FX330. – URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:22c18854-b10c-4cf9-9fa8-b868fe2d22e6/fi01-fx330-ua.pdf> (дата звернення: 17.06.2025).
11. Siemens Process Instrumentation Catalog.- URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation.html> (дата звернення: 17.06.2025).
12. Режимна карта котла ДЕ-10-14ГМ ст. №1, встановленого в котельні ТЦСК УПГГК ПАТ «Укргазвидобування» в с. Базилівщина. – 2013. – 6 с. – Внутрішній технічний документ.
13. Паровий котел ДЕ-10-14ГМ. Опис та технічні характеристики // ТЕКОМ-ЗАВОД. Офіційний сайт дилера парових котлів в Україні. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tekom-zavod.com.ua/ua/p1020474562-parovoj-kotel-gaz.html> (дата звернення: 17.06.2025).
14. Заповіти Блок запалювання Honeywell (Satronic) ZT 931 (ZT931) в "Котел-Клуб м.Харків" - 1256694464. "Котел-Клуб м.Харків". URL: <https://kotel-club.shop/ua/p1256694464-blok-zazhiganiya-honeywell.html?srsId=AfmBOorCeP1Gq3SbXg5JE0Elxt4g4RpKJy7nFclHr1Oy2O9BLePGkpSt> (дата звернення: 17.06.2025).
15. Блок живлення Mean Well на DIN-рейку 240W DC24V (NDR-240-24). *Модерн Лайт*. URL: <https://svetodiody.com.ua/ru/meanwell-ndr-240-24/> (дата звернення: 17.06.2025).

ДОДАТКИ

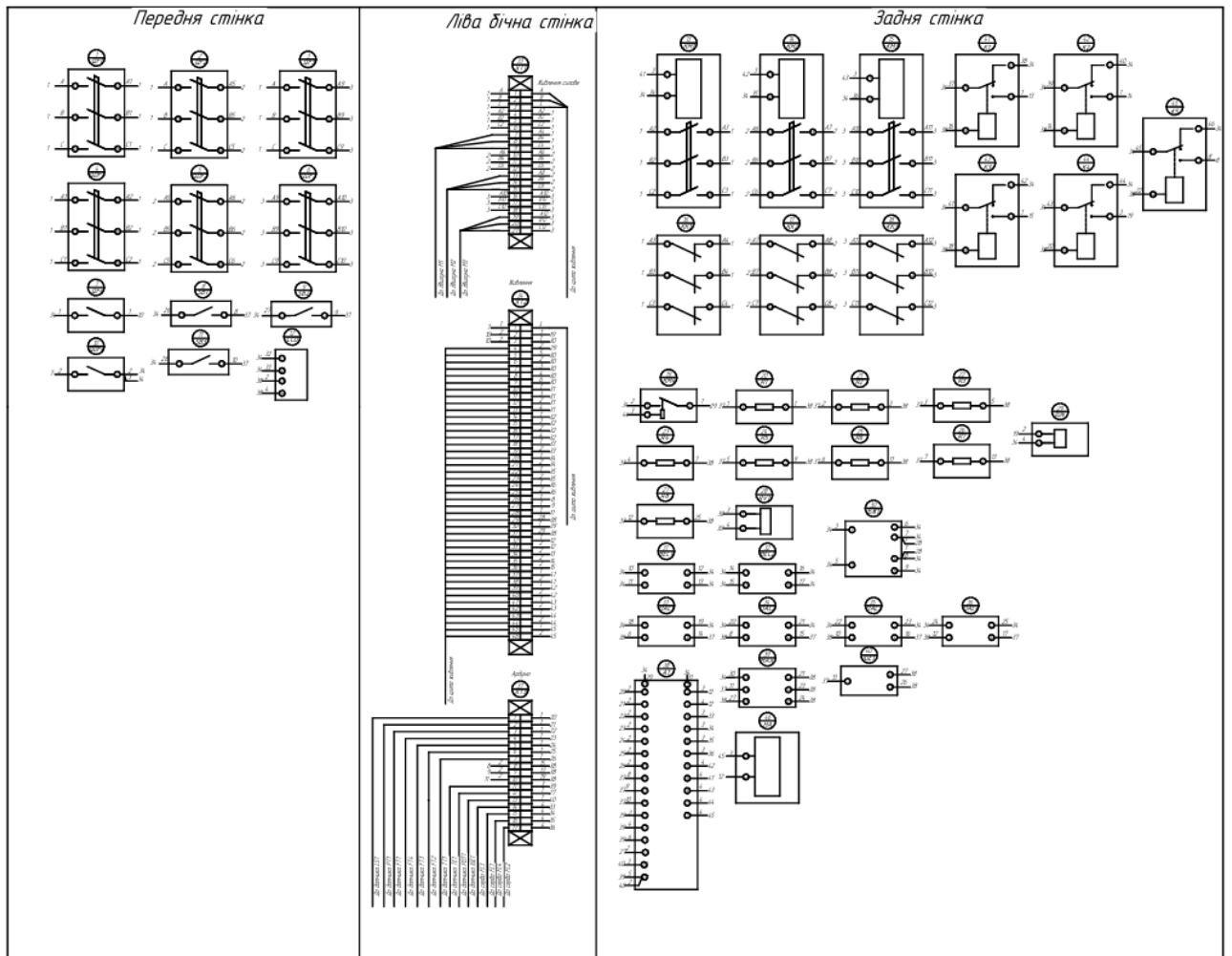
Додаток 1. Фрагмент функціональної схеми автоматизації



