МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему:

## «АВТОМАТИЗАЦІЯ КОТЕЛЬНІ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ АДМІНІСТРАТИВНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА»

**Automation of Boiler House for Administrative and Production Rooms Heating at Industrial Enterprise**

Студент групи АВ-42 Янчук Анастасія Миколаївна
(*шифр*) (*прізвище, ім’я та по батькові*)

Керівник роботи: _____ /*проф.,д.т.н Євген ПІСТУН*/
(*підпис*)

Консультанти: _____ / *доц. Ігор КОСТИК* /
(*підпис*)

_____ / *доц. Ганна КРИХ* /
(*підпис*)

_____ / *доц. Юрій КІТ* /
(*підпис*)

_____ /*доц. Наталія МИХАЙЛИК* /
(*підпис*)

Завідувач кафедри: _____ /*проф.,д.т.н. Федір МАТІКО*/
(*підпис*)

Львів 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Інститут *ЕСК* Кафедра *АВКТ*
Спеціальність *151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"*

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри *АВКТ*
*д.т.н., проф. Федір МАТІКО*

"____" _____ 20 ____ р.

# ЗАВДАННЯ
# НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТІ СТУДЕНТОВІ

*Янчук Анастасія Миколаївна*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Автоматизація котельні для опалення адміністративних та виробничих приміщень промислового підприємства*
затверджена наказом по університету від "*26*" *травня* 2025 р., № *1766-4-08*

2. Термін здачі студентом закінченої роботи "*13*" *червня* 2025 р.

3. Вихідні дані для роботи:
*1. Технологічна схема*
*2. Опис технологічного процесу*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які належить розробити):
*Вступ*
*1. Аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування*
*2. Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації*
*3. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації*
*4. Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації*
*5. Програмне забезпечення системи автоматизації*
*6. Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації*
*7. Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання температури прямого мережевого теплоносія*
*8. Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації*
*9. Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації*
*Висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
*1. Функціональна схема автоматизації*
*2. Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації*
*3. Принципова електрична схема з'єднань засобів автоматизації*
*4. Моделювання системи автоматичного регулювання температури прямого мережевого теплоносія*

6. Консультанти роботи:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| *Економіки* | *доц. Наталія МИХАЙЛИК* | | |
| *Охорони праці* | *доц. Юрій КІТ* | | |
| *Моделювання* | *доц. Ганна КРИХ* | | |
| *Мікропроцесорних програмованих засобів автоматизації* | *доц. Ігор КОСТИК* | | |

7. Дата видачі завдання: *19 травня 2025р.*

Керівник роботи: _____ /*д.т.н., проф. Євген ПІСТУН* /
(підпис)

Завдання прийняв до виконання: _____ / *Анастасія ЯНЧУК* /
(підпис)

Календарний план

| № п/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1.* | *Вступ* | *21.05.2025р.* | |
| *2.* | *Аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування* | *21.05.2025р.* | |
| *3.* | *Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації* | *22.05.2025р.* | |
| *4.* | *Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації* | *23.05.2025р.* | |
| *5.* | *Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації* | *26.05.2025р.* | |
| *6.* | *Програмне забезпечення системи автоматизації* | *28.05.2025р.* | |
| *7.* | *Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання температури прямого мережевого теплоносія* | *30.05.2025р.* | |
| *8.* | *Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації* | *02.06.2025р.* | |
| *9.* | *Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації* | *05.06.2025р.* | |
| *10.* | *Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації* | *10.06.2025р.* | |
| *11.* | *Висновки* | *12.06.2025р.* | |

Студент: _____ / *Анастасія ЯНЧУК* /
(підпис)

Керівник роботи: _____ / *проф.,д.т.н Євген ПІСТУН*/
(підпис)

# АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто комплексне завдання автоматизації водогрійної котельні, що складається з двох котлів Viessmann Vitoplex 100 загальною потужністю 1900 кВт. Котельня забезпечує теплопостачання адміністративних і виробничих приміщень промислового підприємства. Робота спрямована на проєктування сучасної системи керування технологічним процесом із використанням програмованого логічного контролера. Основне завдання полягало в забезпеченні енергоефективної, надійної та безпечної експлуатації котельного обладнання за рахунок впровадження автоматизованого управління.

У першому розділі виконано аналіз технологічного процесу як об’єкта керування. Надано опис обладнання котельні, принципу роботи котлів, пальникових пристроїв, схеми циркуляції теплоносія. Проведено розрахунок теплового й матеріального балансу, визначено номінальні параметри процесу, розроблено структурну схему взаємозв’язків між параметрами.

У другому розділі обґрунтовано вибір координат автоматизації — вимірювань, сигналізації, захисту й регулювання. Розглянуто можливі варіанти схем керування, порівняно їх технічні та економічні показники. Розроблено спрощену функціональну схему, що поєднує каскадне регулювання температури зворотного та прямого теплоносія і стабілізацію тиску газу.

У третьому розділі обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації — вимірювальних перетворювачів температури, тиску, виконавчих механізмів, електроприводів та програмованого логічного контролера Unitronics Vision V570. Подано специфікацію обраного обладнання.

У четвертому розділі представлено розгорнуту функціональну схему автоматизації із зазначенням контурів регулювання, зворотних зв’язків та взаємодії із ПЛК. Наведено опис роботи схеми та розроблено розгорнуту функціональну схему автоматизації, яка представлена на аркуші 1 графічних матеріалів.

У п’ятому розділі розроблено алгоритм функціонування програмованого засобу автоматизації та його програмне забезпечення, яке представлене на аркуші 2 графічних матеріалів. Надано пояснення до логіки ПІД-регулювання, обробки аварій, керування клапанами та помпами.

У шостому розділі подано принципову електричну схему з’єднання технічних засобів автоматизації, що забезпечує живлення, обмін сигналами та захист елементів системи. Принципова електрична схема представлена на аркуші 3 графічних матеріалів.

У сьомому розділі виконано моделювання системи автоматичного регулювання температури прямого теплоносія в MATLAB/Simulink. Побудовано модель об’єкта, досліджено перехідні процеси й отримано показники якості регулювання.

У восьмому розділі проаналізовано питання охорони праці під час впровадження автоматизації. Наведено технічні рішення безпечної експлуатації, виробничої гігієни, мікроклімату, освітлення та пожежної безпеки.

У дев’ятому розділі обґрунтовано економічну доцільність впровадження системи автоматизації. Показано зменшення витрат палива, зниження експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності та окупність проєкту.

## ANNOTATION

The bachelor's qualification work considers the complex task of automating a boiler house, consisting of two Viessmann Vitoplex 100 boilers with a total capacity of 1900 kW. The boiler house provides heat supply to the administrative and production premises of an industrial enterprise. The work is aimed at designing a modern process control system using a programmable logic controller. The main task was to ensure energy-efficient, reliable and safe operation of boiler equipment through the implementation of automated control.

In the first chapter, an analysis of the technological process as a control object is performed. A description of the boiler house equipment, the principle of operation of boilers, burner devices, and the coolant circulation scheme are provided. The heat and material balance is calculated, the nominal process parameters are determined, and a structural diagram of the relationships between the parameters is developed.

In the second chapter, the choice of automation coordinates is justified - measurements, signaling, protection and regulation. Possible control scheme options are considered, their technical and economic indicators are compared. A simplified functional scheme has been developed that combines cascade temperature control of the return and direct coolant and gas pressure stabilization.

The third chapter justifies the choice of technical means of automation - measuring transducers of temperature, pressure, actuators, electric drives and programmable logic controller Unitronics Vision V570. The specification of the selected equipment is given.

The fourth chapter presents a detailed functional diagram of automation indicating the control loops, feedback and interaction with PLC. A description of the operation of the circuit is provided and a detailed functional diagram of automation has been developed, which is presented on sheet 1 of the graphic materials.

In the fifth chapter, an algorithm for the functioning of a programmable automation tool and its software are developed, which is presented on sheet 2 of graphic materials. The logic of PID control, handling of accidents, control of valves and pumps is explained.

The sixth chapter presents a schematic electrical diagram of the connection of technical means of automation, which provides power supply, signal exchange and protection of system elements. The schematic electrical diagram is presented on sheet 3 of the graphic materials.

The seventh chapter models the system of automatic temperature control of direct coolant in MATLAB/Simulink. A model of the facility was built, transient processes were studied, and control quality indicators were obtained.

The eighth chapter analyzes the issue of labor protection during the implementation of automation. Technical solutions for safe operation, industrial hygiene, microclimate, lighting, and fire safety are presented.

The ninth chapter substantiates the economic feasibility of implementing the automation system. It shows a reduction in fuel consumption, a decrease in operating costs, an increase in energy efficiency, and a return on investment for the project.

# ЗМІСТ

ВСТУП ..... 12
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ..... 14
1.1 Опис технологічного процесу ..... 14
1.2 Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу ..... 19
1.3 Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта ..... 21
1.4 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень ..... 23
1.5 Технологічна карта ..... 25
1.6 Розробка структурної схеми взаємозв'язків параметрів об'єкта керування ..... 26
2. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 29
2.1 Аналіз характеристик взаємозв'язку між параметрами об'єкта керування ..... 29
2.2 Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування ..... 30
2.3 Визначення функціональних ознак системи автоматизації ..... 32
2.4 Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом ..... 33
3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 36
3.1 Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми ..... 36
3.1.1 Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів 36
3.1.2 Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів ..... 39
3.2 Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації ..... 52
3.2.1 Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик ..... 52
3.2.2 Конфігурування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації ..... 60
3.3 Специфікація технічних засобів автоматизації ..... 63
4. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС ..... 66
5. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 69
5.1 Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації ..... 69
5.2 Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації ..... 81
6. ПРИНЦИПОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 93

7. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРЯМОГО МЕРЕЖЕВОГО ТЕПЛОНОСІЯ ..... 101
7.1 Побудова моделі об’єкта керування ..... 103
7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання ..... 107
7.3 Параметрична оптимізація системи регулювання ..... 108
7.4 Дослідження перехідних процесів в САР ..... 114
8. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 121
Вступна частина ..... 121
8.1. Технічні рішення щодо безпечної експлуатації засобів автоматизації ..... 122
8.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії ..... 124
8.2.1. Мікроклімат ..... 124
8.2.2. Склад повітря робочої зони ..... 127
8.2.3. Виробниче освітлення ..... 128
8.2.4. Виробничий шум ..... 128
8.2.5. Виробничі вібрації ..... 129
8.2.6. Виробничі випромінювання ..... 130
8.3. Пожежна безпека ..... 130
8.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі ..... 130
8.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту ..... 132
9. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ..... 135
ВИСНОВКИ ..... 142
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ..... 143

# ВСТУП

Сучасне промислове підприємство потребує стабільного та ефективного джерела теплової енергії, яке забезпечує опалення, вентиляцію, підігрів води та підтримку температурних режимів у технологічних процесах. Основним джерелом такого теплопостачання в багатьох випадках залишаються котельні установки, які працюють на різних видах палива — найчастіше на природному газі. Для забезпечення надійності, економічності та безпеки експлуатації котелень необхідно впроваджувати сучасні засоби автоматизації.

Автоматизація котельних установок дозволяє забезпечити точне регулювання параметрів температури та тиску, зменшити витрати палива, підвищити безпеку обслуговування, а також оптимізувати роботу персоналу. Завдяки автоматизованим системам керування можливо реалізувати адаптивне регулювання в залежності від погодних умов, навантаження на систему або аварійних ситуацій. Особливої актуальності набуває автоматизація котелень у великих промислових і адміністративних об’єктах, де безперервне теплопостачання має критичне значення.

З технічної точки зору, сучасна система автоматизації котельні включає в себе вимірювальні перетворювачі температури, тиску, витрати, електроприводи клапанів, насосне обладнання та програмовані логічні контролери (ПЛК), які забезпечують зчитування сигналів, їх обробку та генерацію команд для виконавчих механізмів. Такі системи дозволяють реалізовувати складну логіку керування: підтримку заданої температури теплоносія, плавне вмикання та вимикання насосів, контроль роботи котлів і теплових ланцюгів, а також формування аварійних сповіщень.

У якості основного пристрою керування в таких системах часто використовуються промислові контролери, що забезпечують як роботу з аналоговими та дискретними сигналами, так і виконання регуляторних функцій. Одним із таких сучасних пристроїв є контролер Unitronics Vision V570 — мікропроцесорна система з вбудованим сенсорним дисплеєм, яка дозволяє

створювати повноцінні системи керування без використання окремого SCADA-комплексу. Контролер підтримує роботу з аналоговими модулями введення/виведення, цифровими входами й виходами, дозволяє реалізовувати ПІД-регулятори, вести архів подій та забезпечувати інтерфейс взаємодії з оператором.

Автоматизована система будується за принципом багаторівневого керування. На нижньому рівні розташовані давачі, виконавчі механізми та модулі збору інформації. Середній рівень включає програмовані логічні контролери, які реалізують логіку керування. Верхній рівень — це панель оператора або система візуалізації, яка дозволяє контролювати параметри системи та вносити зміни до режимів її роботи. У рамках котельні така система забезпечує автоматичне підтримання температури води на виході з котлів, контроль тиску в системі, управління циркуляційними насосами, роботу електроприводів клапанів підмішування та формування аварійних сигналів у випадку виходу параметрів за допустимі межі.

Таким чином, автоматизація котельних установок є комплексною задачею, що вимагає врахування теплотехнічних, електротехнічних та програмних аспектів. Використання сучасного обладнання дозволяє не лише підвищити ефективність роботи котельні, а й забезпечити її відповідність сучасним вимогам до енергоефективності, безпеки та зручності обслуговування. Розробка таких систем є важливою інженерною задачею, яка має велике практичне значення для підприємств різного профілю.

# РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## 1.1 Опис технологічного процесу

Котельна установка – це комплекс обладнання, призначений для отримання теплоносія (пари чи гарячої води) під тиском вище атмосферного з метою забезпечення споживачів тепловою енергією [2]. До складу котельної установки входять: котельний агрегат (основне обладнання) та допоміжне обладнання. Основне котельне обладнання включає власне котел, топковий пристрій (пальник), а також конструктивні елементи котла – корпус, обмурівка, теплоізоляція, металевий каркас з майданчиками для обслуговування. Допоміжне обладнання забезпечує роботу котла і включає дуттєві вентилятори для подачі повітря в топку, димососи для видалення продуктів згоряння, живильні та циркуляційні насоси для подачі й повернення води, системи хімводопідготовки, системи подачі палива, пристрої для видалення золи та шлаку, димові канали і труби. Для газового палива до допоміжного обладнання також належить газорегуляторний пункт (вузол підготовки і пониження тиску газу перед пальником) [3].

За функціональним призначенням і видом теплоносія розрізняють декілька типів котлів: парові котли генерують пару для технологічних потреб або турбін; водогрійні котли нагрівають воду під тиском і забезпечують опалення та гаряче водопостачання; існують також комбіновані пароводогрійні котли, що можуть одночасно виробляти пару і гарячу воду [2]. Окремо виділяють спеціалізовані котли за особливостями використання: енерготехнологічні котли – парові або водогрійні агрегати, у топці яких здійснюється переробка технологічних матеріалів або відходів; утилізаційні котли – парові чи водогрійні котли без власної топки, що використовують тепло відпрацьованих газів інших установок [6]. Окрему категорію становлять електричні котли, які для нагріву води або отримання пари використовують електроенергію – найбільш екологічно чистий, але дорогий спосіб отримання тепла. Наведена класифікація визначає область застосування: парові

котли широко використовуються в енергетиці та промислових технологічних процесах, водогрійні – в системах опалення та гарячого водопостачання будівель, котли-утилізатори – в енерго-технологічних схемах для підвищення ефективності установок, енерготехнологічні – в промислових виробництвах з утилізацією тепла горючих відходів тощо [2].

Водогрійна котельна установка призначена для нагріву води, яка циркулює через систему опалення або теплопостачання. Центральним елементом є водогрійний котел – теплообмінний апарат, де хімічна енергія палива перетворюється на теплову і передається воді-теплоносію [3]. Газова котельня, оснащена двома сталевими водогрійними котлами Viessmann Vitoplex 100, – це сучасний двоходовий жаротрубний котел, розрахований на роботу на природному газі. Змодельоване зображення котельні з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 itoplex 100 представлено на рисунку 1.1. Конструкція котла являє собою горизонтальний циліндричний корпус з водяною сорочкою, всередині якого розміщено топкову камеру і пучок жарових труб. Пальник, встановлений на передніх дверцятах котла, подає у топку суміш природного газу та повітря для спалювання. Під час роботи пальника в топковій камері утворюється факел полум’я, продукти згоряння рухаються через котел двома ходами: спочатку вздовж довжини топки, потім розвертаються у задній частині котла через поворотну камеру і проходять через систему жарових труб назад до передньої частини – до вихідного патрубка димоходу. Таким чином, теплота від гарячих продуктів згоряння передається воді через стінки топки та труби. Вода омиває зовнішню поверхню топки і труб, інтенсивно нагріваючись до необхідної температури [1].

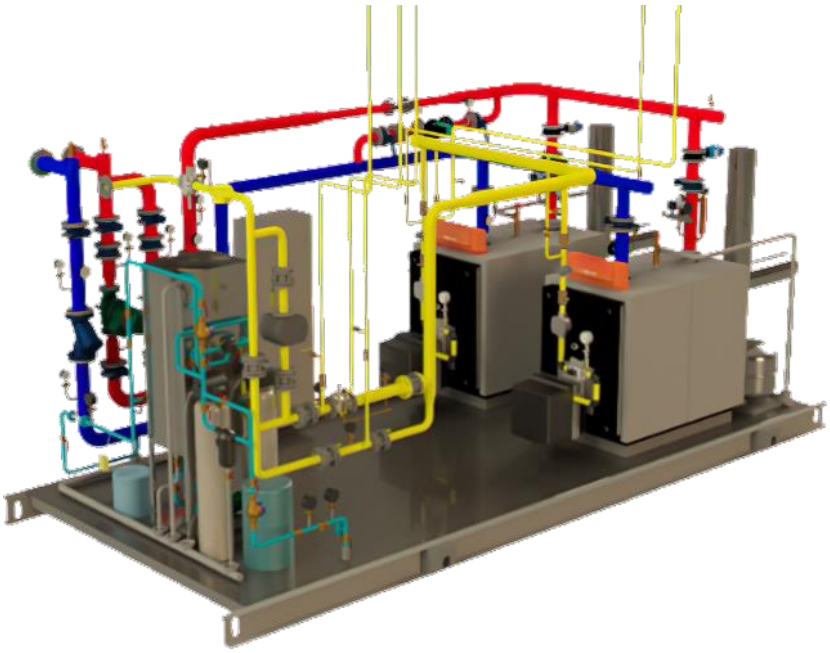


*Рисунок 1.1 Змодельоване зображення котельної установки з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 [35]*

Котел Vitoplex 100 має ряд конструктивних особливостей, які забезпечують ефективну і стабільну роботу. Завдяки великому водяному об'єму та значним розмірам теплообмінних поверхонь цей котел не потребує мінімальної циркуляції води через котел – великі водяні канали і об'єм води гарантують достатній природний теплообмін навіть при змінних витратах. Це спрощує гідравлічне під'єднання котла і дозволяє працювати в широкому діапазоні навантажень без ризику локального перегріву. Котел виконаний за двоходовою схемою з реверсивним рухом димових газів; завдяки порівняно низькому тепловому навантаженню на камеру згоряння досягається повніше і "м'якше" згоряння палива, що знижує утворення оксидів азоту ($NO_x$) в продуктах згоряння. Таким чином, Vitoplex 100 поєднує високу ефективність теплообміну (нормативний ККД на газі до 94 %) із екологічністю горіння. Конструкція передбачає теплоізольований корпус, передні дверцята, що відкриваються для ревізії та очищення поверхонь нагріву, вмонтовані штуцери для монтажу давачів температури і тиску, запобіжні клапани, патрубки для подачі зворотної води [1].

Принцип роботи водогрійної котельної установки зводиться до наступного циклу: пальник спалює паливо в топці котла, тепло від продуктів згоряння через

теплообмінні поверхні передається воді. Нагрітий у котлі теплоносій направляється по подаючому трубопроводу до системи споживачів тепла (наприклад, система опалення будівлі або теплообмінники гарячого водопостачання). Віддавши частину тепла споживачам – радіаторам, калориферам, бойлерам тощо – охолоджена вода повертається по зворотному трубопроводу назад у котел для повторного нагріву. Циклічність цього процесу забезпечує безперервну подачу тепла до споживачів при стабільній роботі котельного обладнання [3].

У водогрійній котельні реалізовано замкнутий цикл циркуляції води. Подаючий трубопровід відбирає гарячу воду з верхньої частини котла, де знаходиться вихідний колектор, і транспортує її до теплової мережі чи безпосередньо до опалювальних приладів. На подачі можуть встановлюватися запірні та регулювальні клапани, а також давачі тиску і температури для контролю параметрів теплоносія. Зворотний трубопровід подає охолоджену воду від споживачів назад у котел, як правило, в нижню зону котла, щоб нагріти цю воду повторно. Рух води забезпечується циркуляційними насосами[3].

Котельня обладнана системою автоматизації, яка включає давачі і виконавчі механізми, що забезпечують безпечну та економічну роботу. До обов’язкових приладів належать: давачі температури води на виході з котла і на зворотi, давачі тиску теплоносія в системі, манометри, термометри, а також запобіжний клапан (спрацьовує при перевищенні допустимого тиску). Для контролю безпечного рівня води у водогрійних котлах встановлено давачі мінімального рівня[2].

Оскільки вода при нагріванні змінює свій об’єм, в замкнутому контурі котельні необхідно компенсувати теплове розширення теплоносія. Для цього служить розширювальний бак. У сучасних закритих системах опалення застосовують закриті розширювальні баки мембранного типу (герметичні посудини з гнучкою мембраною), які частково заповнені повітрям. При нагріві води надлишковий об’єм надходить у бак, стискаючи газ за мембраною, а при охолодженні – вода повертається в систему, підтримуючи стабільний тиск. Розширювальний бак запобігає небезпечному зростанню тиску в системі і

виключає втрати теплоносія через скидання. Його об’єм розраховується виходячи з повного об’єму води в системі та діапазону робочих температур [3].

У котельні також наявна трубопровідна арматура: запірна – для відсікання окремих ділянок, регулююча – для підтримання необхідної температури і витрати, зворотні клапани – перешкоджають зворотному потоку, запобіжні клапани тощо. Встановлюються також давач контролю загазованості в котельні, які сигналізують про витік газу і можуть автоматично відключити подачу газу аварійним клапаном[3].

Сучасна водогрійна котельня оснащена системою автоматичного керування, що забезпечує підтримання заданих режимів роботи, безпечну експлуатацію і швидке реагування на зміну умов або аварійні ситуації. У даному проекті передбачено застосування програмованого логічного контролера Unitronics Vision V570 як центрального елемента системи керування[4].

Пальник базується на сукупності запатентованих технологій, що забезпечують повну інтеграцію всіх необхідних для безпечної та ефективної роботи функцій без потреби у зовнішній системі автоматизації. Основою є багатозональна пальникова система multiflam®, у якій завдяки спеціальному осердю та структурі первинного й вторинного повітря відбувається інтенсивне перемішування палива та повітря, що гарантує стійке, низькоемісійне полум’я в широкому діапазоні навантажень [5].

У середині корпусу пальника розташований «менеджер горіння» (Fire Manager W-FM100/200), що поєднує в собі регулятор співвідношення повітря і палива, модулюючий регулятор потужності та систему контролю полум’я. Вбудований контролер акумулює дані від давача кисню (λ-зонд), давачів температури димових газів та тиску, автоматично оптимізує співвідношення палива і повітря під поточне навантаження й постійно підтримує задані екологічні параметри. Завдяки цьому пальник самодостатній: він сам керує як паливними, так і повітряними потоками і підтримує стійкість полум’я без зовнішніх ПЛК чи додаткових модулів [5].

Політика виробника Weishaupt передбачає, що кожен пальник проходить заводське налаштування під конкретний котел і тип палива; під час монтажу оператор лише встановлює бажані екологічні та потужні режими на вбудованій клавіатурі з текстовим меню. Базова логіка включає в себе безпечні послідовності розпалювання, попередню продувку, самоконтроль давачів та аварійне відключення при втраті полум'я або тиску[5].

### 1.2 Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу

На ефективність, стабільність і безперебійну роботу котельної установки впливає широкий спектр факторів, які мають як технічну, так і зовнішню природу. Сукупний вплив цих чинників визначає динаміку перебігу технологічного процесу нагріву теплоносія, його циркуляції та передачі теплової енергії споживачам [7].

Одним із ключових чинників, що прямо визначає навантаження на котельню, є метеорологічні умови, зокрема температура зовнішнього повітря. Зі зниженням температури на вулиці зростає теплоспоживання з боку будівель, що змушує котли працювати з більшим навантаженням. Окрім температури, суттєвий вплив мають вологість, швидкість вітру та атмосферний тиск. Наприклад, підвищена вологість і сильний вітер збільшують тепловтрати через огороджувальні конструкції будівель. Коливання атмосферного тиску, своєю чергою, впливають на стабільність тяги у димовідвідних каналах, що може змінювати режим горіння палива [8].

Якість та параметри палива також мають суттєве значення. У разі використання газу вирішальну роль відіграє його калорійність. Відхилення у теплоті згоряння без відповідного коригування призводять до зміни фактичної теплової потужності котлів. Крім того, стабільність тиску в газовій магістралі визначає рівномірність подачі палива до пальника. Важливою умовою також є чистота палива, оскільки наявність механічних домішок або вологи призводить до порушення процесу горіння та збільшення відкладень у пальниковій камері.

Важливим технічним параметром є якість теплоносія, зокрема його хімічний склад. Висока жорсткість води сприяє утворенню накипу на поверхнях теплообмінника, що значно знижує ефективність теплопередачі. Надлишкова

кількість розчиненого кисню призводить до корозійного пошкодження трубопроводів та котлових елементів. Для забезпечення стабільної роботи також важливо підтримувати температурні показники живильної води в межах проєктних норм. Застосування інгібіторів корозії є обов’язковим для продовження терміну служби системи [7].

Технічний стан обладнання котельні безпосередньо впливає на стабільність процесу. Наявність забруднень на поверхнях теплообміну, зношеність насосного устаткування, негерметичність арматури або запірних пристроїв – усе це може призвести до порушення циркуляції, втрати тиску, зниження ККД котлів та частих аварійних зупинок. Особливо чутливою до зносу є система подачі та повернення теплоносія, в якій забруднення фільтрів або погано налагоджені регулятори викликають несиметричну роботу контурів [7].

Організаційно-експлуатаційні фактори також чинять суттєвий вплив. Невірно обраний режим роботи, наприклад, надмірна частота пусків та зупинок пальників, прискорює знос електрообладнання і підвищує ризик аварій. Невчасне виконання технічного обслуговування або помилки обслуговуючого персоналу, зокрема під час сезонного перемикання режимів, часто є причиною серйозних порушень у роботі системи. Важливо підкреслити, що рівень кваліфікації персоналу об'єкта має безпосередній вплив на ефективність налаштувань автоматики та виконання регламентів [7].

Окрему увагу слід приділити теплотехнічним втратам. Вони виникають як внаслідок недостатньої теплоізоляції обладнання, так і внаслідок конструктивних недоліків будівлі котельні. Конвективні втрати, а також втрати через неізольовані ділянки трубопроводів можуть досягати значних величин, особливо у зимовий період, що змушує котли працювати з підвищеним навантаженням [8].

На технологічний процес впливають також зовнішні регуляторні обмеження. До них належать екологічні вимоги щодо викидів шкідливих речовин, обмеження газопостачальної компанії на обсяги споживання газу, а також економічні чинники, зокрема динаміка тарифів на енергоносії. Усі ці умови потребують гнучкої адаптації роботи системи та впровадження програм енергоменеджменту.

Можливість виникнення аварійних ситуацій, таких як зникнення електроживлення, вихід з ладу котла або насосного агрегату, екстремальні погодні явища, також слід враховувати. Усі перелічені фактори вимагають наявності ефективної системи резервування, сигналізації та швидкого реагування, що забезпечується відповідною автоматизованою логікою в контролері та функціями дублювання ключових елементів [7].

Таким чином, перебіг технологічного процесу в котельній установці залежить від багатьох взаємопов’язаних факторів, кожен з яких потребує врахування при проєктуванні, налаштуванні та експлуатації обладнання. Комплексний підхід до оцінки впливу зовнішніх і внутрішніх чинників дозволяє забезпечити стабільну, безпечну та енергоефективну роботу котельної установки в умовах змінного навантаження та навколишнього середовища [7].

## 1.3 Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта

Балансні розрахунки є невід’ємною частиною техніко-економічного обґрунтування ефективної роботи котельної установки. Вони дозволяють кількісно оцінити вхідні та вихідні потоки енергії та речовини, виявити джерела втрат, а також визначити рівень енергетичної ефективності технологічного процесу. У цьому розділі наведено розрахунок матеріального та теплового балансу котельної установки, що працює на природному газі та забезпечує теплопостачання адміністративного і виробничого приміщення.

Матеріальний баланс базується на законі збереження маси та встановлює співвідношення між речовинами, що надходять до системи, та тими, що з неї виходять. Для котельної установки розглядаються два основних потоки: паливо (газ) та теплоносій (вода).

*Визначення витрати природного газу*

Витрату природного газу визначають згідно з розрахунковим тепловим навантаженням за формулою:

$$G_{газ} = \frac{Q_{тпк}}{q_н}, \tag{1.1}$$

де $G_{газ}$ — витрата природного газу, м³/год;

$Q_{тпк}$ — теплова потужність котельні, кВт (у нашому випадку — 1900 кВт);

$q_н$ — нижча теплота згоряння природного газу, кВт·год/м³ (для України приймається ≈ 9,3 кВт·год/м³).

*Матеріальний баланс теплоносія*

Теплоносієм у системі виступає вода, яка циркулює по замкненому контуру. У сталому режимі роботи (при відсутності витоків) матеріальний баланс по теплоносію має вигляд:

$$G_{вх} = G_{вих}, \tag{1.2}$$

де $G_{вх}$ — витрата води на вході в котел, кг/с;

$G_{вих}$ — витрата води після проходження через систему, кг/с.

Ця рівність відображає герметичність системи і збереження маси теплоносія при циркуляції в контурі.

Тепловий баланс характеризує розподіл енергії в системі: скільки тепла отримано при спалюванні палива, скільки передано теплоносію, і які є втрати.

Загальна формула теплового балансу:

$$Q_{пал} = Q_{корисне} + Q_{втрати} \tag{1.3}$$

*Корисно використана теплота*

Корисна теплота — це теплова енергія, передана теплоносію. Вона визначається за формулою:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \tag{1.4}$$

де $Q$ — теплова потужність, Вт;

$G$ — масова витрата води, кг/с;

$c$ — питома теплоємність води (≈ 4180 Дж/кг·°C);

$t_1, t_2$ — температури на виході та вході в котел відповідно, °C.

*Коефіцієнт корисної дії (ККД) котла*

ККД котла визначається як відношення корисної теплоти до теплоти згоряння палива:

$$\eta = \frac{Q_{корисне}}{Q_{пал}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

Альтернативно (при визначенні через втрати):

$$\eta = 1 - (q_1 + q_2 + q_3), \quad (1.6)$$

де $q_1$ — втрати теплоти з димовими газами, %;

$q_2$ — втрати від хімічної неповноти згоряння;

$q_3$ — втрати в навколишнє середовище (через оболонку, труби тощо).

Для сучасних водогрійних котлів, таких як Viessmann Vitoplex 100, ККД становить близько 93–95 % у номінальному режимі [9].

## 1.4 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень

Для роботи котельної установки з двома водогрійними котлами Viessmann Vitoplex 100 було обрано високотемпературний режим роботи, що дозволяє забезпечити необхідне теплопостачання навіть за мінусових температур зовнішнього повітря. Обґрунтування номінальних значень технологічних параметрів ґрунтується на характеристиках обладнання, теплових потребах споживачів і вимогах до безпеки експлуатації.

По-перше, температура подачі теплоносія у котельному контурі встановлена на рівні +90 °C при розрахунковій зовнішній температурі –20 °C, а температура зворотної лінії – +70 °C. Такі параметри відповідають температурному графіку 90/70 °C, який є типовим для систем централізованого теплопостачання у місті Львів відповідно до кліматичних умов регіону. Графік, який представлено на рисунку 1.2, забезпечує достатній температурний напір у системі опалення, водночас захищаючи котли від термічних ударів і знижуючи теплові втрати в трубопроводах.

В умовах зміни зовнішньої температури погодозалежна автоматика автоматично коригує температурний режим. Зокрема, при підвищенні зовнішньої температури до –5 °C, згідно з температурним графіком для Львова, температури подачі і звороту зменшуються відповідно до 70/65 °C. Допустимі відхилення температур становлять ±5 °C для подачі та ±3 °C для зворотної лінії при –20 °C, а при –5 °C ці допуски звужуються до ±4 °C (подача) та ±2 °C (зворот) [36].

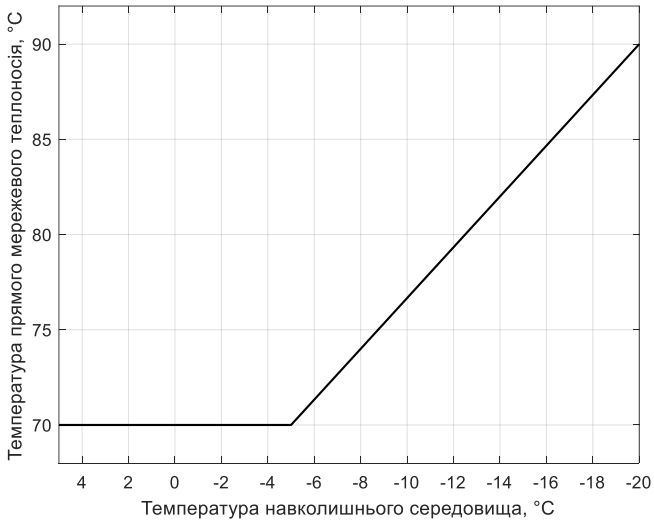



*Рисунок 1.2 Температурний графік 90/70 °C для системи теплопостачання м. Львів*

По-друге, тиск у подаючій магістралі котла прийнятий рівним 6 бар, у зворотній – 5 бар. У системі розподілу теплоносія в номінальному режимі підтримується на рівні 2,5/1,5 бар. Ці значення забезпечують стабільну циркуляцію та нормальну роботу всіх насосних агрегатів. Допустимі відхилення тиску в котловому контурі складають ±0,3 бар, у розподільчому – ±0,2 бар; у разі перевищення цих меж спрацьовує аварійна сигналізація та відбувається безпечне відключення котла [1].

По-третє, номінальна витрата теплоносія через котельний контур спроектована на рівні 55 т/год (≈ 15 кг/с), що відповідає сумарній тепловій потужності 1900 кВт і перепаду температур 20°  (90–70 °C). Коливання витрати понад ±10 % від номіналу можуть свідчити про засмічення фільтрів або неполадки

в насосах і вимагають термінового технічного втручання та налаштування системи керування [1].

Щодо номінального теплового навантаження, воно визначене як 1900 кВт згідно з технологічним розрахунком потреб у теплі для опалення виробничих і адміністративних приміщень та забезпечення вентиляції; допустиме відхилення не перевищує ±5 % від цієї величини. Перевищення навантаження більше ніж на 10 % може стати причиною критичного зростання витрат палива й перевантаження обладнання, тоді як зниження більше ніж на 15 % призводить до нестабільної роботи пальників і погіршення теплорозподілу.

Окрему роль відіграє об’єм розширювального бака, вибір якого обґрунтовано параметрами термічного розширення теплоносія. Для підтримки тиску в межах 1,5–2,5 бар обрано робочий об’єм 350л. Така ємність забезпечує компенсацію температурного розширення при зміні температури від 70°C до 90°C і попереджає спрацьовування захисного клапана [12].

## 1.5 Технологічна карта

*Таблиця 1.1*

Технологічна карта

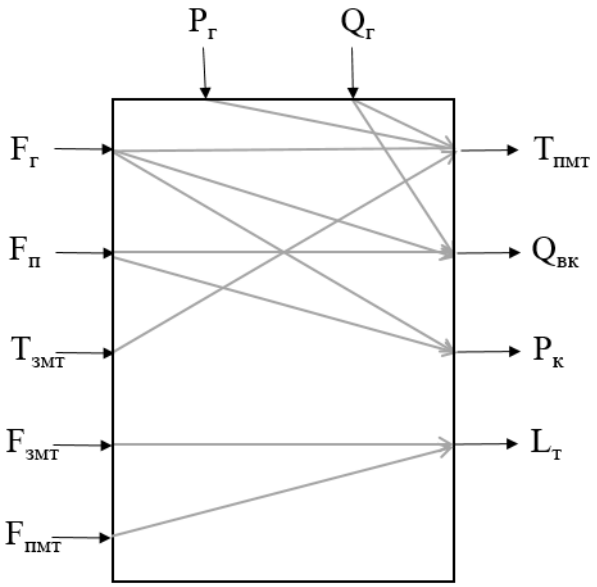
| № | Параметр | Одиниця вимірювання | Номінальне значення | Допустимі відхилення |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Номінальна теплова потужність котельні | кВт | 1900 | - |
| 2 | Допустима робоча температура на виході з котла | °C | 90 | ± 5 |
| 3 | Допустима робоча температура на вході в котел | °C | 70 | ± 3 |
| 4 | Тиск у подаючому трубопроводі котлів | бар | 6 | ± 0,5 |
| 5 | Тиск у зворотному трубопроводі котлів | бар | 5 | ± 0,5 |
| 6 | Об’єм розширювальних баків | л | 350 | - |

*Продовження таблиці 1.1*

| № | Параметр | Одиниця вимірювання | Номінальне значення | Допустимі відхилення |
|---|---|---|---|---|
| 7 | Тиск у подаючому трубопроводі системи опалення | бар | 2,5 | ± 0,3 |
| 8 | Тиск у зворотному трубопроводі системи опалення | бар | 1,5 | ± 0,3 |
| 9 | Температура теплоносія від системи опалення | °С | Згідно температурного графіка 90/70 | ±1 |
| 10 | Номінальна витрата газу | нм³/год | 221,9 | - |
| 11 | Тиск газу в газопроводі | бар | 0,02 - 0,1 | ± 0,001 |
| 12 | Витрата теплоносія через котли | м³/год | 59 | |
| 13 | Концентрація чадного газу в приміщенні котельні | % | 0,005 | ± 0,0002 |
| 14 | Концентрація метану в приміщенні котельні | % | 1,2 | ± 0,05 |

## 1.6 Розробка структурної схеми взаємозв’язків параметрів об’єкта керування

Структурна схема дозволяє наочно відобразити, як взаємодіють окремі параметри управління, та полегшує розуміння складної динаміки об’єкта. Цей етап є ключовим у проєктуванні системи автоматизації, оскільки забезпечує чітке уявлення про внутрішню структуру та функціональні зв’язки керованого обладнання на всіх рівнях — фундамент для подальшої розробки і налаштування.




*Рисунку 1.2. Розроблена структурна схема взаємозв'язку параметрів об'єкта для котла Viessmann Vitoplex 100*

На рисунку 1.2 показано спрощену модель зв'язків між вхідними, збурюючими та вихідними величинами водогрійного котла Viessmann Vitoplex 100. У цій схемі виділено такі групи параметрів:

Вхідні величини:

- $F_г$ – витрата природного газу;
- $F_п$ – витрата повітря, що надходить у зону згоряння;
- $T_{змт}$ – температура зворотного мережевого теплоносія;
- $F_{змт}$ – витрата зворотного мережевого теплоносія;
- $F_{пмт}$ – витрата прямого мережевого теплоносія.

Збурення:

- $Q_г$ – теплотворна здатність природного газу;
- $P_г$ – тиск природного газу на вході в пальник.

Вихідні величини:

- $T_{пмт}$ – температура прямого мережевого теплоносія;
- $Q_{вк}$ – вміст кисню в продуктах згоряння;
- $P_к$ – тиск в паливні котла;
- $L_т$ – рівень води в котлі.

## Висновок

Перший розділ бакалаврської роботи узагальнює повний аналіз котельної установки як об’єкта автоматичного керування. Спочатку подано детальний опис технологічного процесу та складових котельні, далі проаналізовано зовнішні й внутрішні чинники, що впливають на її роботу. Проведено матеріальний і тепловий баланси, на підставі яких сформульовано номінальні експлуатаційні режими та допустимі відхилення. Окремо систематизовано основні характеристики обладнання у вигляді технологічної карти й побудовано структурну схему взаємозв’язків параметрів. Сукупність виконаних етапів створює необхідну інформаційну базу для подальшого проєктування системи автоматичного регулювання.

# РОЗДІЛ 2

# ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 2.1 Аналіз характеристик взаємозв’язку між параметрами об’єкта керування

У котельній установці з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 ключовими регульованими параметрами є температура прямого теплоносія, температура зворотного теплоносія та тиск газу на вході в пальник. Температурний контур працює за каскадною схемою, де первинним завданням є підтримка заданої температури подачі теплоносія. Вторинний контур — температура зворотного теплоносія — коригує перше завдання, що дозволяє компенсувати зміни теплового навантаження без надмірних коливань температури подачі.

Регулювання температури прямої лінії здійснюється за рахунок зміни витрати палива та коригування тиску газу, що подається пальнику. Знижений тиск газу зменшує теплову потужність пальника, що позначається на падінні температури прямої лінії. Водночас відсутність миттєвого коригування температури зворотного теплоносія може призвести до утворення конденсату в котлі і зниження ККД, оскільки надмірно холодна зворотна вода знижує температуру поверхонь теплообміну нижче температури роси продуктів згоряння.

Тиск газу на вході в пальник визначає кількість паливного потоку та ступінь підпалу, впливаючи на інтенсивність горіння. Добре відрегульований тиск забезпечує оптимальні умови пневматичного змішування палива та повітря, мінімізуючи втрати тепла у димоході та знижуючи викиди шкідливих речовин.

Гідравлічні характеристики системи опалення також взаємопов’язані з температурним контуром. Правильне балансування потоків у двоконтурній схемі дозволяє уникнути нерівномірного розподілу тепла між котлами та споживачами, а також знижує ризик замерзання холодного зворотного потоку в окремих ділянках

мережі. Централізоване гідравлічне вирівнювання гарантує однаковий тепловий внесок кожного котла і оперативне реагування на зміни споживання тепла [10].

Таким чином, взаємозв’язок трьох основних параметрів — температури прямого теплоносія з виходу котла, температури після розподільника та температури навколишнього повітря — реалізується через каскадне регулювання з урахуванням гідравлічних особливостей мережі. Така схема автоматичного керування забезпечує оптимальну ефективність роботи котлів, швидке відновлення заданих значень після збурень і мінімізацію втрат тепла в системі опалення [10].

## 2.2 Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування

У котельній установці з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 ключовими керованими параметрами є температура прямої та зворотної ліній теплоносія, а також тиск газу на вході в пальник. Для забезпечення точного й безпечного регулювання цих параметрів необхідно розташувати давачі та виконавчі механізми в тих точках, які найповніше відображають стан процесу і водночас дають змогу швидко впливати на критичні величини.

Першим етапом обґрунтування координат вимірювання є вибір місць для двох температурних первинних вимірювальних перетворювачів. Давач зворотної температури розміщений на зворотній магістралі безпосередньо перед входом у котли, що дозволяє фіксувати мінімальну температуру теплоносія до його повторного нагріву. Давачі температури теплоносія в прямій лінії встановлено: перший - на подавальному трубопроводі одразу за котлом, другий – після гідравлічного розподільника, щоб мати точні дані про фактичну температуру, яка надходить до споживачів. Таке розташування дає змогу ПЛК своєчасно коригувати витрату палива та температуру мережевого теплоносія для підтримання заданого температурного графіка.

Вимірювання тиску газу перед пальником організовано на газовому колекторі одразу за регулятором тиску. Це положення обране тому, що воно чітко відображає реальний робочий тиск перед форсунками пальника, без спотворень

гідравлічними втратами по газопроводах. Сигнал із цього давача надходить до ПЛК і використовується для регулювання тиску перед пальниками, а при виході тиску за встановлені межі – для аварійного припинення подавання палива.

Наступними ланками системи є клапани, що забезпечують безпосереднє регулювання витрати палива. Клапан подачі газу встановлено на відгалуженні газової магістралі та перед пальниками обох котлів, що дозволяє спільно або індивідуально змінювати витрату газу.

Регулювання температури теплоносія на вході в котел здійснюють за допомогою підмішування теплоносія на зворотній лінії кожного котла. Триходові регулюючі клапани підмішування теплоносія призначені для підтримання мінімальної зворотної температури теплоносія у заданому діапазоні: при зниженні температури вони відкриваються, підмішуючи гарячу воду із прямої лінії. Така схема регулювання дає змогу уникнути термічних ударів котлів і забезпечує плавне підтримання температурної різниці між подачею й зворотом теплоносія.

Реле перепаду тиску в циркуляційних насосах сповіщають про засмічення фільтрів чи зупинку насоса, а давач рівня в розширювальному баку сигналізує про недостатній об’єм води в системі.

Захист і блокування виконані за такими принципами: при перевищенні безпечних меж тиску, температури, рівня або ж загазованості приміщення ПЛК активує аварійне відключення пальника і закриття відсічного клапану, що встановлений на газопроводі.

Таким чином, обрана функціональна схема автоматизації з раціональними координатами вимірювань і виконавчих дій гарантує швидкий зворотний зв’язок між давачами температури, тиску та регулюючими клапанами, забезпечує безпеку експлуатації та дає змогу підтримувати номінальні параметри технологічного процесу в заданих межах.

## 2.3 Визначення функціональних ознак системи автоматизації

*Таблиця 2.1*

Функціональні ознаки системи автоматизації

| № | Обсяг автоматизації / Назва параметра | Показ | Реєстрація | Сигналізація | Дистанційне керування | Захист | Блокування | Автоматичне регулювання |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Тиск в газопроводі | + | + | + | + | + | | + |
| 2 | Концентрація метану в приміщенні котельні | | | + | | + | | |
| 3 | Концентрація чадного газу в приміщенні котельні | | | + | | + | | |
| 4 | Рівень теплоносія в котлі | | | + | | + | | |
| 5 | Температура зворотного мережевого теплоносія перед котлом | + | + | | + | | | + |
| 6 | Температура прямого мережевого теплоносія після котла | + | + | | + | | | + |
| 7 | Температура прямого мережевого теплоносія після гідравлічного розподільника | + | + | | + | | | + |
| 8 | Температура навколишнього середовища | + | + | | | | | |
| 9 | Перепад тиску теплоносія на насосі | | | + | | | | |
| 10 | Температура прямого мережевого теплоносія до споживачів | + | + | | | | | |
| 11 | Тиск у водопроводі до калориферів системи вентиляції | + | + | | | | | |
| 12 | Тиск у розширювальному баку | + | | | | | | |

## 2.4 Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом

У сучасних котельнях зазвичай застосовують декілька підходів до керування технологічним процесом. Найпростішим є пряме регулювання температури теплоносія на виході котла, коли давач у зворотній лінії впливає на витрату газу. Однак така схема не враховує змінення навантаження в мережі опалення та може призводити до коливань температури й надмірного споживання палива. Каскадна схема керування використовує вимірювані значення температури прямого і зворотного теплоносія й розподіляє коригуючі сигнали між газовим клапаном і триходовим клапаном підмішування. Ця схема забезпечує кращу стабільність температури в системі споживачів, але вимагає великої кількості давачів і складної конфігурації ПІД-регуляторів. Існують також схеми, що крім температури враховують перепад тиску на фільтрах і витрату теплоносія, але їх реалізація потребує додаткових перетворювачів і програмних модулів.

Порівняльна оцінка цих підходів показує: схема з прямим регулюванням підходить для простих об’єктів з постійним навантаженням, але не спроможна швидко адаптуватися до різких змін. Каскадне або багатофункціональне керування дозволяє отримати найменші похибки підтримки температури — ±1 … ±2 °C — та знизити коефіцієнт нерівномірності подачі тепла, але істотно ускладнює апаратну частину й програму керування. Контроль витрати та різниці тисків дає можливість оптимізувати гідравлічний режим насосної лінії, проте має більшу вартість комплектуючих, а, відповідно, і впровадження.