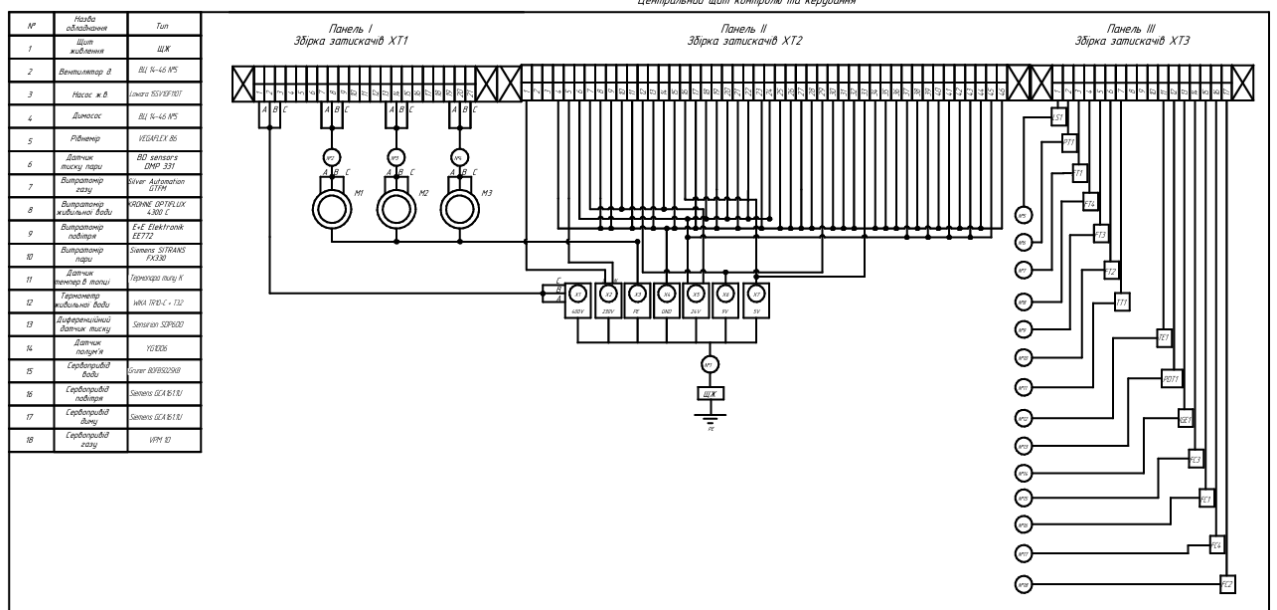
Додаток 2. Фрагмент схеми електричної принципової



Додаток 3. Фрагмент схеми електричної з'єднань



Додаток 4. Фрагмент схеми електричної підключень



Додаток 5. Посилання на файл коду в середовищі Arduino IDE

https://drive.google.com/drive/folders/1v7ar-Zz5NJPV2Kv6MG_DRPpouREqlvqb?usp=sharing



Додаток 6. Посилання на папку SCADA з програмою та інтерфейсом

<https://drive.google.com/drive/folders/1bEFNKUKf3Lj7HMkOcy7TdGAc65n5PMAA?usp=sharing>