Для котельні з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 у цій роботі пропонуємо таку схему керування: пріоритетне керування температурою прямої лінії кожного котла з обмеженням зворотної температури через триходовий клапан підмішування. Одночасно здійснюється стабілізація тиску газу перед пальниками. Така побудова дозволяє підтримувати необхідний температурний графік 90/70 °C, зводить до мінімуму кількість вхідних каналів ПЛК та не ускладнює алгоритми програми керування.

Спрощена функціональна схема автоматизації котельні, розроблена із врахування запропонованих підходів, представлена на рисунку 2.1. Основою цієї ФСА є такі контури регулювання:

- Каскадне регулювання температури прямої води за допомогою зміни витрати газу до пальників (контур 5);
- Регулювання температури зворотного теплоносія на вході в котел зміною положення триходового клапана та підмішування гарячого теплоносія з подавального трубопроводу (контури 3, 4);
- Регулювання тиску в газопроводі до пальників (контур 1).

Впровадження цієї схеми керування дає змогу досягти зменшення відхилення температури прямого теплоносія до ±5 °C при змінному навантаженні опалення виробничого й адміністративного приміщень, а також скоротити витрату природного газу на 5 % порівняно з режимом без підмішування теплоносія.

Отже, обґрунтований вибір спрощеної функціональної схеми автоматизації забезпечив достатню якість регулювання й економічну доцільність проекту, забезпечивши при цьому високу надійність і зрозумілість обслуговування. Така архітектура відповідає задачам промислової котельні середнього масштабу, де баланс між вартістю обладнання та точністю керування є вирішальним фактором.

**Висновок**

У другому розділі обґрунтовано вибір функціональної схеми автоматизації котельної установки. Визначено оптимальні координати вимірювання, сигналізації й захисту, що забезпечують швидкий зворотний зв’язок і безпечну роботу обладнання. Порівняння різних варіантів керування показало, що обрана спрощена схема дає змогу утримувати температуру подачі в межах ±3 °C і знизити витрату газу приблизно на п’ять відсотків без суттєвого ускладнення апаратної частини. Таким чином, техніко-економічне обґрунтування підтвердило, що запропонована архітектура є найбільш раціональним компромісом між точністю регулювання, надійністю та витратами на впровадження.

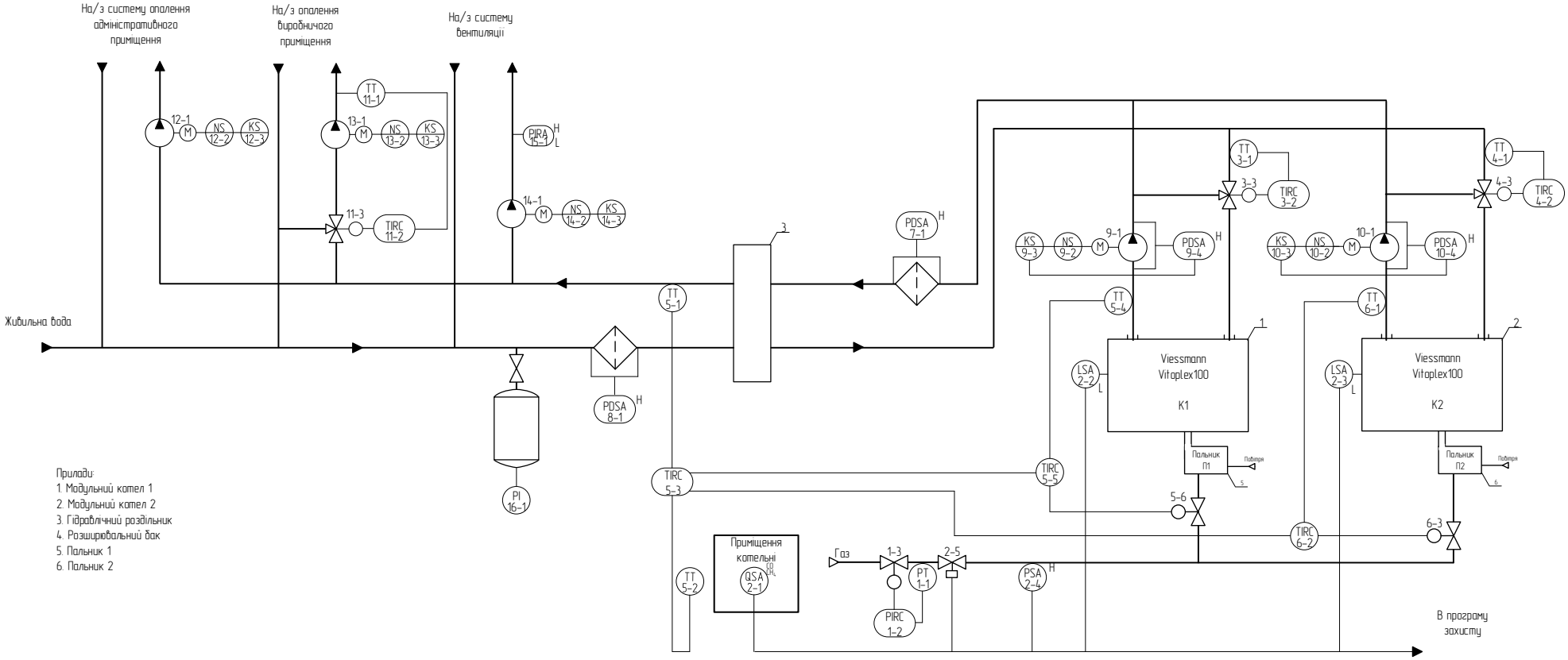



*Рисунок 2.1 Спрощена функціональна схема автоматизації котельні для опалення адміністративних та виробничих приміщень промислового підприємства*

# РОЗДІЛ 3

# ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 3.1 Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми

### 3.1.1 Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

*Контур 1. Регулювання тиску газу в газопроводі зміною витрати газу*

Вимірювання тиску газу у газопроводі здійснюється за допомогою первинного вимірювального перетворювача тиску серії ETRANS P-01, вихідний сигнал з якого поступає на аналоговий вхід ПЛК. Контролер згідно алгоритму функціонування формує керуючу дію та подає її через канал аналогового виходу на позиціонер Bürkert Positioner Type 8692, який керує газовим клапаном Bürkert Type 2301, впливаючи на витрату газу.

*Контур 2. Захист відносно тиску палива, рівня в котлах та загазованості приміщення котельні*

У приміщенні котельні контролюють концентрацію чадного газу та метану в приміщенні котлів за допомогою газоаналізатора - Варта 2-03. Тиск природного газу перед пальниками контролюють за допомогою реле тиску Dungs GW 500 A5. Також контролюють рівень води в котлах за допомогою сигналізатору рівня VEGASWING 61. Вихідні сигнали цих давачів-реле подають на ПЛК, який згідно алгоритму функціонування формує керуючу дію для закривання клапана Dungs MVDLE 5065/5 та аварійного припинення подавання газу до пальників.

*Контур 3 та 4. Регулювання температури зворотного теплоносія до котла №1 та №2 зміною витрати підмішування гарячого теплоносія*

Температуру теплоносія зворотної магістралі вимірюють термоперетворювачем опору типу – Pt100 SITRANS TS500 T3 (діапазон вимірювання 0 – 200 °С), вихідний аналоговий сигнал з якого поступає на аналоговий вхід ПЛК. Контролер згідно алгоритму функціонування формує

керуючу дію, яку через канал аналогового виходу подає на електропривід типу Siemens SBV151.00 (сигнал 4 – 20мА) регулюючого триходового клапану Siemens VXF47.100, який змінює витрату підмішування гарячої води.

*Контур 5. Каскадна система регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення з коректуванням завдання регулятора витрати газу до пальника №1*

Для вимірювання температури мережевого теплоносія на виході з гідравлічного роздільника застосовано термоперетворювач опору типу – Pt100 SITRANS TS500 T3 (діапазон вимірювання 0 – 200 °C). Для вимірювання температури зовнішнього середовища застосовано термоперетворювач Sensit NK 510A. Сигнали з термоперетворювачів поступають на аналогові входи ПЛК. Ці два сигнали є, відповідно, регульованою величиною та завданням для основного регулятора в каскадній системі регулювання температури теплоносія. Регульованим параметром для допоміжного регулятора є температура теплоносія на виході з котла, яку вимірюють за допомогою термоперетворювача опору типу Pt100 SITRANS TS500 T3 (діапазон вимірювання 0–200 °C). Вихідний аналоговий сигнал із термоперетворювача поступає на аналоговий вхід ПЛК. ПЛК, згідно з алгоритмом функціонування, формує керуючу дію для зміни витрати газу. Керуюча дія для газу через канал аналогового виходу (сигнал 4–20 мА) передається на позиціонер Bürkert Positioner Type 8692, який керує газовим клапаном Bürkert Type 2301, впливаючи на подачу газу до пальника П1.

*Контур 6. Регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення зміною витрати газу до пальника №2*

Температура теплоносія на виході з котла вимірюють за допомогою термоперетворювача опору типу Pt100 SITRANS TS500 T3 (діапазон вимірювання 0–200 °C). Вихідний аналоговий сигнал із термоперетворювача поступає на аналоговий вхід ПЛК. ПЛК, згідно з алгоритмом функціонування, формує керуючу дію для зміни витрати газу. Керуюча дія для газу через канал аналогового виходу (сигнал 4–20 мА) передається на позиціонер Bürkert Positioner Type 8692, який

керує газовим клапаном Bürkert Type 2301, впливаючи на подачу газу до пальника П2.

*Контур 7 та 8. Контроль та сигналізація перепаду тиску на водяних фільтрах №1 та №2*

Контроль перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску типу – Danfoss RT266AL, виміряний сигнал з якого поступає на канал дискретного входу ПЛК, який згідно програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий сигнал для сигналізації по верхній межі.

*Контур 9 та 10. Керування циркуляційними насосами №1 та №2 системи опалення*

Для циркуляції води у контурах опалення та вентиляції за застосовують насоси типу DAB K 55/50 T, які отримують керуючий сигнал від пристрою плавного пуску серії SIRIUS 3RW30.

Здійснюється контроль перепаду тиску на кожному насосі за допомогою реле перепаду тиску типу Danfoss RT266AL. У разі виникнення несправності реле формує дискретний сигнал, який подає на вхід ПЛК Unitronics Vision V570, який згідно програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий сигнал для сигналізації збільшення перепаду тиску.

*Контур 11. Регулювання температури теплоносія для подачі до контуру опалення адміністративного приміщення зміною витрати підмішування зворотного теплоносія*

Вимірювання температури теплоносія для подачі до контурів опалення здійснюється за допомогою термоперетворювача опору типу Pt100 SITRANS TS500 T3 (діапазон вимірювання 0 – 200 $^{o}$C), вихідний аналоговий сигнал з якого поступає на аналоговий вхід ПЛК. ПЛК згідно алгоритму функціонування формує керуючу дію, яка через канал аналогового виходу поступає на електропривід типу Siemens SBV151.00 (сигнал 4 – 20мА). Електропривід діє на регулюючий

триходовий клапан Siemens VXF47.100, який відповідає за підмішування холодної води.

*Контур 12, 13 та 14. Керування насосами для подачі теплоносія до контурів опалення адміністративного та виробничого приміщень, а також до системи вентиляції*

Здійснюється перекачування води до контурів опалення та вентиляції за рахунок керування насосами типу DAB K 55/50 T, які отримують керуючі сигнали від пристрою плавного пуску серії SIRIUS 3RW30.

*Контур 15. Контроль та сигналізація тиску в трубопроводі до системи вентиляції*

Індикація тиску води до калориферів системи вентиляції здійснюється за допомогою вимірювального перетворювачу тиску типу Сафір М5150, вихідний сигнал з якого поступає на аналоговий вхід ПЛК. Контролер згідно програми функціонування формує керуючі сигнали для сигналізації перевищення гранично допустимої межі за верхнім або нижнім допустимим значенням тиску.

*Контур 16. Індикація тиску в розширювальному баку*

Тиск у розширювальному баку вимірюють за допомогою вимірювального перетворювачу тиску типу Сафір М5150. Вихідний сигнал з перетворювача тиску подають на аналоговий вхід контролера, звідки від потрапляє в програму контролера та панелі HMI для індикації значення тиску.

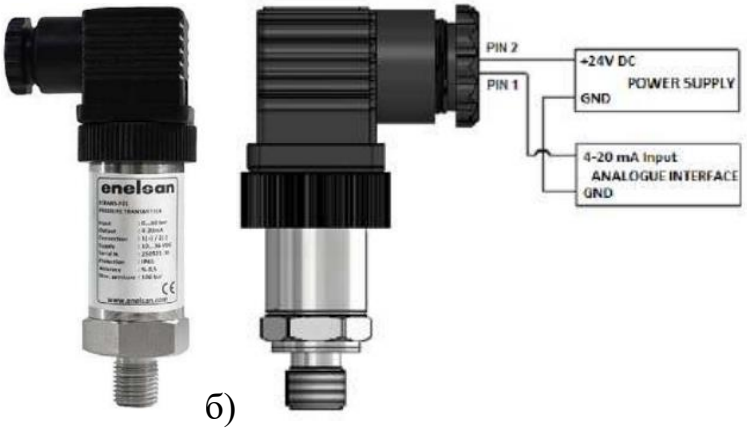
### 3.1.2 Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

*3.1.2.1. Первинний вимірювальний перетворювач тиску серії ETRANS P-01/1B/06S [13]*

Призначений для вимірювання тиску газів, парів та рідин у різних промислових галузях. Він оснащений керамічною вимірювальною коміркою, що забезпечує високу точність та довговічність. Схема під’єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.1.

*Основні технічні характеристики:*

- діапазон вимірювань: до 1 бар;
- вихідний сигнал: 4...20 мА;
- температура процесу: від -40 до +135 °С;
- температура довкілля, зберігання та транспортування: від -25 до +85 °С;
- робоча напруга: 10...36 В;
- похибка вимірювання: менше 0,2%.




а) б)

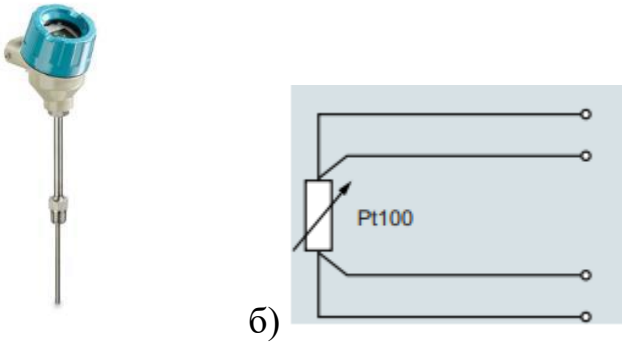
*Рисунок 3.1 Первинний вимірювальний перетворювач тиску серії ETRANS P-01/ 1B / 06S: а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.2. Термоперетворювач опору типу Pt100 SITRANS TS500 7MC650 SA4 [14]*

У якості приладів, що вимірюють температуру у системі автоматизації був обраний термоперетворювач опору SITRANS TS500. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.2.

*Основні технічні характеристики:*

- давач Pt100, занурюваного типу;
- температурний режим: 0 - 120 °С;
- ступінь захисту: IP54;
- аналоговий вихід: 4…20 mA.




а) б)

*Рисунок 3.2 Термоперетворювач опору типу Pt100 SITRANS TS500*

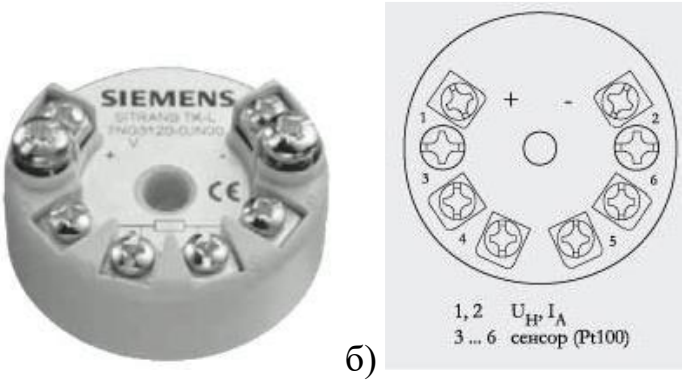
*а) загальний вигляд; б) тип з'єднань*

*3.1.2.3. Вимірювальний перетворювач для PT100 SITRANS TK L [15]*

Вимірювальний перетворювач SITRANS TK-L перетворює сигнал від термометрів опору Pt100 на аналоговий сигнал 4-20 мА, що підводиться, відповідний характеристиці сенсора. Завдяки компактній конструкції він вставляється в головку зонда типу B (DIN 43729). У програмованих SITRANS TK-L параметрування здійснюється за допомогою ПК. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 4.3.

*Основні технічні характеристики:*

- тип під'єднання 2-х провідне;
- діапазон виміру -200 ... 850 °C;
- вихід 4...20 мА, 2-х провідний;
- зовнішня температура від -40 до +85 °C;
- відн. вологість повітря < 98% конденсат.




а) б)

*Рисунок 3.3 Вимірювальний перетворювач для PT100 SITRANS TK L*

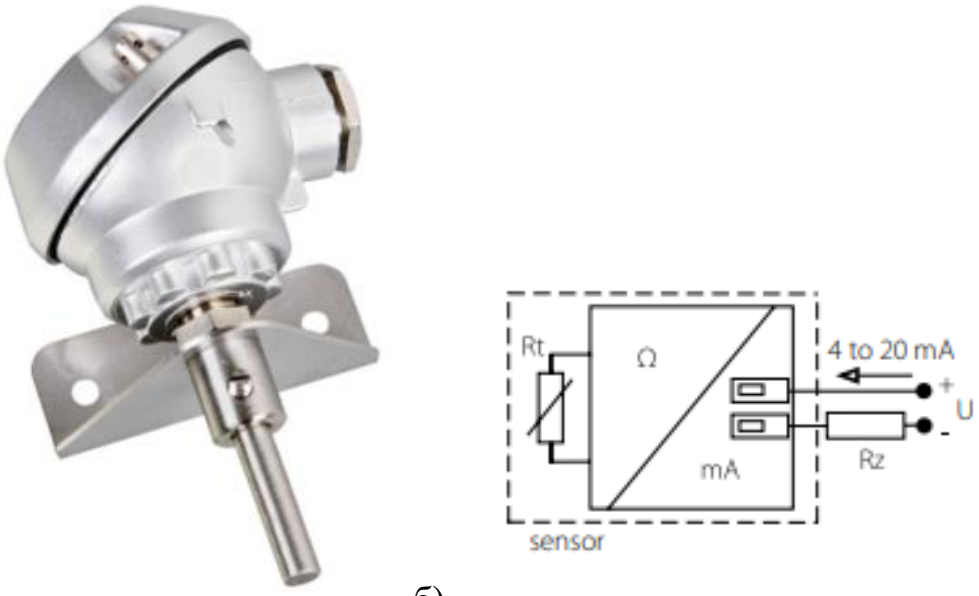
*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.4. Первинний вимірювальний перетворювач температури Sensit NK 510A [16]*

Промисловий давач температури, призначений для моніторингу температури в різних середовищах. Він підходить для використання в автоматизованих системах завдяки простоті інтеграції та високій надійності. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.4.

*Основні технічні характеристики:*

- діапазон вимірювання: від -30 до +60 °C;
- вихідний сигнал: 4-20 мА;
- клас захисту: IP65.




а) б)

*Рисунок 3.4 Первинний вимірювальний перетворювач температури Sensit NK 510A*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

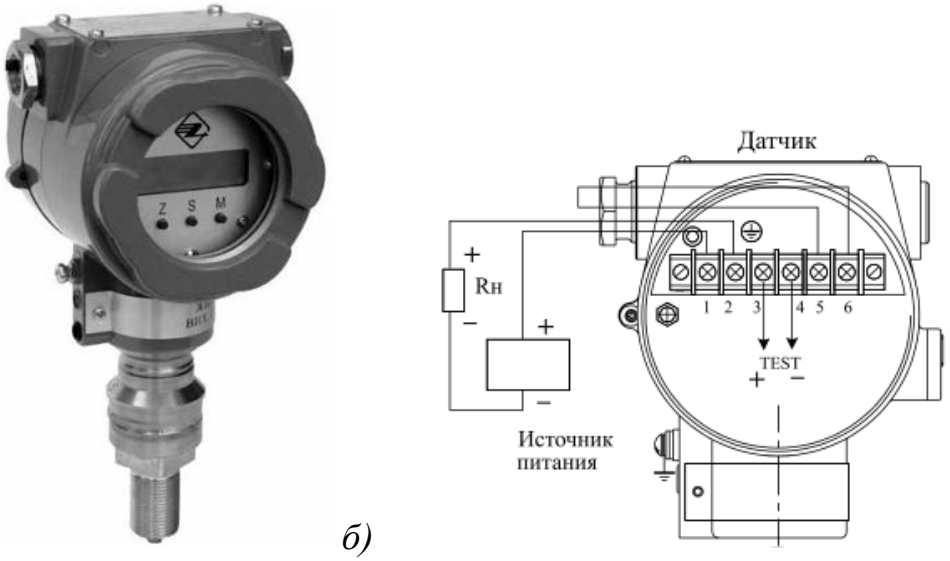
*3.1.2.5. Вимірювальний перетворювач тиску типу Сафір М5150 [17]*

Вимірювальний перетворювач тиску призначений для безперервного перетворення значення вимірюваного перепаду тиску в уніфікований струмовий вихідний сигнал. Схема під'єднання та вигляд приладу зображено на рисунку 3.5.

*Основні технічні характеристики:*

- діапазон вимірювань, кПа – від 63 до 1600;
- похибка – 1≤ Кп ≤10;
- вплив напруги живлення,% – 0,005 на 1 В;
- напруга живлення – 15…42 для давачів з вихідним сигналом 4…20 мА;

Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.5




а) *б)*

*Рисунок 3.5 Перетворювач тиску типу Сафір М5150*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.6. Реле рівня VEGASWING 61 of 316L/Alloy C22 (2.4602) [18]*

Пристрій для контролю точкового рівня рідин. Основним робочим елементом є вібруюча вилка, яка змінює свою частоту коливань залежно від того, чи занурена вона в рідину. Це дозволяє визначати досягнення мінімального або максимального рівня рідини у резервуарі чи котлі. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.6.

*Основні технічні характеристики:*

- температура процесу: від -50°C до +250°C;
- тиск: до 64 бар;
- Напруга: 24В AC, 50 Гц;
- вихідний сигнал: Релейний вихід;
- ступінь захисту: IP66.

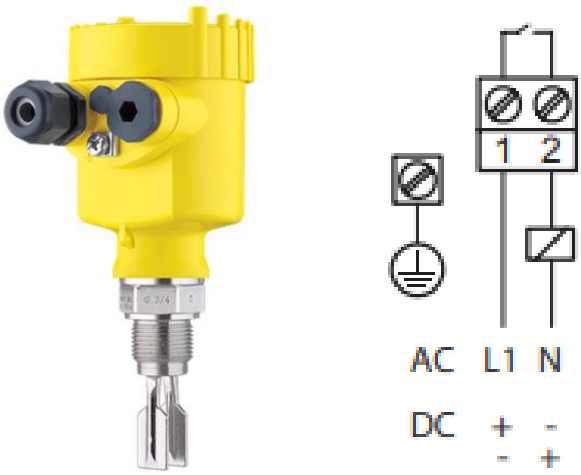



*Рисунок.3.6 Реле рівня VEGASWING 61*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

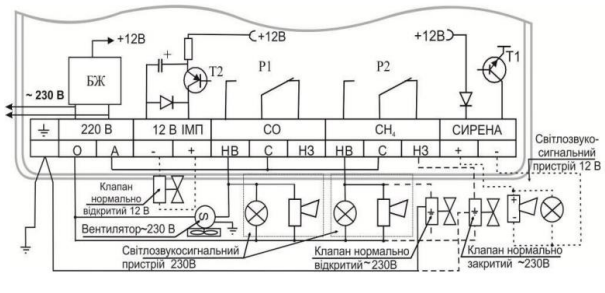
*3.1.2.7. Газосигналізатор Варта 2-03 [19]*

Газосигналізатор ВАРТА 2-03 контролює концентрацію метану ($CH_4$) та чадного газу (CO) з одночасною сигналізацією та передачею сигналів на зовнішні пристрої. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.7.

*Основні технічні характеристики:*

- гази: Метан ($CH_4$), чадний газ (CO);
- пороги: Метан – 0.5% об., CO – 50 ppm;
- живлення: 230 В;
- температура: від -20°C до +60°C.

а)




б)

*Рисунок 3.7 Газосигналізатор Варта 2-03*

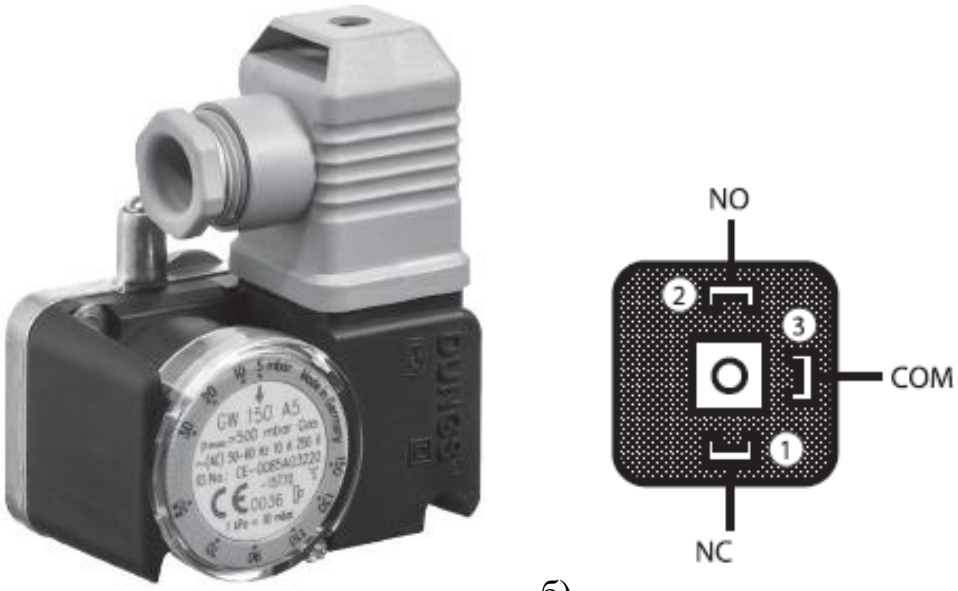
*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.8. Реле тиску Dungs GW 500 A5 [20]*

Реле тиску, призначене для контролю тиску газу. Використовується для безпечного управління в газових системах, а також у системах пальників і котлів. Пристрій спрацьовує при відхиленні тиску від заданого значення, передаючи сигнал на керуючий пристрій. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.8.

*Основні технічні характеристики:*

- робоче середовище: Газ або повітря;
- діапазон налаштування: Від 100 до 500 мбар;
- максимальний робочий тиск: 600 мбар;
- перепад тиску (Δp): Менше 15 мбар;
- температура робочого середовища: Від -15°C до +70°C;
- вхідна напруга: 24–48 В (DC) ;
- номінальний струм: до 6 А (AC) ;
- ступінь захисту IP54;
- вихідний сигнал: SPDT (перемикаючий контакт).




а) б)

*Рисунок 3.8 Реле тиску Dungs GW 500 A5:*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.9. Диференційне реле перепаду тиску типу RT266AL 017D008166 [21]*

Реле тиску RT266AL містить тиск керований однополюсний перекидний контакт, положення якого залежить від тиску в вхідне з'єднання та встановлене значення шкали. Серія RT включає реле тиску для загальне застосування в промисловості та суднoплавстві охолодження. Серія RT також включає перепад тиску вимикачі, реле тиску для нейтральної зони регулювання, а також спеціальні реле тиску с позолочені контактні поверхні для ПЛК. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.9.

*Основні технічні характеристики:*

- діапазон: 0 ÷ 0.9 бар;
- межі налаштування: -1 ÷ 6 бар;
- регульована нейтральна зона: 0.05 ÷ 0.23 бар;
- макс. Робочий Тиск: 7 бар;
- температура Середи: -40 ÷ 100ºC;
- температура навколишнього середовища: -50 ÷ 70ºC;
- клас захисту: IP66.

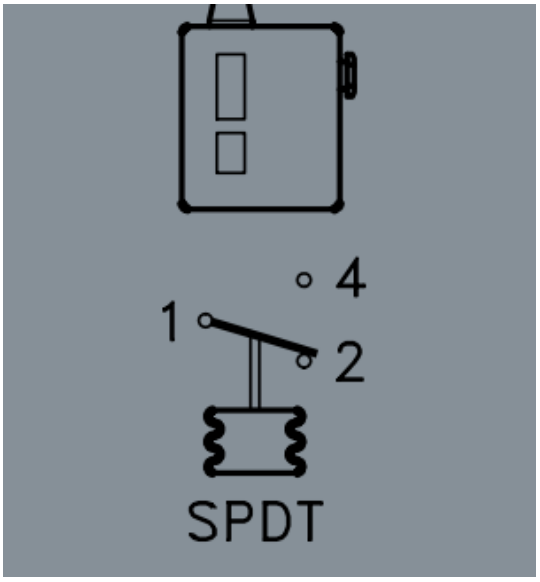
*а)* б) 


*Рисунок 3.9 Реле перепаду тиску Danfoss RT266AL:*
*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.10. Регулюючий клапан Bürkert Type 2301 [22]*

Пневматичний двоходовий регулювальний клапан, який забезпечує точний контроль подачі газів. Він має надійну конструкцію з нержавіючої сталі та може бути оснащений позиціонером для інтеграції в автоматизовані системи. Вигляд приладу представлено на рисунку 3.10.

*Основні технічні характеристики:*

- робочий тиск: до 16 бар;
- діапазон температур: від -10°C до +180°C;
- матеріал корпусу: нержавіюча сталь (стійка до корозії, підходить для газів і рідин) ;
- діаметр: DN65.

*Рисунок 3.10. Загальний вигляд клапану Bürkert Type 2301*

*3.1.2.11. Позиціонер Bürkert Positioner Type 8692 [23]*

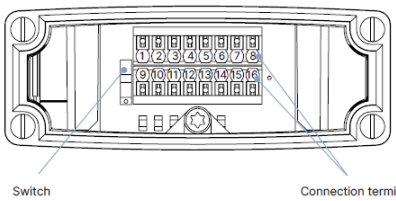
Цифровий електропневматичний позиціонер, оптимізований для інтегрованого монтажу на пневматичні процесні клапани серій Type 23xx і Type 2103. Пристрій забезпечує точний контроль положення клапана. Схема під’єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.11.

*Основні технічні характеристики:*

- живлення: 24 В DC ±10%, <5 Вт;
- вхідний сигнал: 0/4–20 мА;
- вихід (опційно): 0/4–20 мА, 0–5/10 В, 2 цифрових;
- робочий тиск: 0–7 бар;
- хід клапана: 3–45 мм;

- клас захисту: IP65/IP67;
- робоча температура: -10°C до +55°C.

а)




б)

| Terminal | Pin assignment |
|---|---|
| 1 | Analogue feedback GND |
| 2 | Analogue feedback + |
| 3 | Digital output GND |
| 4 | Digital output 2 |
| 5 | Digital output 1 |
| 6 | Digital input + |
| 7 | Setpoint GND |
| 8 | Setpoint + |
| 9 | Not assigned |
| 10 | Not assigned |
| 11 | Not assigned |
| 12 | Not assigned |
| 13 | Not assigned |
| 14 | Digital input GND |
| 15 | Operating voltage GND |
| 16 | Operating voltage + 24 V |

*Рисунок 3.11 Позиціонер Bürkert Positioner Type 8692:*

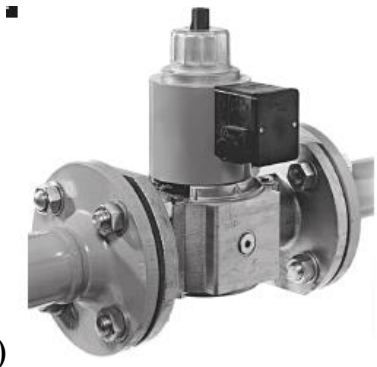
*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.12. Електромагнітний клапан Dungs MVDLE 5065/5 [24]*

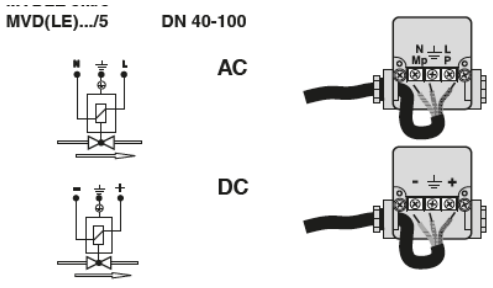
Електромагнітний клапан, спеціально розроблений для керування потоком газу в промислових і комерційних газових системах. Його можна використовувати як аварійний клапан для перекриття газу та в системах автоматизації. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.12.

*Основні технічні характеристики:*

- діаметр: DN 65 (фланцеве під'єднання);
- пропускна здатність: До 800 м³/год;
- максимальний робочий тиск: 500 мбар;
- живлення: 24 В DC;
- робоча температура навколишнього середовища: від -15°C до +60°C;
- ступінь захисту: IP 54.



а)




б)

*Рисунок 3.12 Клапан Dungs MVDLE 5065/5*

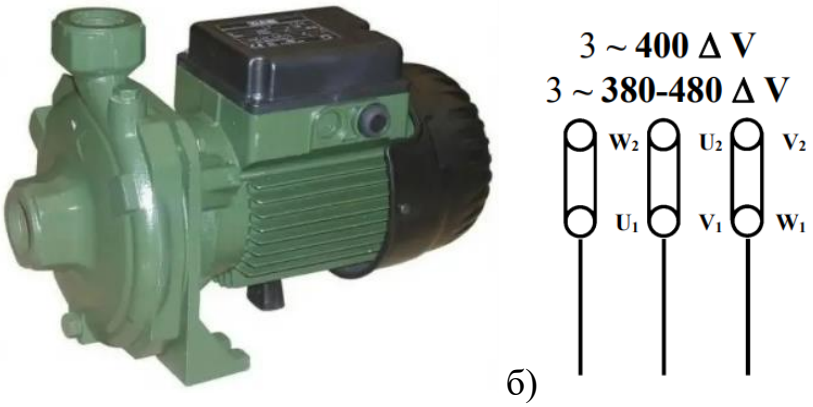
*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.13. Насос DAB K 55/200 T [25]*

Модель відцентрового насоса призначена для роботи в підтримці систем опалення та водопостачання житлових приміщень, промислових підприємств, а також для роботи в системах очищення та зрошення сільськогосподарських комплексів. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 4.13.

*Основні технічні характеристики:*

- діапазон частоти обертання: 2850 об/хв;
- температура рідин: до +110 °C;
- максимальний робочий тиск: 8 бар;
- номінальна потужність: 1.85 кВт;
- електроживлення: 3~400 В, 50Гц;
- максимальна витрата (Q): 30 м³/год;
- клас захисту: IP 55.




а) б)

*Рисунок 3.13 Насос DAB K 55/50 T*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

*3.1.2.14. Клапан Siemens VXF47.100 [26]*

Триходовий сідельний клапан із зовнішнім різьбовим з'єднанням, призначений для використання в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Він забезпечує точне регулювання потоку теплоносія, що сприяє ефективній роботі системи. Вигляд приладу зображено на рисунку 3.14.

*Основні технічні характеристики:*

- діаметр: DN100;
- пропускна здатність (kvs): 63 м³/год;
- робочий тиск: До 16 бар;
- температура робочого середовища: -10°C до +150°C.

*Рисунок 3.14 Зовнішній вигляд клапану Siemens VXF47.100*

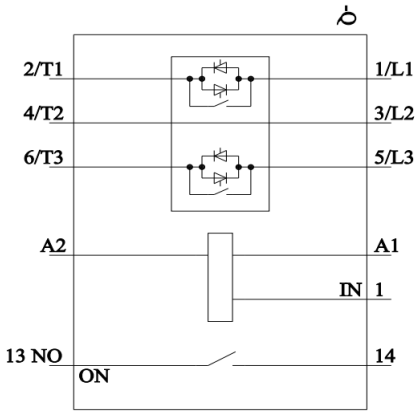
*3.1.2.15. Пристрій плавного пуску серії SIRIUS 3RW30 14-1BB04 [27]*

Siemens 3RW3014-1BB04 призначений для запуску асинхронних двигунів із трифазним живленням. Він зменшує механічне зношення і струмові навантаження під час запуску та зупинки двигуна, забезпечуючи тривалий термін служби обладнання. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.15.

*Основні технічні характеристики:*

- потужність двигуна: до 3 кВт при напрузі 400 В AC (трифазне живлення) ;
- номінальний струм: максимальний струм — 6,5 А;
- живлення: основне силове живлення: 200–480 В AC;
- управління: 24 В AC;
- температурний режим: робоча температура: від -25°C до +60°C.

а)




б)

*Рисунок 3.15 Пристрій плавного пуску серії SIRIUS 3RW30:*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

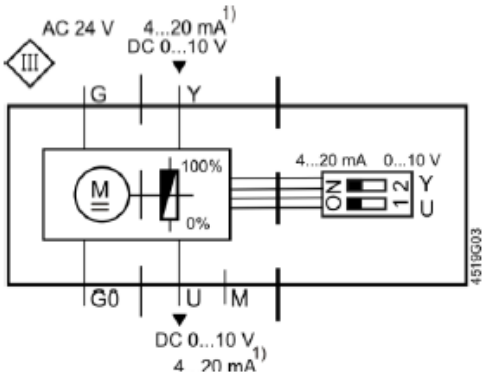
*3.1.2.16. Електропривід Siemens SBV151.00 [28]*

Привід забезпечує точне позиціонування штока клапана, що дозволяє ефективно регулювати потік робочого середовища в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Схема під'єднання та вигляд приладу представлено на рисунку 3.16.

*Основні технічні характеристики:*

- тип сигналу керування: Аналоговий сигнал 4…20мА;
- номінальний хід штока: 20 мм;
- зусилля позиціонування: 800 Н;
- час позиціонування: 120 секунд;
- робоча напруга: AC 24 В.

а)




б)

*Рисунок 3.16 Електропривід Siemens SBV151.00:*

*а) загальний вигляд; б) схема електричних з'єднань*

## 3.2 Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації

### 3.2.1 Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик

В якості центрального контролера автоматизованої системи обрано програмований логічний контролер Unitronics Vision V570. Це мікропроцесорний ПЛК з інтегрованою панеллю оператора HMI (повноколірний сенсорний дисплей 5,7″). Такий підхід обґрунтований гнучкістю і функціональністю пристрою. Vision V570 поєднує в собі засіб логічного керування і людино-машинний інтерфейс, що зменшує складність системи та спрощує налаштування. Контролер підтримує широкий спектр задач – від дискретної логіки до ПІД-регулювання – і має вбудовані засоби реєстрації даних (Data Tables) та рецептур, що є важливим для даного проєкту.

Вибір V570 також зумовлений його сумісністю з різними модулями розширення вводу/виводу та комунікаційними інтерфейсами, що дозволяє легко масштабувати систему під необхідну кількість давачів і виконавчих пристроїв. Вбудована сенсорна панель спрощує взаємодію оператора з системою: на кольоровому екрані можуть відображатися мнемосхеми, графіки, аварійні повідомлення тощо, введення даних здійснюється через віртуальну клавіатуру [4].

Контролер обладнаний 5,7-дюймовим TFT-дисплеєм, тобто резистивним сенсором з роздільною здатністю 320×240 пікселів і відображенням 65 тисяч кольорів. Обчислювальне ядро побудоване на 32-розрядному мікропроцесорі, достатньо продуктивному для виконання програм реального часу (типовий цикл виконання програми – ~9 мкс на 1К операцій). Пам’ять програми становить 2 МБ (Flash) для зберігання логіки, додатково виділено 12 МБ під графічні екрани користувача та 1 МБ під шрифти. Передбачена підтримка карт SD для зовнішньої пам’яті – це дозволяє зберігати великі обсяги даних технологічних журналів, архіви аварій і копії програми контролера [4]. Контролер розрахований на живлення 24 В постійного струму та придатний до використання в промисловому середовищі. Діапазон робочих температур становить від 0 °C до +50 °C, ступінь захисту

передньої панелі – IP65, при щитковому монтажі. Вбудовані комунікаційні можливості Vision V570 включають два послідовних порти (RS-232/RS-485) та порт USB для програмування/налагодження. Також на борту є інтерфейс CANbus, що підтримує протоколи CANopen і власний протокол UniCAN (до 60 вузлів). За потреби контролер може бути дооснащений додатковим інтерфейсним модулем зв'язку – наприклад, Ethernet-портом для під'єднання до локальної мережі. Завдяки цьому Vision V570 підтримує популярні протоколи промислової автоматики, зокрема Modbus (RTU по RS-485 та TCP/IP при наявності Ethernet), CANopen, а також протоколи обміну даними з верхнім рівнем, наприклад, віддалений моніторинг через вбудований веб-сервер, відправка електронної пошти та SMS. Гнучкість комунікацій доповнюється підтримкою протоколу DF1, для сумісності зі SCADA/ПЛК Allen Bradley та стандарту J1939 для під'єднання до мереж на базі CAN [4]. Таким чином, обраний контролер забезпечує необхідну функціональність, гнучкість інтеграції і зручність людино-машинного інтерфейсу для даної автоматизованої системи. Зовнішній вигляд ПЛК представлений на рисунку 3.17.

*Рисунок 3.17 Загальний вигляд програмованого логічного контролера серії Vision V570 виробництва компанії Unitronics*

Для безпосередньої обробки зовнішніх сигналів контролер Vision V570 оснащений snap-in модулем вводу/виводу типу V200-18-E3/4B, який встановлюється в задній частині пристрою (див. рисунок 3.18). Даний модуль надає локальну конфігурацію I/O для контролера: 18 дискретних входів і 17 дискретних

виходів. Входи розраховані на сигнали постійного струму 24 В і можуть бути сконфігуровані як PNP/NPN (джерело або стік); два з цих входів підтримують режим високошвидкісного лічильника/енкодера (HSC) для роботи з імпульсними давачами. Схема під'єднання дискретних вхідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B представлено на рисунку 3.19. Дискретні виходи реалізовані на транзисторних ключах: більшість виходів типу PNP (відкритий колектор на +24 В), при цьому дві лінії можуть бути переведені перемичками в режим NPN (тобто працювати на замикання на 0 В) – ці дві програмовані лінії підтримують режим ШІМ і здатні працювати з підвищеною частотою комутації. Схема під'єднання дискретних вихідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B представлено на рисунку 3.19. Усі дискретні входи та виходи гальванічно ізольовані від логіки контролера, що підвищує завадостійкість системи [11].

Крім дискретних сигналів, модуль V200-18-E3/4B містить і вбудовані аналого-цифрові та цифро-аналогові тракти. 4 універсальні аналогові входи (див. рисунок 3.22), що можуть конфігуруватися для прийому аналогових сенсорів напруги/струму або під'єднання давачів температури, та 4 аналогові виходи (див. рисунок 3.21). Аналогові входи підтримують під'єднання термометричних сенсорів типу Pt100 або термопар, а також стандартних уніфікованих аналогових сигналів 0–10 В або 4–20 мА; аналогові виходи здатні видавати сигнал напруги (до 10 В) або струму (0/4–20 мА) в залежності від схеми під'єднання. Наявність цих аналогових каналів у складі основного контролера розширює функціонал системи, дозволяючи безпосередньо керувати аналоговими виконавчими механізмами і зчитувати сигнали від давачів без окремих модулів [11].

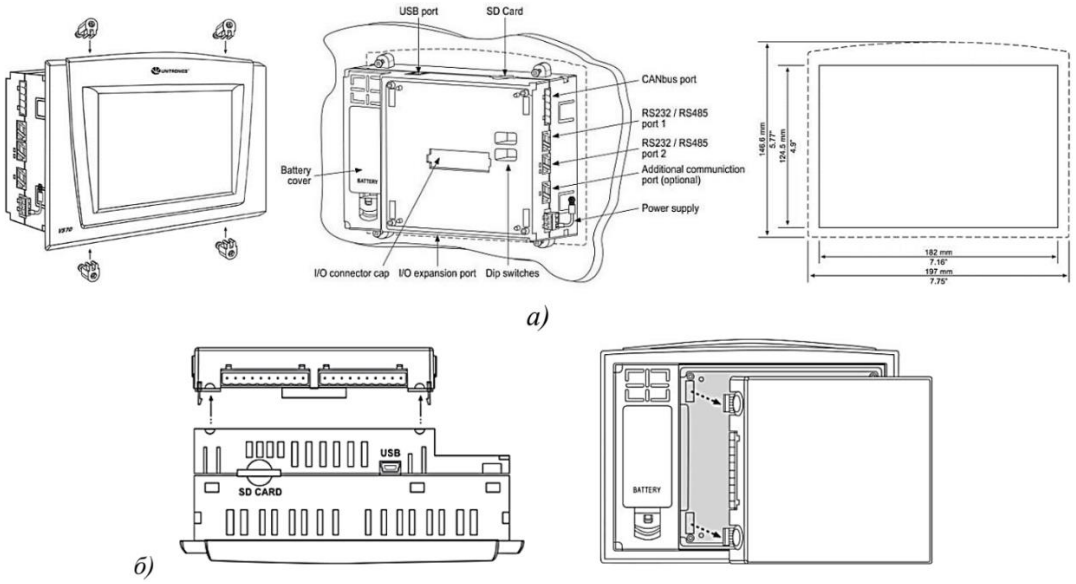



*Рисунок 3.18 Схеми монтажу (кріплення) ПЛК серії Vision V570: а) головний керуючий модуль; б) пристрої вводу/виводу Snap-in*

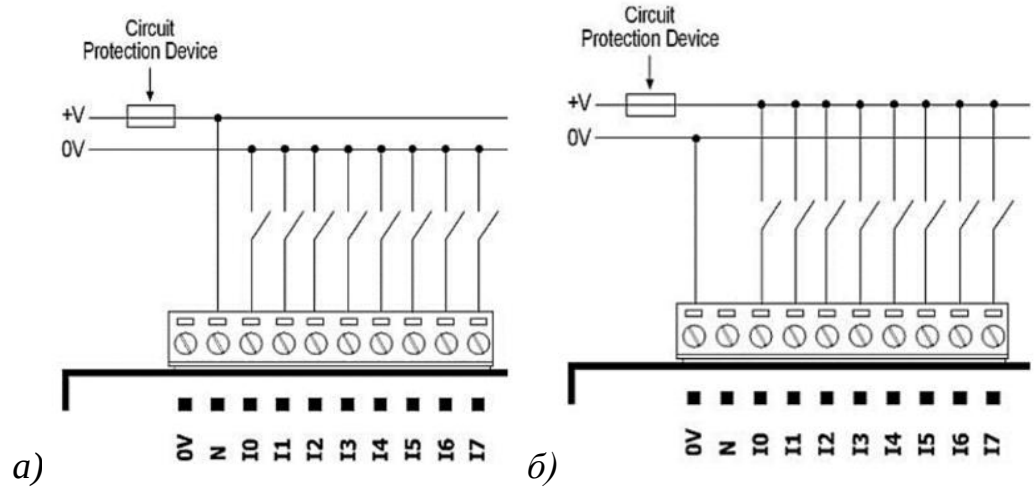



*Рисунок 3.19 Схема під'єднання дискретних вхідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B: а) n-p-n схема б) p-n-p схема*

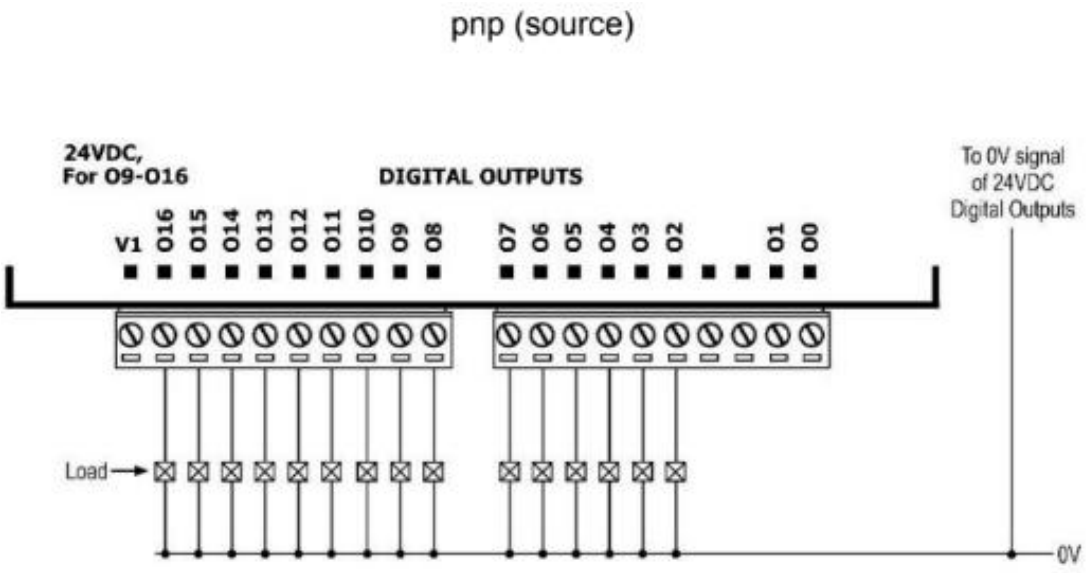



*Рисунок 3.20 Схема під'єднання дискретних вихідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B*

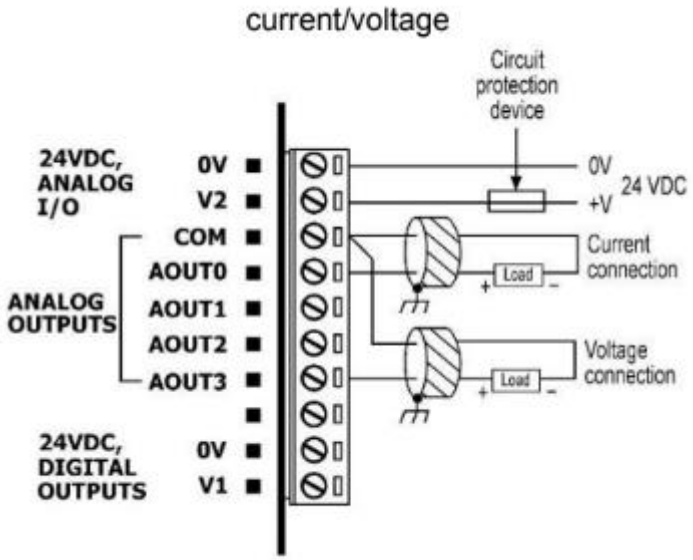



*Рисунок 3.21 Схема під'єднання аналогових вихідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B*

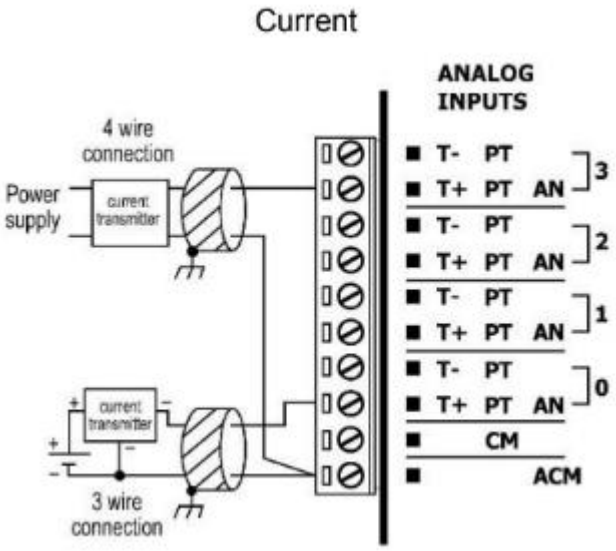



*Рисунок 3.22 Схема під'єднання аналогових вхідних сигналів до пристрою вводу/виводу Snap-in типу V200-18- E3/4B*

Оскільки в проекті передбачено значну кількість зовнішніх сигналів, додатково використано систему розширення вводу/виводу. Для під'єднання зовнішніх модулів серії IO до контролера Unitronics застосовується спеціальний інтерфейсний адаптер EX-A2X. Він під'єднується до порту розширення на корпусі Vision V570 за допомогою кабелю та забезпечує інтерфейс обміну даними між ПЛК і модулями вводу/виводу. Адаптер EX-A2X монтується на DIN-рейку в шафі керування і дозволяє під'єднати до восьми додаткових модулів I/O послідовно. При максимальній конфігурації один такий адаптер може інтегрувати до 128 додаткових точок вводу/виводу до системи (сукупно, з урахуванням восьми модулів). Адаптер забезпечує гальванічну ізоляцію шини розширення, підвищуючи надійність і безпеку роботи при великій кількості під'єднаних пристроїв [4].

Для збору аналогових сигналів від давачів у складі системи передбачено використання зовнішнього модуля розширення типу IO-ATC8/AI8. Модуль IO-ATC8 надає 8 каналів аналогового вводу, які можуть використовуватися для вимірювання температури за допомогою термопар різних типів J, K, T, B, E, N, R, S (із дискретністю 0,1 °C), а також для вимірювання стандартних аналогових сигналів напруги або струму (0–10 В, 0–20 мА, 4–20 мА) з роздільною здатністю перетворення 12–14 біт. Таким чином, IO-ATC8 є гнучким рішенням, що дозволяє

під’єднати як термоелектричні перетворювачі для контролю температури, так і інші аналогові давачі зі стандартними вихідними сигналами. У випадку, якщо вимірювання температур термопарами не потрібні, може використовуватися модуль IO-AI8, який також має 8 аналогових входів, але орієнтований суто на уніфіковані аналогові сигнали 0–10 В та 0/4–20 мА (14-розрядний АЦП). Схема під’єднання аналогових вхідних сигналів до модуля IO-ATC8/AI8 контролера Vision V570 представлена на рисунку 3.23. Обидва типи модулів розширення під’єднуються через адаптер EX-A2X і забезпечують необхідну кількість каналів для збору аналогових сигналів у системі [4].

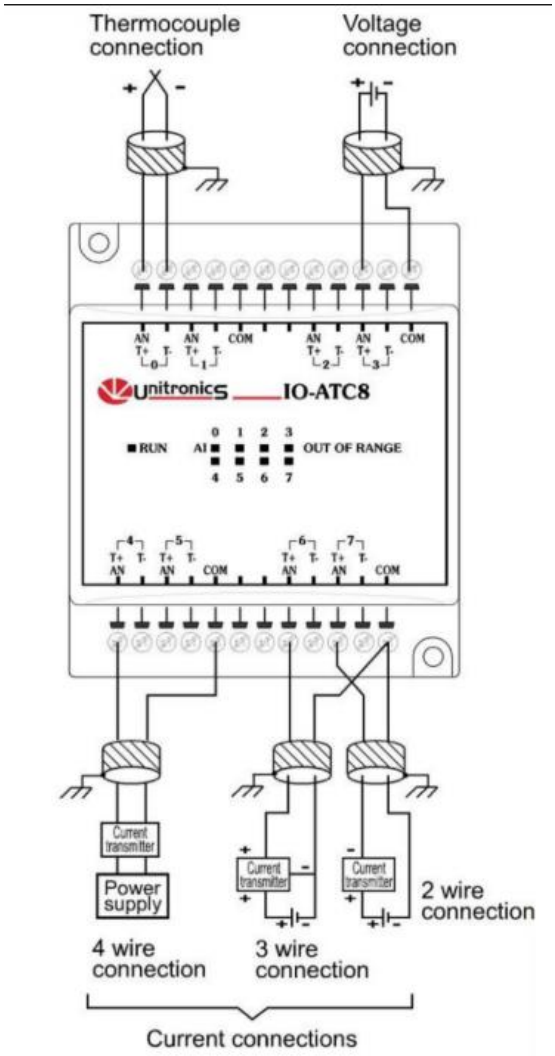



*Рисунок 3.23 Схема під’єднання аналогових вхідних сигналів до модуля IO-ATC8/AI8 контролера Vision V570*

Для керування виконавчими пристроями, що потребують аналогового сигналу керування, у систему введено модуль розширення IO-AO6X. Даний модуль забезпечує 6 каналів аналогового виходу з гальванічною ізоляцією. Кожен вихід може формувати напругу 0–10 В або струм 0/4–20 мА з роздільною здатністю 12 біт, що відповідає вимогам до більшості промислових аналогових виконавчих механізмів. Схема під'єднання аналогових вихідних сигналів до модуля IO-AO6X контролера Vision V570 представлена на рисунку 3.24. Живлення модуля – 24 В DC, споживання струму враховується при проектуванні системи електроживлення. Використання IO-AO6X разом з контролером Vision V570 дозволяє безпосередньо генерувати необхідні аналогові сигнали керування з програми ПЛК, що спрощує схему керування і зменшує похибки, в порівнянні з модульним перетворенням сигналів. Всі додаткові модулі, як входів, так і виходів, інтегруються в єдину систему керування через адаптер EX-A2X та повністю підтримуються середовищем програмування Unitronics VisiLogic [4].

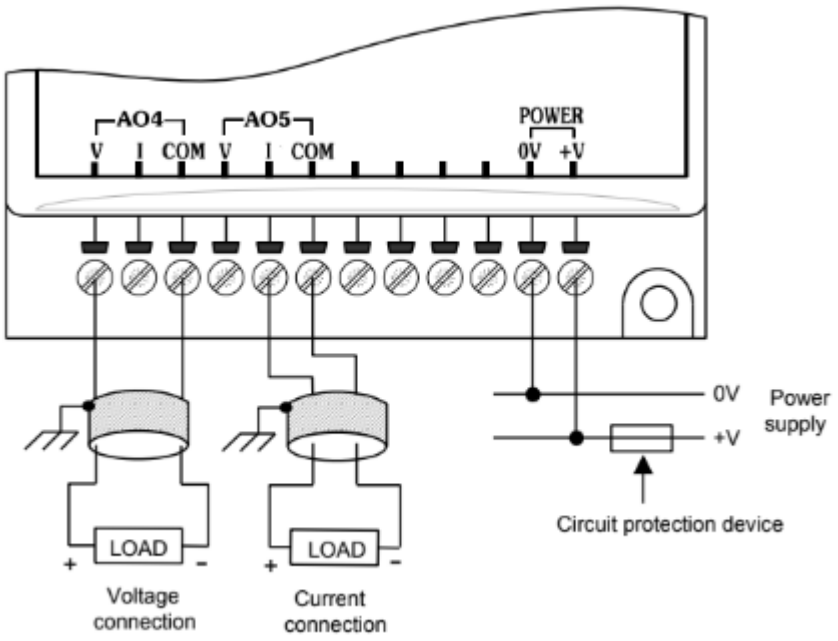



*Рисунок 3.24 Схема під'єднання аналогових вихідних сигналів до модуля IO-AO6X контролера Vision V570*

### 3.2.2 Конфігурування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

У відповідності до функціональної схеми автоматизації котельні для опалення адміністративних та виробничих приміщень промислового підприємства, яка представлена на рисунку 2 для реалізації системи автоматизованого керування необхідно забезпечити:

- Дискретних вхідних сигналів: $DI_{ЗАД} = 9$;
- Дискретних вихідних сигналів: $DO_{ЗАД} = 6$;
- Аналогових вхідних сигналів: $AIN_{ЗАД} = 10$;
- Аналогових вихідних сигналів: $AOUT_{ЗАД} = 7$;

Для забезпечення необхідної кількості каналів вхідних та вихідних сигналів було вибрано наступні компоненти мікропроцесорного програмного засобу:

- мікропроцесорний програмований модуль керування з вбудованою HMI панеллю оператора типу Vision V570 – 1 шт.;
- пристрій вводу/виводу Snap-in типу V200-18-E3/4B – 1 шт.;
- інтерфейсний модуль типу EX-A2X для під'єднання модулів розширення – 1шт.;
- модуль розширення типу IO-ATC8/AI8 – 1 шт.
- модуль розширення типу IO-AO6X – 1 шт.

Ця конфігурація забезпечує наступну кількість вхідних/вихідних сигналів:

- дискретні вхідні сигнали: $DI = 18 > DI_{ЗАД} = 9$;
- дискретні вихідні сигнали: $DO = 17 > DO_{ЗАД} = 6$;
- аналогові вхідні сигнали $AIN = 12 > AIN_{ЗАД} = 10$;
- аналогові вихідні сигнали: $AOUT = 10 > AOUT_{ЗАД} = 6$.

Згідно попередньої конфігурації, представлено загальний вигляд вікон програмного забезпечення VisiLogic з конфігурацією мікропроцесорного програмного засобу Unitronics Vision V570 [4].

*Рисунок 3.25 Вікно Hardware Configuration з виконаною конфігурацією*

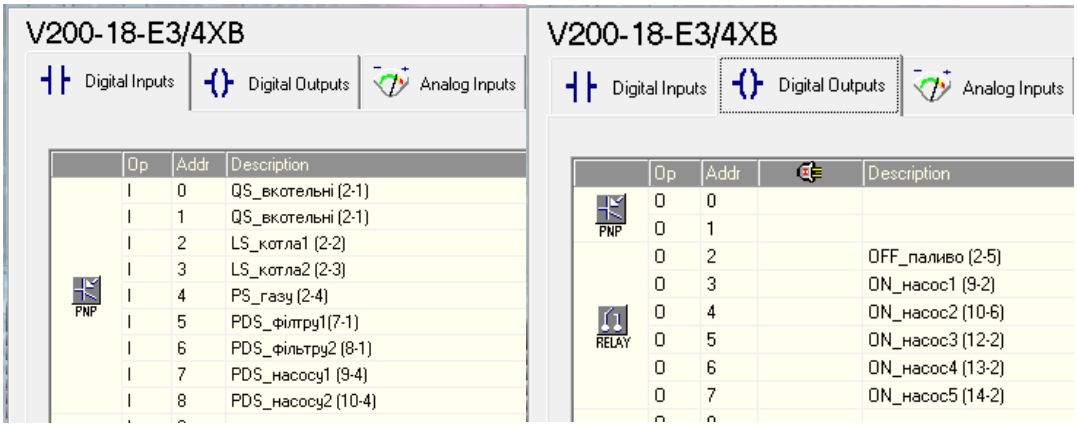



*Рисунок 3.26 Вікно налаштованих дискретних входів та виходів на модулі вводу/виводу V200-18-E3/4XB*

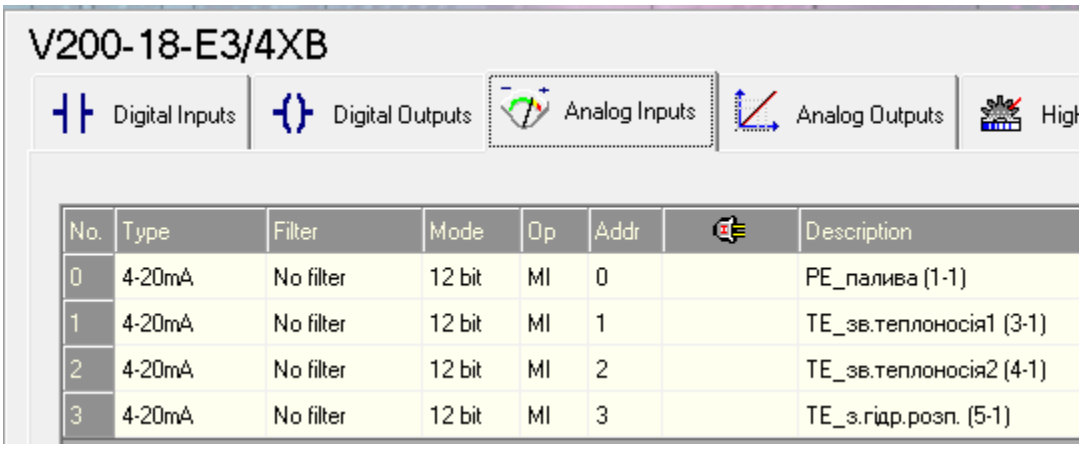



*Рисунок 3.27 Вікно налаштованих аналогових входів на модулі вводу/виводу V200-18-E3/4XB*

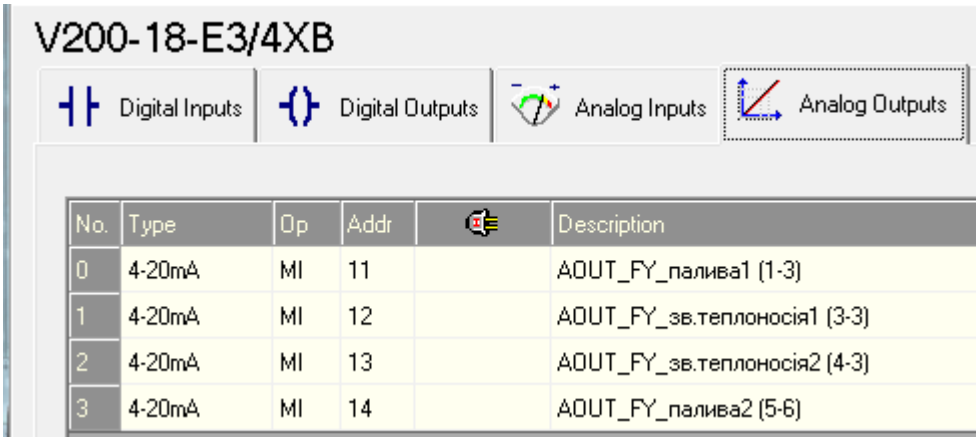



*Рисунок 3.28 Вікно налаштованих аналогових виходів на модулі вводу/виводу V200-18-E3/4XB*

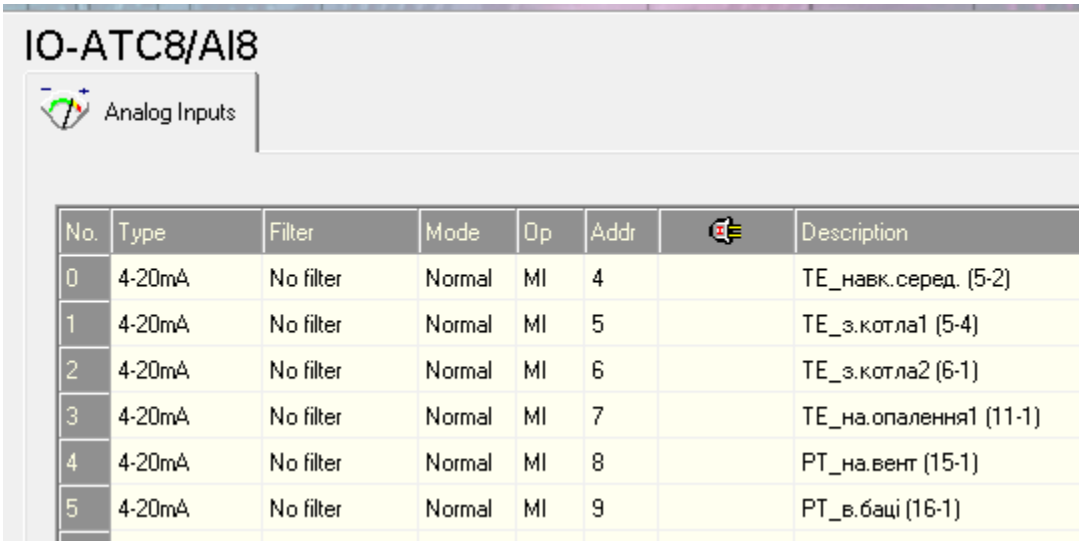



*Рисунок 3.28 Вікно налаштованих аналогових входів на модулі розширення IO-ATC8/AI8*

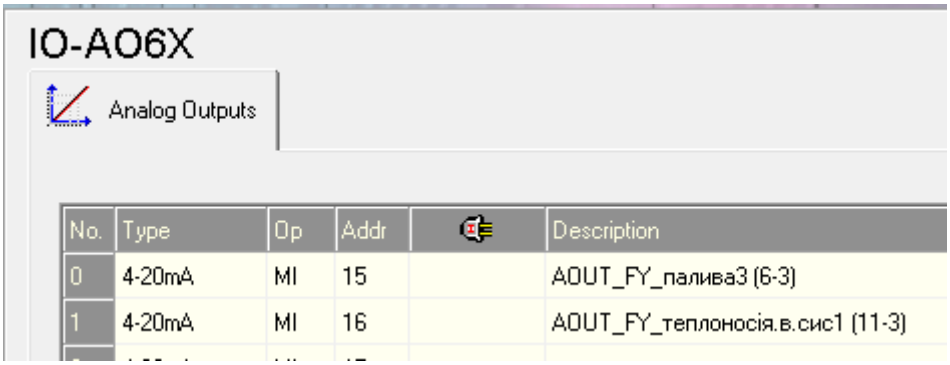



*Рисунок 3.29 Вікно налаштованих аналогових виходів на модулі розширення IO- AO6X*

## 3.3 Специфікація технічних засобів автоматизації

*Таблиця 3.1*

Специфікація технічних засобів автоматизації

| № | № Позиції | Технологічний параметр | Місце встановлення ТЗА | Назва засобу та коротка технічна характеристика | Тип | К-сть |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1-1 | Тиск природного газу трубопроводу | По місцю | ПВП тиску Діапазон вимірювань: до 1 бар. Вихідний сигнал: 4...20 мА | ETRANS P-01 | 1 |
| 2 | 3-1<br>4-1<br>5-1<br>5-4<br>6-1<br>11-1 | Температура теплоносія | По місцю | Вимірювальний перетворювач температури Вихідний сигнал: 4 – 20 мА Діапазон вимірювань: 0 - 200 °С | Pt100 SITRANS TS500 7MC650 SA4 + Pt100 SITRANS TK L | 6 |
| 3 | 5-2 | Температура навколишнього середовища | По місцю | ПВП температури Вихідний сигнал: 4 – 20 мА Діапазон: -30 до +60 °С. | Sensit NK 510A | 1 |
| 4 | 15-1<br>16-1 | Тиск теплоносія | По місцю | ПВП тиску Вихідний сигнал: 4 – 20 мА Діапазон: кПа – від 63 до 1600 | Сафір М5150 | 2 |
| 5 | 2-2<br>2-3 | Рівень рідини в котлах | По місцю | Реле рівня Температура процесу: від -50°С до +250°С. Тиск: до 64 бар. | VEGASWING 61 | 2 |
| 6 | 2-1 | Концентрація метану та чадного газу в приміщенні котельні | По місцю | Газосигналізатор Живлення: 230 В. Метан, чадний газ | Варта 2-03 | 1 |

*Продовження таблиці 3.1*

| № | № Позиції | Технологічний параметр | Місце встановлення ТЗА | Назва засобу та коротка технічна характеристика | Тип | К-сть |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 2-4 | Тиск природного газу | По місцю | Реле тиску<br>Від 100 до 500 мбар. | Dungs GW 500 A5 | 1 |
| 8 | 7-1<br>8-1<br>9-4<br>10-4 | Перепад тиску на насосах та фільтрах | По місцю | Диференційне реле перепаду тиску<br>Діапазон: 0 ÷ 0.9 бар | RT266AL 017D008166 | 4 |
| 9 | 1-3<br>5-6<br>6-3 | Регулювання подачі природного газу | По місцю | Регулюючий клапан<br>Робочий тиск: до 16 бар.<br>Діапазон температур: від -10°C до +180°C. | Bürkert Type 2301 | 3 |
| 10 | - | Регулювання відкриття клапану | По місцю | Позиціонер<br>Вихідний сигнал: 4 – 20 мА<br>Хід клапана: 3–45 мм. | Bürkert Positioner Type 8692 | 3 |
| 11 | 1-3 | Аварійне перекриття природного газу | По місцю | Електромагнітний клапан<br>Максимальний робочий тиск: 500 мбар. | Dungs MVDLE 5065/5 | 1 |
| 12 | 9-1<br>10-1<br>12-1<br>13-1<br>14-1 | Циркуляція теплоносія в системі | По місцю | Насоси призначені для перекачування води в системі.<br>Частота: 2850 об/хв. | DAB K 55/50 T | 5 |
| 13 | 3-3<br>4-3<br>11-3 | Підмішування теплоносія | По місцю | Триходовий сідельний клапан<br>Діаметр: DN100 PN16<br>макс. T = 150°C | Siemens VXF47.100 | 3 |
| 14 | 9-2<br>10-2<br>13-2<br>14-5<br>15-8 | Увімкнення насосів системи | По місцю | Пристрій плавного пуску.<br>Потужність двигуна: до 3 кВт.<br>Управління: 24 В AC. | SIRIUS 3RW30 | 5 |

*Кінець таблиці 3.1*

| № | № Позиції | Технологічний параметр | Місце встановлення ТЗА | Назва засобу та коротка технічна характеристика | Тип | К-сть |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | - | Позиціонування штока клапана | По місцю | Електропривід Аналоговий сигнал 4…20мА | Siemens SBV151.00 | 3 |
| 16 | - | Індикація, реєстрація та регулювання технологічних параметрів | На щиті | Програмований логічний контролер. Напруга живлення 24В | Vision V570 | 1 |
| 17 | - | | На щиті | Пристрій вводу/виводу Аналогові входи: 4 Аналогові виходи: 4 Дискретні входи: 18 Дискретні входи: 17 | V200-18-E4XB | 1 |
| 18 | - | | На щиті | Модуль розширення Аналогові входи: 8 | IO-ATC8/AI8 | 1 |
| 19 | - | | На щиті | Модуль розширення Аналогові виходи: 6 | IO-AO6X | 1 |

**Висновок**

У третьому розділі виконано обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації котельної установки. Визначено контури керування та їхні вимоги, підібрано відповідні вимірювальні перетворювачі й виконавчі механізми, наведено їхні технічні характеристики. Обрано й описано мікропроцесорний програмований засіб, проведено його конфігурування разом із необхідними модулями вводу-виводу. Завершальним етапом сформовано специфікацію засобів автоматизації, що узгоджує всю апаратну частину проєкту.

# РОЗДІЛ 4

# РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС

Функціональна схема автоматизації котельні, призначеної для опалення адміністративних та виробничих приміщень промислового підприємства представлена на аркуші 1 графічної частини дипломного проєкту. Функціональна схема автоматизації передбачає реалізацію наступних16-ти контурів регулювання, вимірювання, індикації та сигналізації технологічних параметрів:

За допомогою первинного вимірювального перетворювача тиску (1-1) регулюється тиск газу на вході в котел. Отриманий аналоговий сигнал надходить на вхід ПЛК, який відповідно до алгоритму роботи формує команду для позиціонера регулювання клапана (1-3), змінюючи його положення та, відповідно, витрату газу.

Газоаналізатором (2-1) проводиться контроль концентрації чадного газу та метану в приміщенні котельні. Паралельно за допомогою реле тиску (2-4) вимірюється тиск палива, а за допомогою реле рівня (2-2) та (2-3) фіксують показники рівня води в самих котлах. Усі вихідні сигнали передаються на ПЛК, який за заданим алгоритмом у випадку аварійної ситуації формує команду на переміщення регулюючого клапана (2-5) для автоматичного перекриття витрати газу до пальників.

Термоперетворювачами опору (3-1) та (4-1) вимірюємо температуру зворотного теплоносія в системі. Їхні аналогові вихідні сигнали надходять на відповідні входи ПЛК, який за програмованим алгоритмом формує команду на переміщення регулюючих клапанів (3-3) та (4-3) для підмішування гарячої води.

Термоперетворювачем опору (5-1) вимірюємо температуру мережевої води на виході з гідравлічного роздільника, а термоперетворювачем (5-2) — температуру зовнішнього середовища. Обидва аналогові сигнали надходять на відповідні входи ПЛК і використовуються як завдання для регулювання контурів. Для контролю температури теплоносія на виході з котла застосовано

термоперетворювачі опору (5-4) та (6-1); їхні аналогові вихідні сигнали також надходять на аналогові входи ПЛК. Відповідно до алгоритму роботи, ПЛК формує регулюючий сигнал та через аналоговий вихід передає на позиціонер, який керує газовими клапанами (5-6) та (6-3), впливаючи на витрати газу, що надходять до пальників.

За допомогю реле перепаду тиску (7-1) та (8-1) контролюють перепад тиску мережевого теплоносія на водяному фільтрі. Їхні вихідні сигнали надходять на дискретні входи ПЛК. Якщо перепад перевищує верхню граничну межу, ПЛК відповідно до програми формує керуючий сигнал для сигналізації засмічування фільтра.

Перекачування води здійснюється насосами (9-1) та (10-1), які отримують команду на запуск від відповідних пристроїв плавного випуску (9-2) та (10-2). Контроль перепаду тиску на кожному насосі виконують реле перепаду тиску (9-4) та (10-4). Якщо цей перепад перевищує встановлену граничну величину, реле передає дискретний сигнал на вхід ПЛК. Відповідно до програми ПЛК, у разі перевищення гранично допустимого рівня за верхньою межею, формується сигнал для сигналізації.

Термоперетворювачем опору (11-1) вимірюємо температуру теплоносія, що подається до контуру опалення виробничого приміщення. Його аналоговий вихідний сигнал надходить на відповідний аналоговий вхід ПЛК. Згідно з програмним алгоритмом, ПЛК обробляє це значення й формує керуючий сигнал на позиціонері регулюючого клапана (11-3), що відповідає за підмішування холодної води.

Перекачування води до контурів опалення та вентиляції створюється за допомогою насосів (12-1), (13-1) та (14-1), які підтримують керуючий сигнал на запуск від відповідних пристроїв плавного випуску (12-2), (13-2) та (14-2), увімкнення кожного насоса можливе з ПЛК.

Вимірювання тиску води на вході до калориферів системи вентиляції здійснюється вимірювальним перетворювачем тиску (15-1). Аналоговий сигнал

якого надходить на відповідний вхід ПЛК, який за програмою при перевищенні встановлених верхньої чи нижньої меж формує сигнал для сигналізації.

У розширювальному баку вимірюється тиск за допомогою вимірювального перетворювачу тиску (16-1). Аналоговий сигнал надходить на відповідний вхід ПЛК, та відбувається індикація тиску.

**Висновок**

У четвертому розділі на основі спрощеної схеми було розроблено розгорнуту функціональну схему автоматизації котельної установки, у якій послідовно відображено всі контури регулювання, вимірювання, сигналізації та захисту. Для кожного контуру визначено джерело процесного сигналу, маршрут його передавання до контролера, логічну обробку в ПЛК та відповідну дію на виконавчий механізм. Описано порядок взаємодії між давачами тиску, температури, рівня, газоаналізаторами, позиціонерами клапанів, насосами й пристроями плавного пуску, а також принципи формування аварійних і попереджувальних сигналів. Схема відображає всі необхідні міжконтурні зв’язки й забезпечує цілісне уявлення про роботу системи керування в реальному режимі, що створює завершену графічну та текстову основу для подальшого етапу розробки програмного забезпечення й монтажу апаратури.

# РОЗДІЛ 5

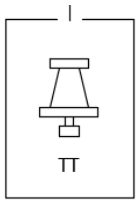
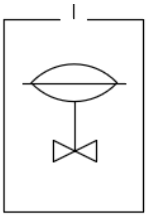
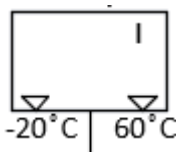
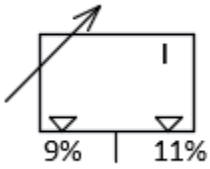
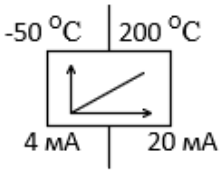
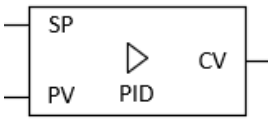
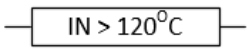
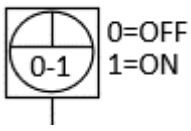
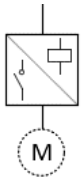
# ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 5.1 Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації

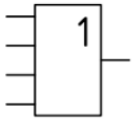
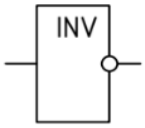
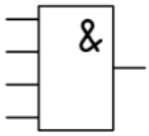
У підрозділі 5.1 спочатку представлено перелік і детальний опис функціональних блоків, необхідних для побудови алгоритмів роботи систем автоматизації. Відповідно до розгорнутої функціональної схеми, для розробки цих алгоритмів використовуються функціональні елементи, які наведені в таблиці 5.1.

*Таблиця 5.1*

Функціональні елементи та їхні зображення

| Графічне позначення | Функціональне призначення | Графічне позначення | Функціональне призначення |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|  | первинний вимірювальний перетворювач, давач, чутливий елемент збору інформації про технологічний параметр |  | виконавчий механізм з аналоговим керуючим сигналом в комплекті з регулюючим органом |
|  | аналоговий індикатор технологічного параметру |  | задавач аналогового сигналу з обмеженням по діапазону |
|  | лінійне перетворення вхідного аналогового сигналу |  | - функціональний елемент аналогового ПІД закону регулювання |
|  | компаратор сигналів | | перемикач режимів роботи регулятора або схеми керування |
|  | перемикач 0-1 (ключ) |  | електромагніте реле, контактор |

*Продовження таблиці 5.1*

| Графічне позначення | Функціональне призначення | Графічне позначення | Функціональне призначення |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|  | логічне побітове додавання числових або дискретних значень (OR) |  | логічна побітова інверсія числового або дискретного значення |
|  | логічний побітовий добуток числових або дискретних значень (AND); | | |

Контур 1. Регулювання тиску газу в газопроводі зміною витрати газу

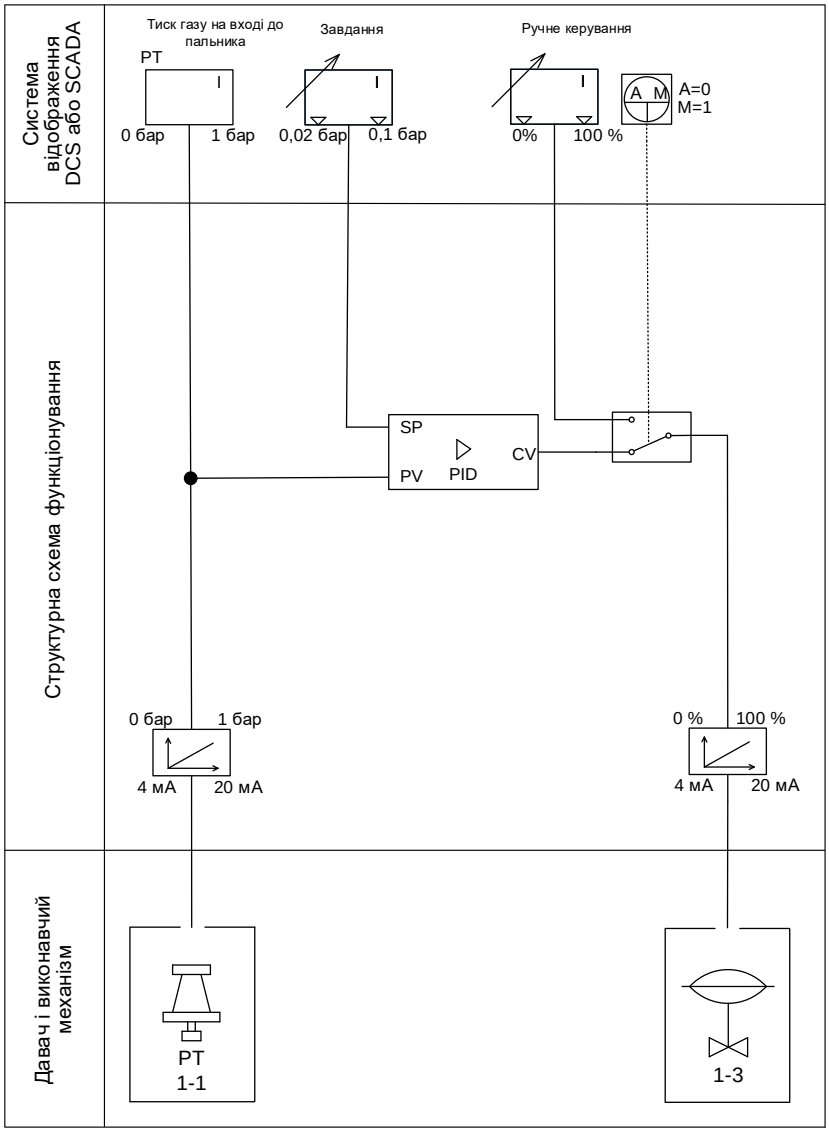



*Рисунок 5.1 Розроблений алгоритм функціонування контуру №1 «Регулювання тиску газу в газопроводі зміною витрати газу»*

Контур 2. Захист відносно тиску палива, рівня в котлах та загазованості приміщення котельні

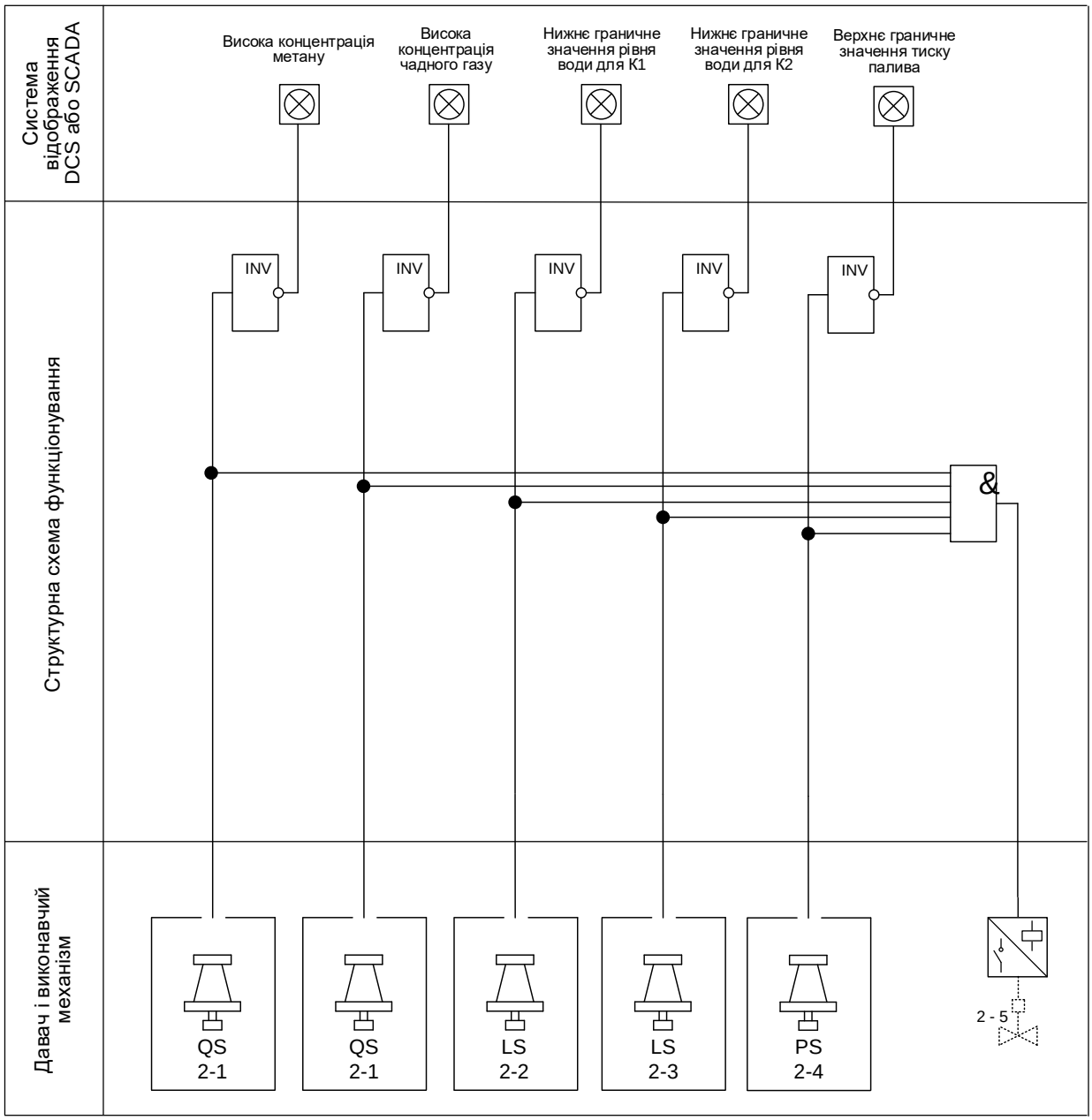



*Рисунок 5.2 Розроблений алгоритм функціонування контуру №2 «Захист відносно тиску палива, рівня в котлах та загазованості приміщення котельні»*

Контур 3. Регулювання температури зворотного теплоносія до котла №1 зміною витрати підмішування гарячого теплоносія

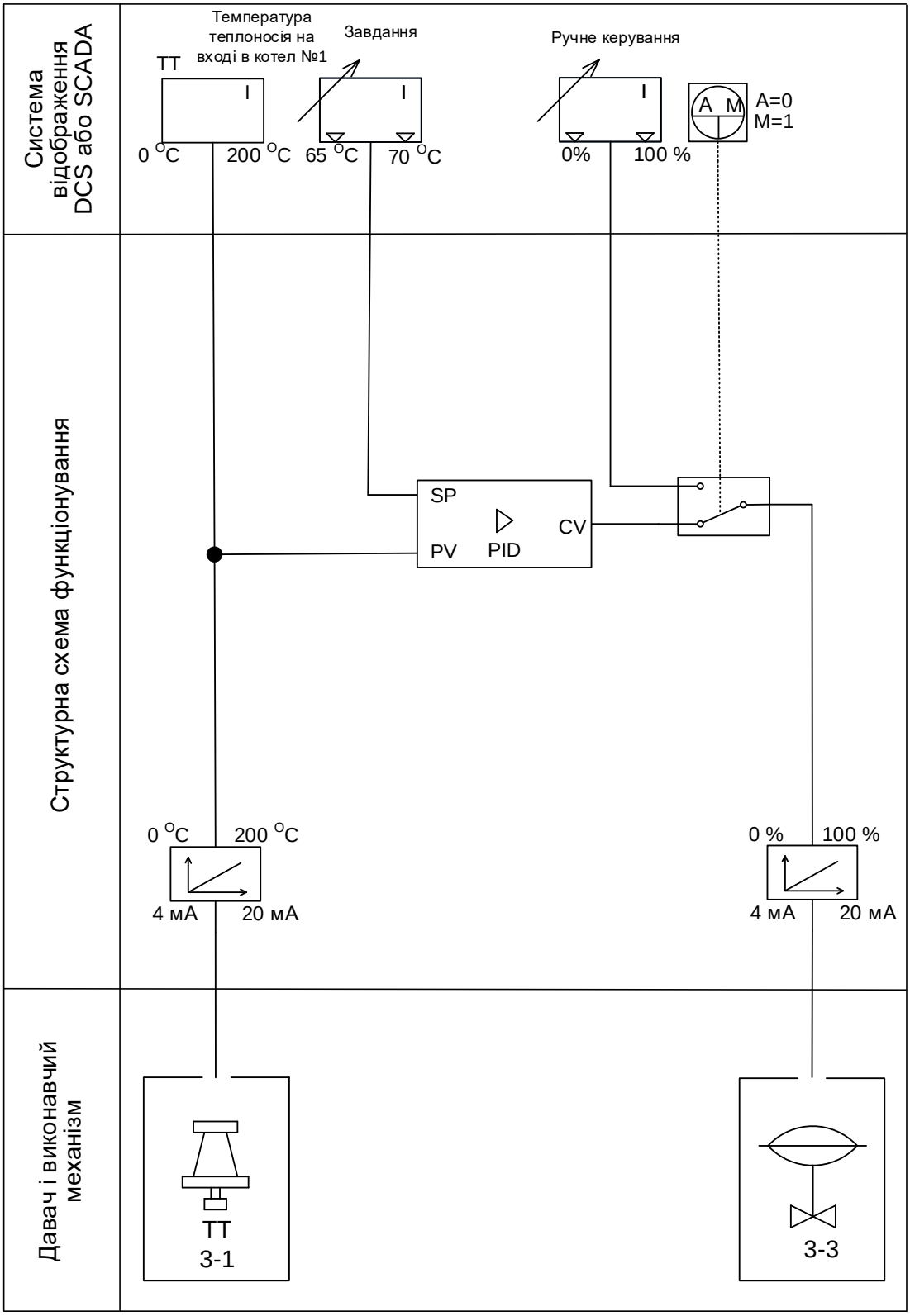



*Рисунок 5.3 Розроблений алгоритм функціонування контуру №3 «Регулювання температури зворотного теплоносія до котла №1 зміною витрати підмішування гарячого теплоносія»*

Контур 4. Регулювання температури зворотного теплоносія до котла №2 зміною витрати підмішування гарячого теплоносія

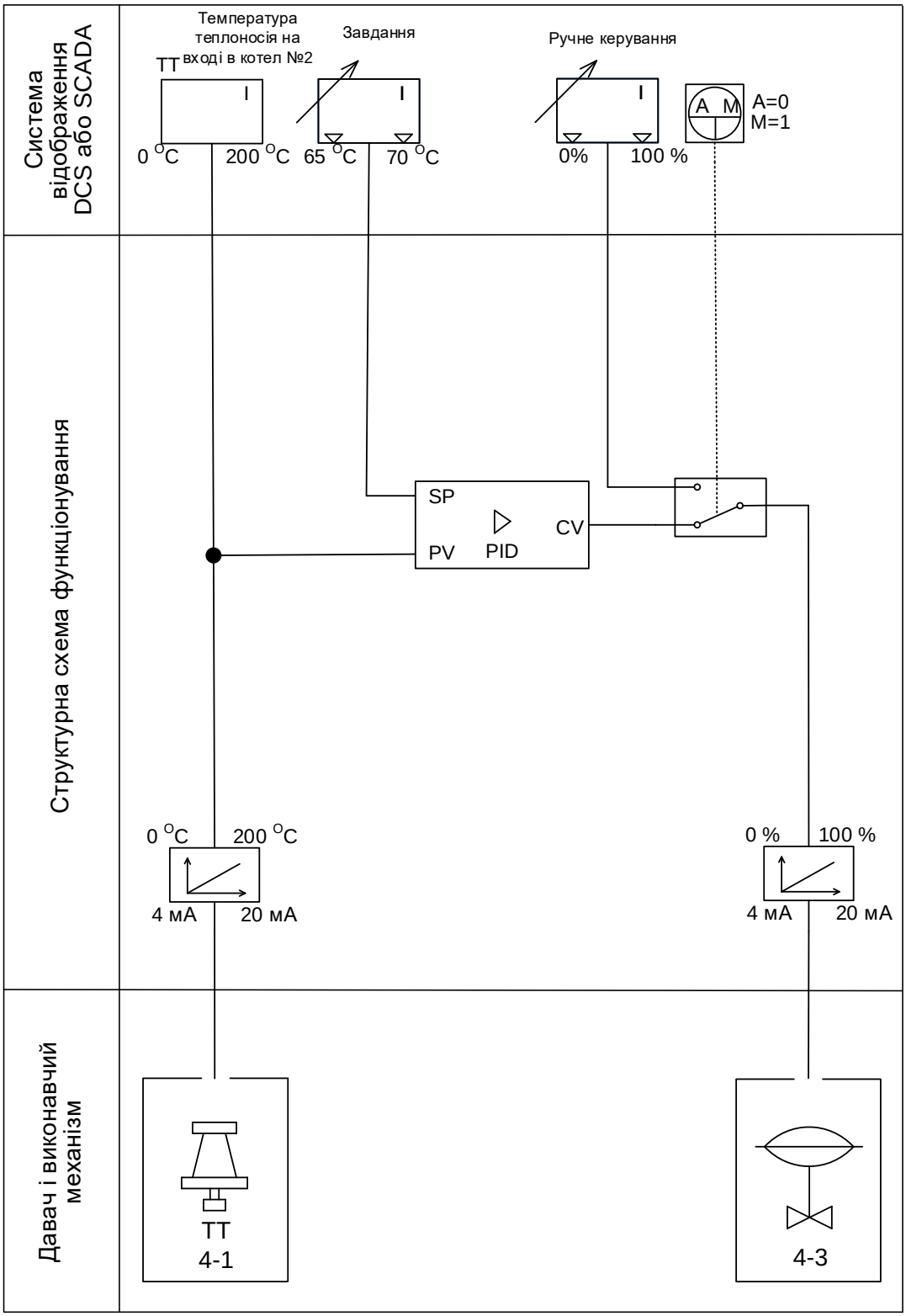



*Рисунок 5.4 Розроблений алгоритм функціонування контуру №4 «Регулювання температури зворотного теплоносія до котла №2 зміною витрати підмішування гарячого теплоносія»*

Контур 5. Каскадна система регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення з коректуванням завдання регулятора витрати газу до пальника №1

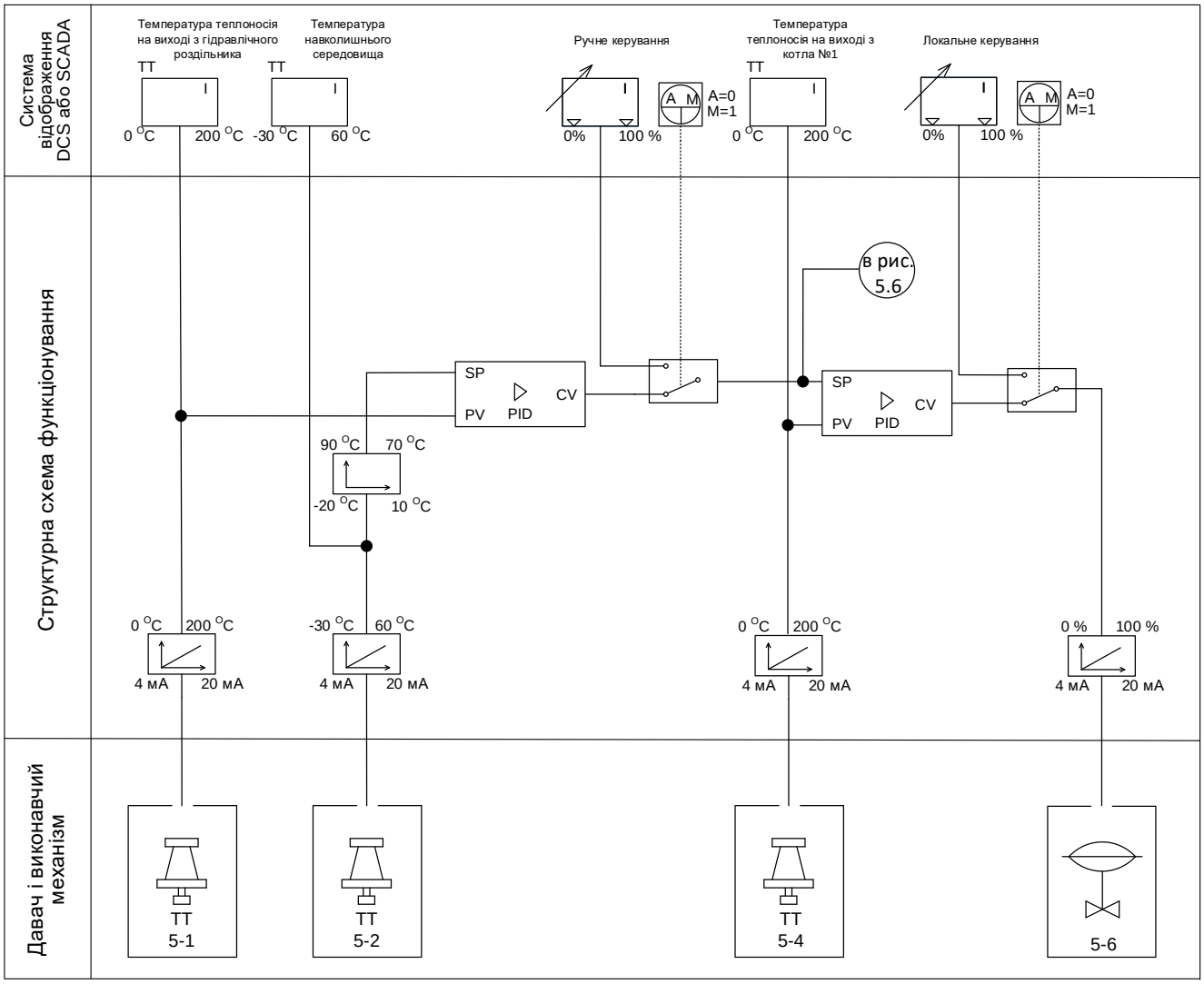



*Рисунок 5.5 Розроблений алгоритм функціонування контуру №5 «Каскадна система регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення з коректуванням завдання регулятора витрати газу до пальника №1»*

Контур 6. Регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення зміною витрати газу до пальника №2

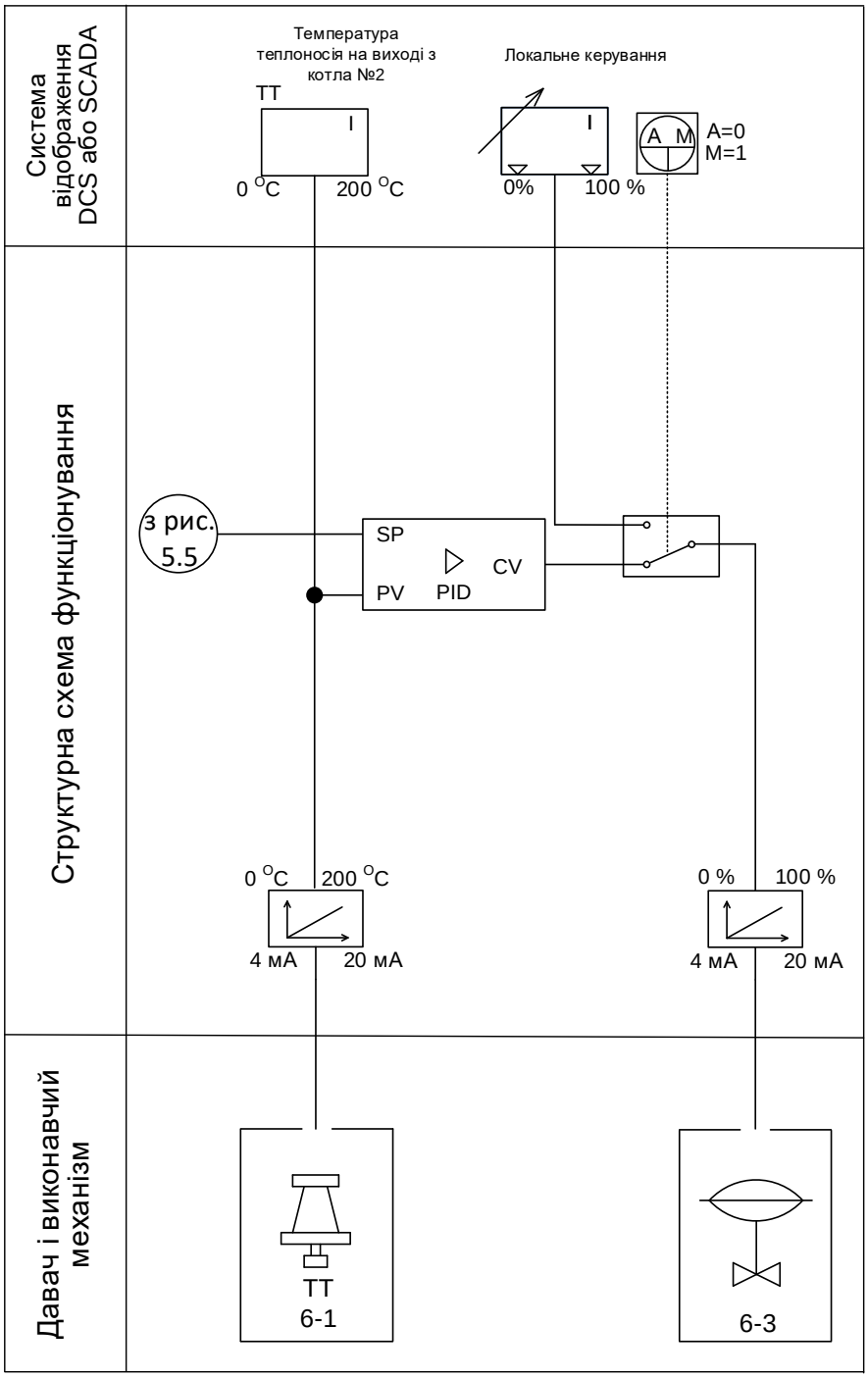



*Рисунок 5.6 Розроблений алгоритм функціонування контуру №6 «Регулювання температури прямої мережевої води в системі опалення зміною витрати газу до пальника №2»*

Контур 7 та 8. Контроль та сигналізація перепаду тиску на водяних фільтрах №1 та №2

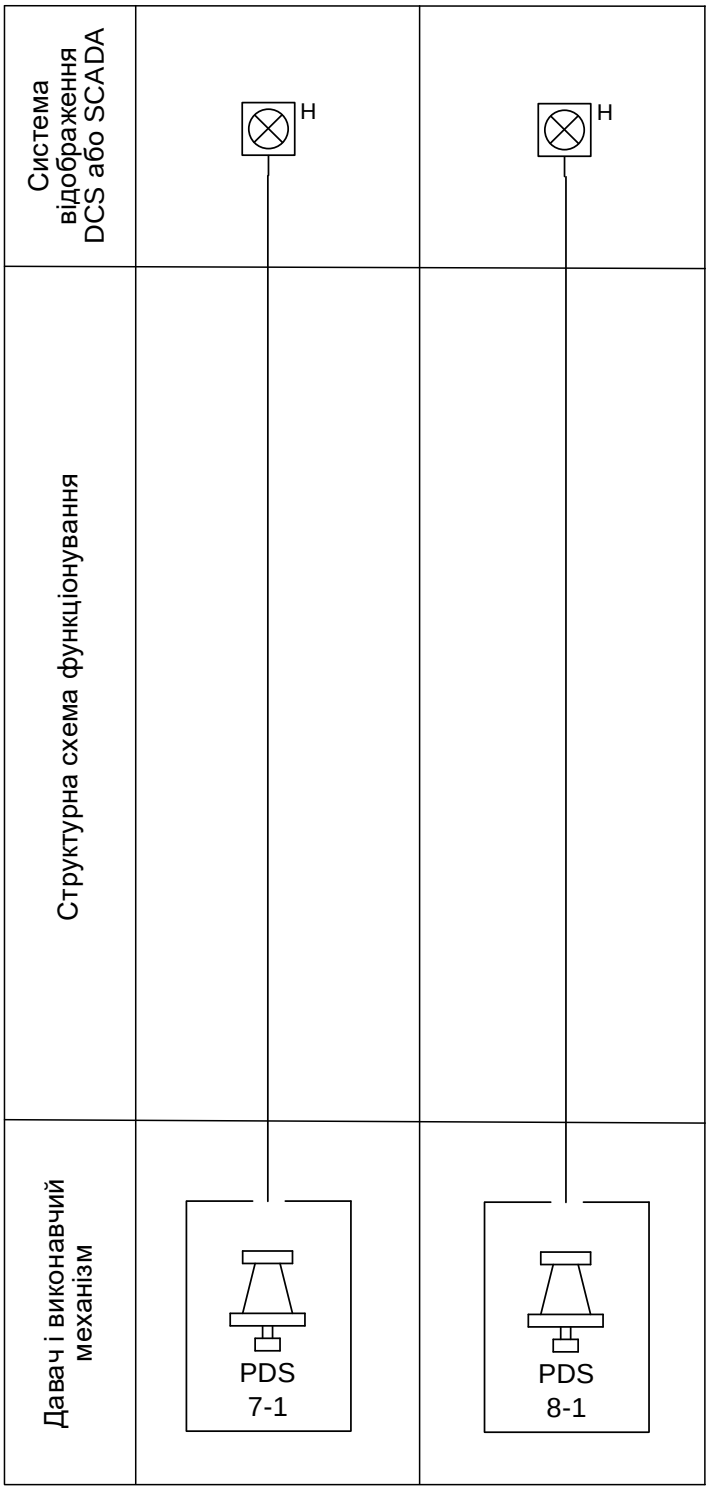



*Рисунок 5.7 Розроблені алгоритми функціонування контурів №7 та №8 «Контроль та сигналізація перепаду тиску на водяних фільтрах №1 та №2»*

Контур 9 та 10. Керування циркуляційними насосами №1 та №2 системи опалення

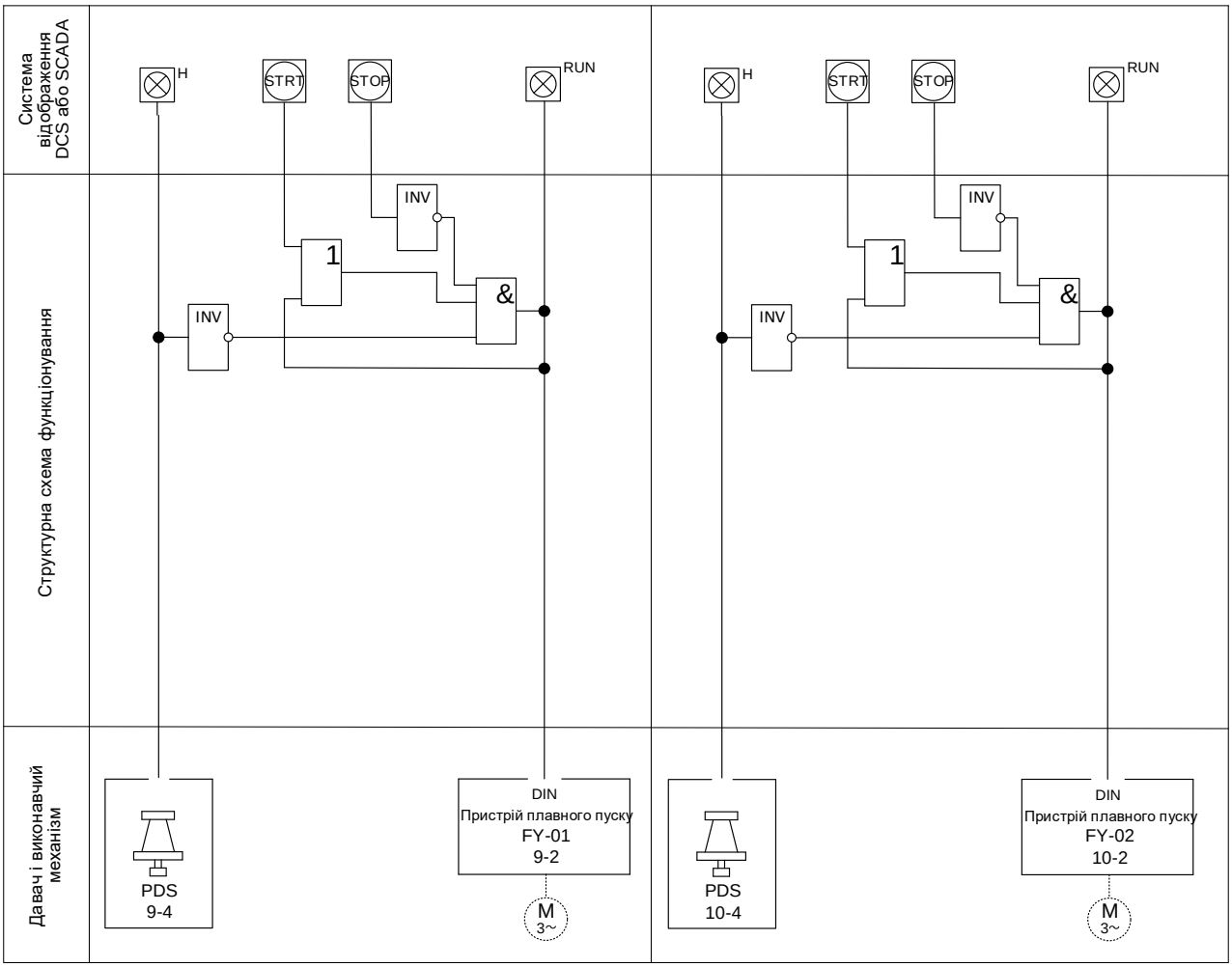



*Рисунок 5.8 Розроблені алгоритми функціонування контурів №9 та №10 «Керування циркуляційними насосами №1 та №2 системи опалення»*

Контур 11. Регулювання температури теплоносія для подачі до контуру опалення адміністративного приміщення зміною витрати підмішування зворотного теплоносія

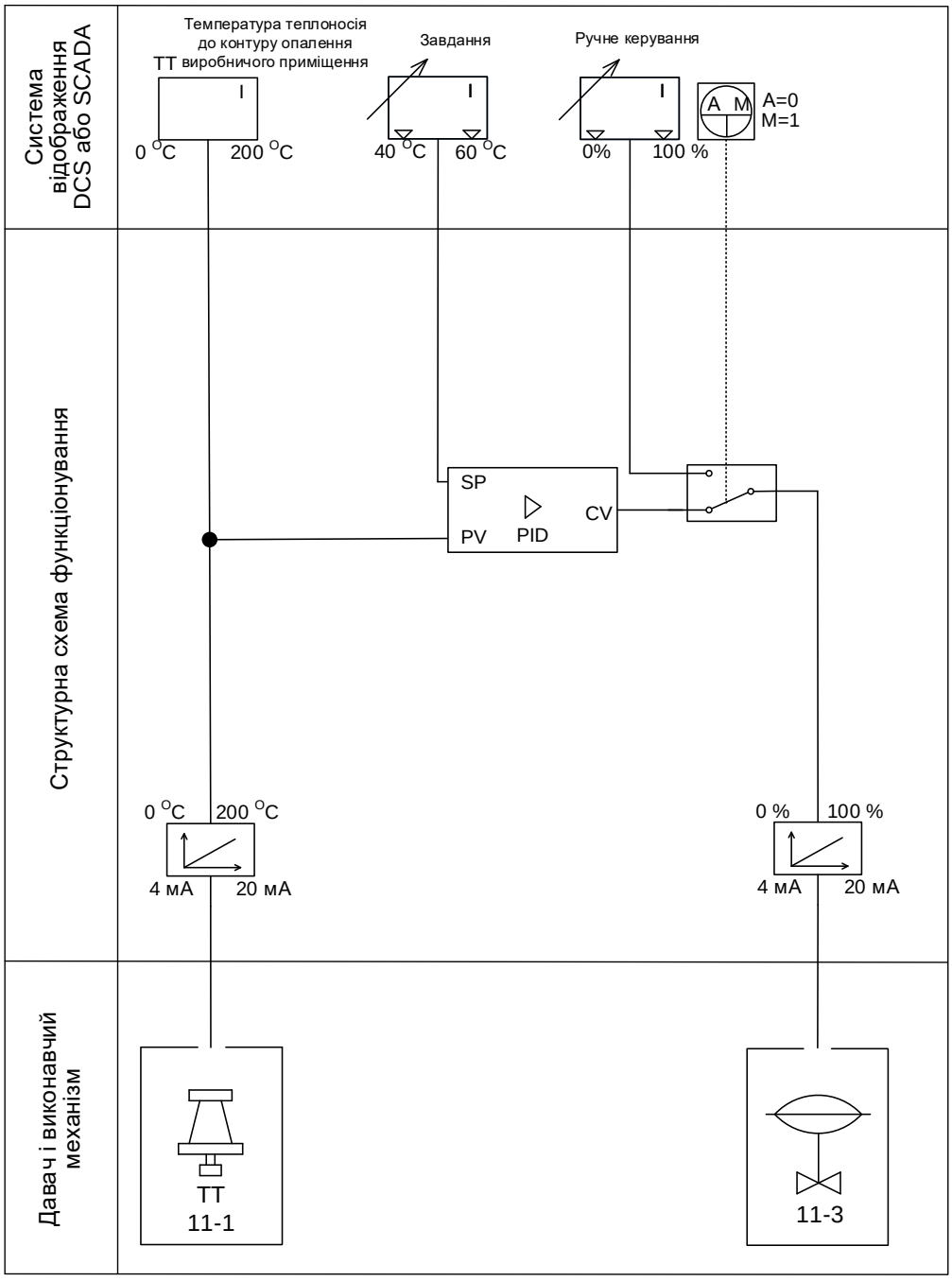



*Рисунок 5.9 Розроблений алгоритм функціонування контуру №11 «Регулювання температури теплоносія для подачі до контуру опалення адміністративного приміщення зміною витрати підмішування зворотного теплоносія»*

Контур 12, 13 та 14. Керування насосами для подачі теплоносія до контурів опалення адміністративного та виробничого приміщень, а також до системи вентиляції

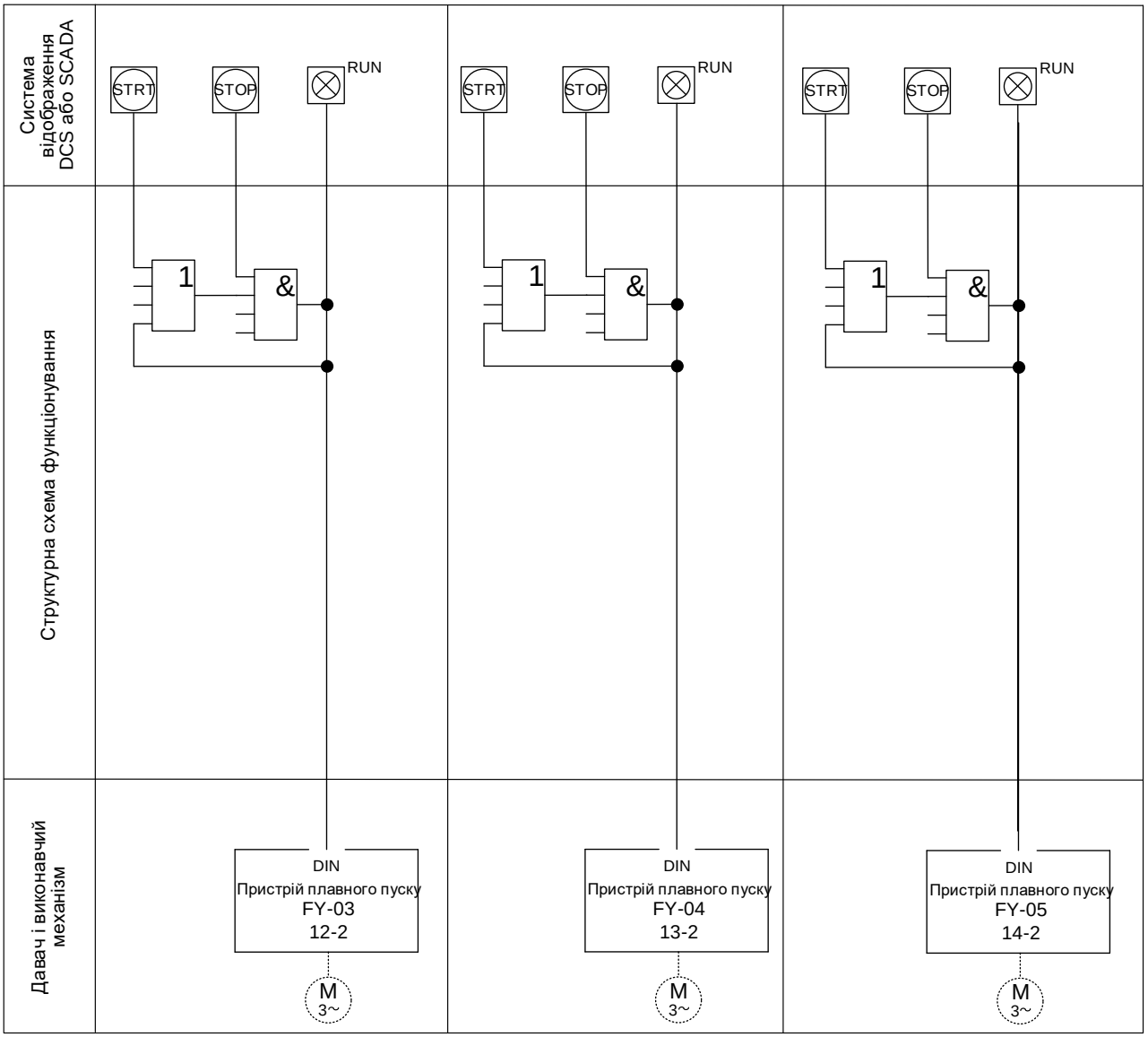



*Рисунок 5.10 Розроблені алгоритми функціонування контурів №12, №13 та №14 «Керування насосами для подачі теплоносія до контурів опалення адміністративного та виробничого приміщень, а також до системи вентиляції»*

Контур 15. контроль та сигналізація тиску в трубопроводі до системи вентиляції

Контур 16. Індикація тиску в розширювальному баку

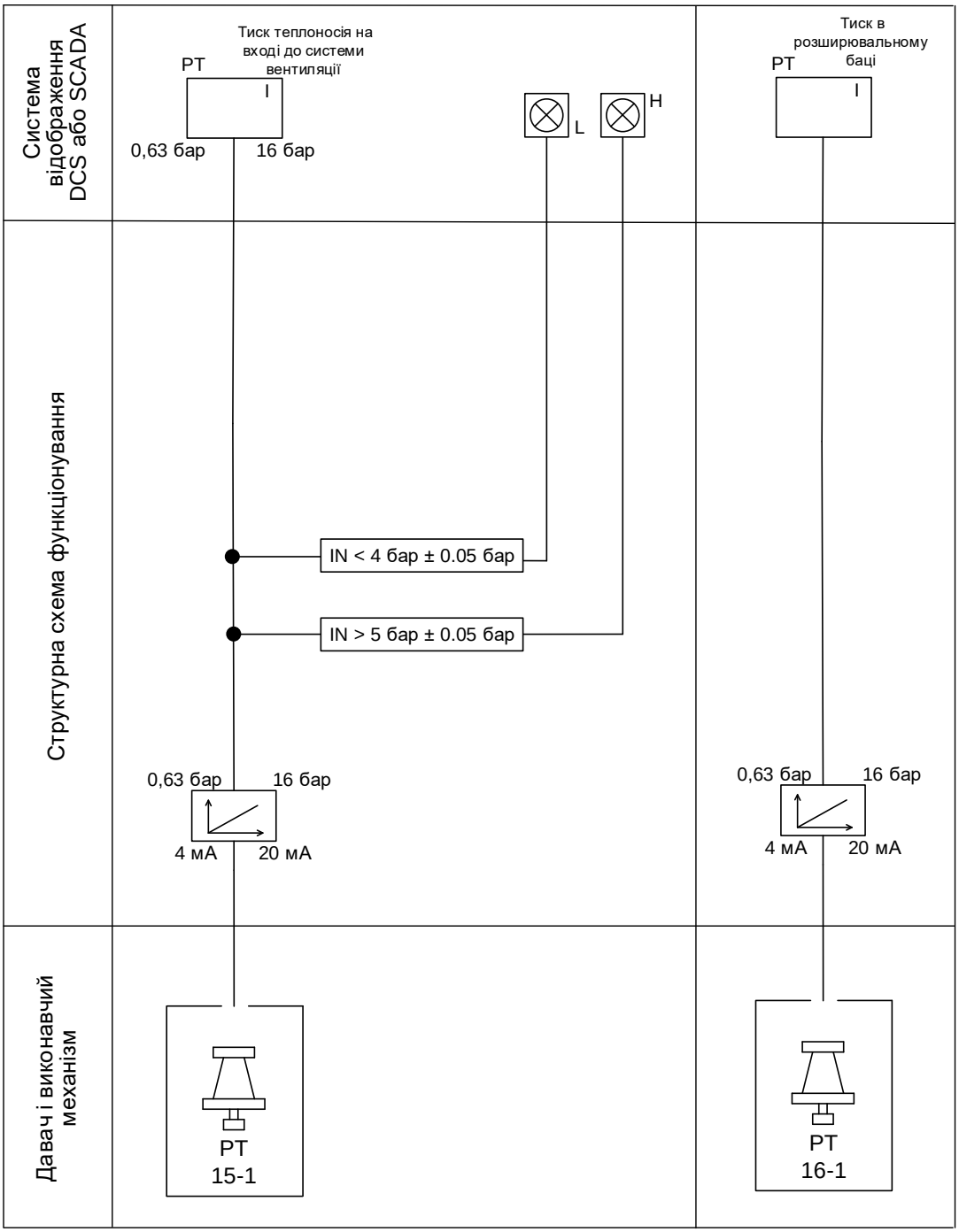



*Рисунок 5.11 Розроблені алгоритми функціонування контурів №15 «Вимірювання тиску в трубопроводі до системи вентиляції» та №16 «Індикація тиску в розширювальному баку*

## 5.2 Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

В рамках цього розділу подано загальний огляд реалізованої програми, яка є невід'ємною складовою частиною мікропроцесорного програмованого засобу. Розглянуті програмні блоки демонструють підхід до побудови логіки функціонування системи з урахуванням різних аспектів її роботи. Подані візуальні матеріали дозволяють на загальному рівні ознайомитись із структурою програмного забезпечення.

### Масштабування вихідного сигналу первинного вимірювального перетворювача тиску палива

На даному етапі програми реалізовано масштабування аналогового сигналу, що надходить із первинного вимірювального перетворювача тиску палива. Як відомо, давачі тиску передають інформацію у вигляді аналогового сигналу, який контролер зчитує як цифрове значення в певному діапазоні — від 0 до 16383 (14 біт). Однак для подальшої обробки сигналу потрібне переведення цього значення у фізичну одиницю, а саме — мбар.

У цьому випадку використовується функціональний блок LINEAR, який виконує лінійну інтерполяцію. Він дозволяє встановити відповідність між цифровими значеннями та реальними фізичними величинами. У прикладі налаштування задані наступним чином:

X1 = 0, Y1 = 0 — це означає, що коли давач передає 0 (мінімум), тиск дорівнює 0 мбар.

X2 = 16383, Y2 = 1000 — при максимальному значенні з аналогового входу (16383) тиск становить 1000 мбар.

Таким чином, будь-яке проміжне значення автоматично вимірюється в межах від 0 до 1000 мбар.

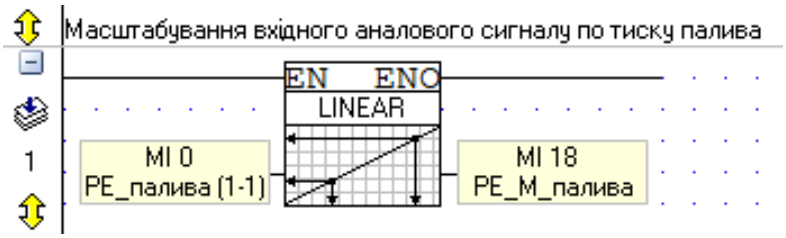



*Рисунок 5.12 Блок масштабування аналогового сигналу з первинного вимірювального перетворювача тиску палива у VisiLogic*

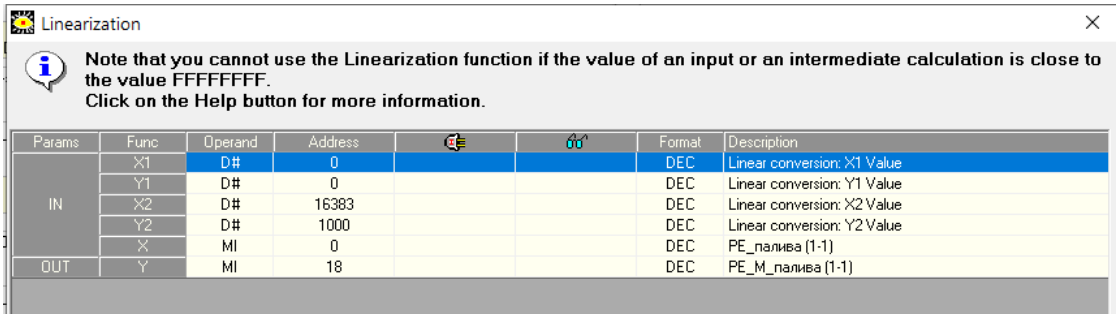



*Рисунок 5.13 Налаштування функціонального блоку LINEAR для лінеаризації вхідного сигналу*

Отримане масштабоване значення записується в реєстр MI 18 (PE_M_палива), яке вже використовується далі в програмі як фактичне значення тиску палива.

Цей блок є базовим, але критично важливим елементом у всій системі, оскільки він забезпечує правильну інтерпретацію сигналів з пристроїв по місцю.

**Блок ПІД-регулювання та його налаштування**

На наступному етапі реалізовано автоматичне регулювання технологічного параметра за допомогою ПІД-регулятора (пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора). У цьому прикладі використовується функціональний блок PID A.TUNE CONFIG, який виконує як базову ПІД-регуляцію, так і автоналаштування параметрів.

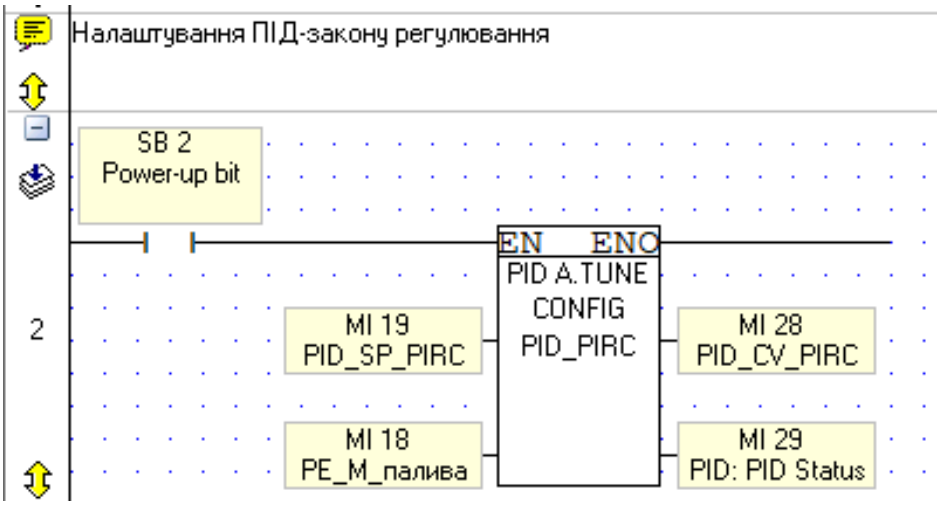



*Рисунок 5.14 Реалізація ПІД-регулятора у середовищі VisiLogic*

Name:
PID_PIRC

| Params | Type | Add | Format | Description |
|---|---|---|---|---|
| IN | MI | 19 | DEC | PID_SP_PIRC |
| | MI | 18 | DEC | PE_M_палива (1-1) |
| | MI | 20 | DEC | PID: Proportional band - defined in units of 0.1% (P gain) |
| | MI | 21 | DEC | PID: Integral time - defined in units of 1 second (I gain) |
| | MI | 22 | DEC | PID: Derivative time - defined in units of 1 second (D gain) |
| | MI | 23 | DEC | PID: Sample Time - defined in units of 10 mSec .Recommended va |
| | MB | 0 | | PID: Action: 0: Reverse(Heating-default) 1: Direct(Cooling) |
| | MI | 24 | DEC | PID: Input Range - Process Value Low limit |
| | MI | 25 | DEC | PID: Input Range - Process Value High limit |
| | MI | 26 | DEC | PID: Output Range - Control Value Low limit |
| | MI | 27 | DEC | PID: Output Range - Control Value High limit |
| OUT | MI | 28 | DEC | PID_CV_PIRC |
| | MI | 29 | DEC | PID: PID Status |
| | MI | 30 | DEC | Auto-tune parameters, 32 MIs - 1 of 32 |

*Рисунок 5.15 Таблиця налаштувань параметрів ПІД-регулювання (SP, PV, P, I, D, межі, статус)*

Основні елементи:

- MI 19 — PID_SP_PIRC: задане значення (Setpoint).
- MI 18 — PE_M_палива: вхідне значення (поточне значення тиску палива).
- MI 28 — PID_CV_PIRC: вихідна керуюча дія.
- MI 29 — статус ПІД-регулятора.
- MI 20–27 — параметри налаштування П, І, Д, вибір напрямків регулювання, межі сигналу та період дискретизації.

Функція автоналаштування (auto-tune) дозволяє автоматично налаштувати оптимальні коефіцієнти П, І та Д, зменшуючи потребу в ручному підборі параметрів. Вона активується один раз після вмикання системи за допомогою бітового контакту SB 2 (Power-up bit), що ініціює конфігурацію PID.

Цей блок використовується, зокрема, для точного контролю тиску палива, забезпечуючи стабільну роботу системи навіть при змінних умовах навантаження.

**Налаштування меж вхідного та вихідного сигналів ПІД-регулятора**

У фрагменті програми надаються допустимі межі сигналів, які надходять до ПІД-регулятора, а також обмеження для вихідного керуючого сигналу. Це важливий етап, який забезпечує стабільність роботи регулятора та захищає систему від некоректних значень або перевантажень.

Межі вхідного сигналу (Process Value):

Встановлюється функція значення, у якій буде працювати ПІД-регулятор:

MI 24 = 0 — нижня межа вхідного сигналу.

MI 25 = 1000 — верхня межа (1000 мбар для тиску палива).

Ці значення зберігаються у відповідних реєстрах за допомогою блоку STORE.

Межі вихідного сигналу (Control Value):

Обмеження для керуючого впливу (у відсотках від 0 до 100):

MI 26 = 0 — мінімальний рівень керуючого сигналу.

MI 27 = 100 — максимальний рівень керуючого сигналу.

Це зроблено для обмеження відсотку відкриття клапана.

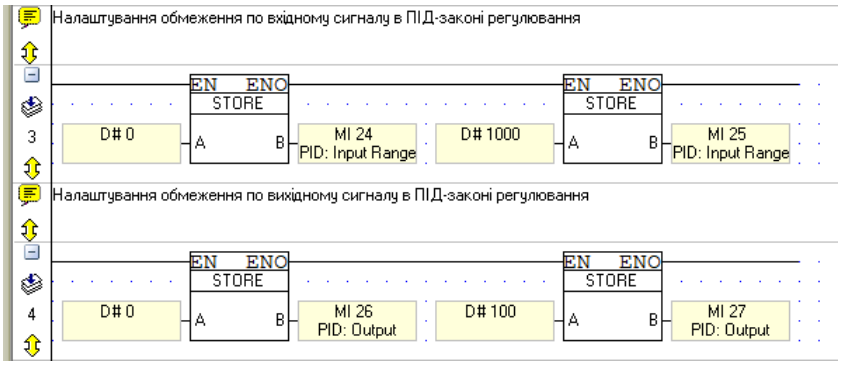



*Рисунок 5.16 Налаштування меж вхідного та вихідного сигналів у ПІД-регуляторі за допомогою інструкції STORE*

Таке налаштування є стандартною практикою при роботі з ПІД-регуляторами, оскільки можна уникнути ситуацій, коли значення сигналу виходить за фізичні можливості або безпечні межі.

**Увімкнення паузи обчислення I-частини ПІД-регулятора**

На цьому етапі програми реалізовано механізм призупинення дії інтегральної складової (I) ПІД-регулятора, який може бути критично у фазі запуску або в періоді нестабільності процесу.

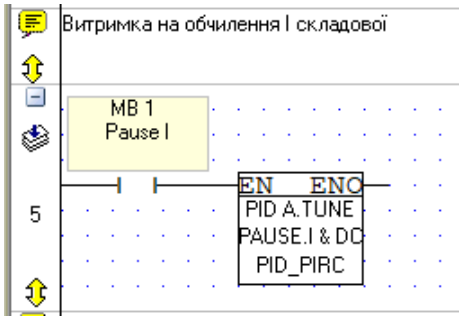



*Рисунок 5.17 Реалізація функції паузи для інтегральної складової ПІД-регулятора*

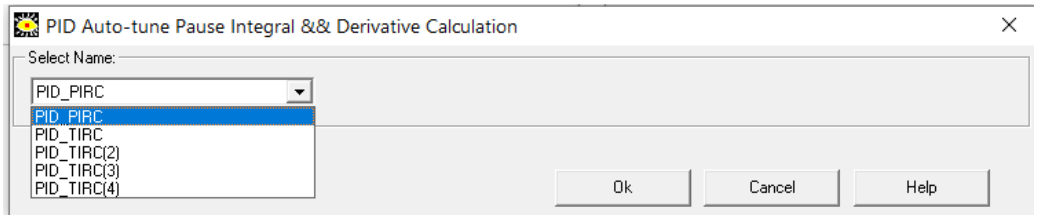



*Рисунок 5.18 Вікно вибору ПІД-регулятора для призупинення обчислення інтегральної та диференційної складових у VisiLogic*

За допомогою бітової зміни MB 1 (Pause I) активується режим паузи, який передається у відповідний вхід функціонального блоку PID A.TUNE PAUSE.I & D.

Цей режим дозволяє тимчасово вимкнути вплив інтегральних частин регулятора на керуючий сигнал, щоб уникнути накопичення помилок у перехідних процесах. Це особливо корисно, якщо система ще не стабілізувалася, або потрібно запобігти «перерегулювання».

**Запуск ПІД-регулятора**

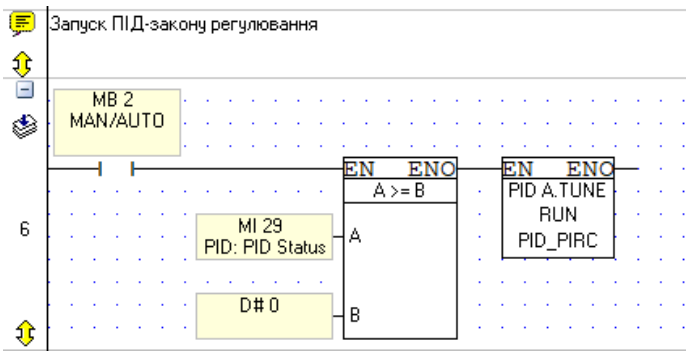



*Рисунок 5.19 Запуск ПІД-регулятора у VisiLogic*

Цей фрагмент програми відповідає перехід ПІД-регулятора в активний режим (RUN), що дозволяє запустити автоматичне регулювання технологічного параметра.

Основні компоненти:

MB 2 (MAN/AUTO) — керуючий біт, який визначає режим роботи: ручний або автоматичний.

MI 29 (PID Status) — поточний статус регулятора.

D#0 — порогове значення для перевірки статусу.

Блок A ≥ B виконує логічну перевірку: якщо статус регулятора більший або дорівнює нулю, та при активному сигналі MB 2 активується команда RUN для ПІД-регулятора (PID A.TUNE RUN), яка фактично запускає виконання ПІД-алгоритму в автоматичному режимі.

Цей механізм дозволяє гнучко перемикатися між ручним і автоматичним керуванням, залежно від умов експлуатації або потреби оператора.

**Реалізація плавного переходу між автоматичним і ручним режимом керування**

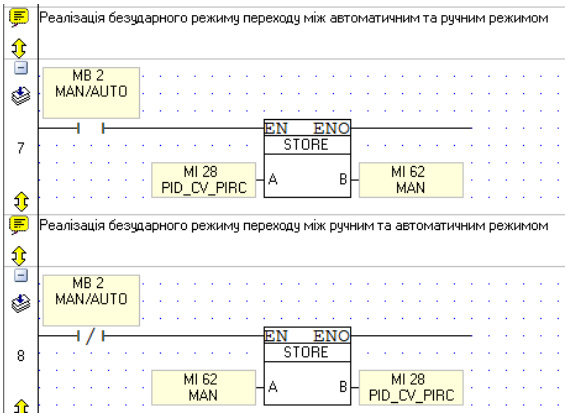



*Рисунок 5.20 Реалізація плавного перемикання між автоматичним і ручним режимом ПІД-регулювання*

Цей фрагмент програми забезпечує безударний (плавний) перехід між режимами керування: автоматичним (AUTO) та ручним (MANUAL). Така реалізація дозволяє уникнути стрибків значень керуючого сигналу при перемиканні режимів, що є в важливим для стабільної роботи обладнання.

Коли активується біт MB 2 (MAN/AUTO), тобто система переходить в автоматичний режим, поточне значення виходу ПІД-регулятора (MI 28) копіюється в змінному ручному режимі (MI 62).

При переході назад у ручний режим значення MI 62 (останній автоматичний вихід) записується назад у MI 28, зберігаючи регулювання плавності.

Цей двонаправлений обмін значеннями гарантує, що в момент перемикання система не змінить різко керуючий вплив, а продовжить працювати з того самого рівня.

**Сигналізація за межами допустимого рівня тиску**

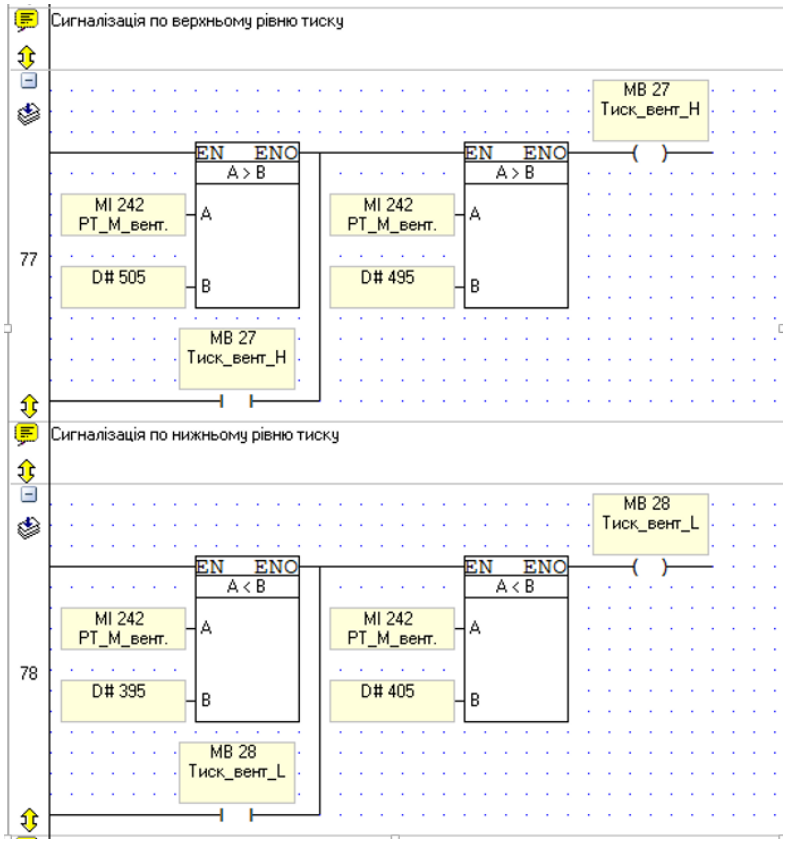



*Рисунок 5.21 Логіка сигналізації при перевищенні та зниженні тиску вентиляційної системи з використанням гістерезису*

У даному фрагменті реалізовано контроль граничних показників тиску системи вентиляції, що дозволяє формувати сигнал тривоги при перевищенні чи зниженні тиску лише встановлених меж.

Верхній рівень тиску (сигналізація перевищення):

Значення тиску зчитується з реєстру MI 242 (PT_M_вент.). Якщо тиск перевищить поріг D#505 (мбар), активується MB 27 (Тиск_вент_H) — сигналізація перевищення. Для виключення сигналізації реалізована гістерезисна перевірка з порогом D#495 — щоб уникнути «миготіння» при коливанні.

Нижній рівень тиску (сигналізація падіння):

Якщо тиск опускається нижче D#395 (мбар), активується MB 28 (Тиск_вент_L) — сигнал низького тиску. Скидання сигналу виконується при перевищенні гістерезисного порогу D#405.

Таке рішення дозволяє уникнути частого перемикання станів сигналізації при незначних коливаннях тиску навколо порогового значення — тобто реалізується захист із використанням гістерезису.

**Регулювання за погодним графіком**

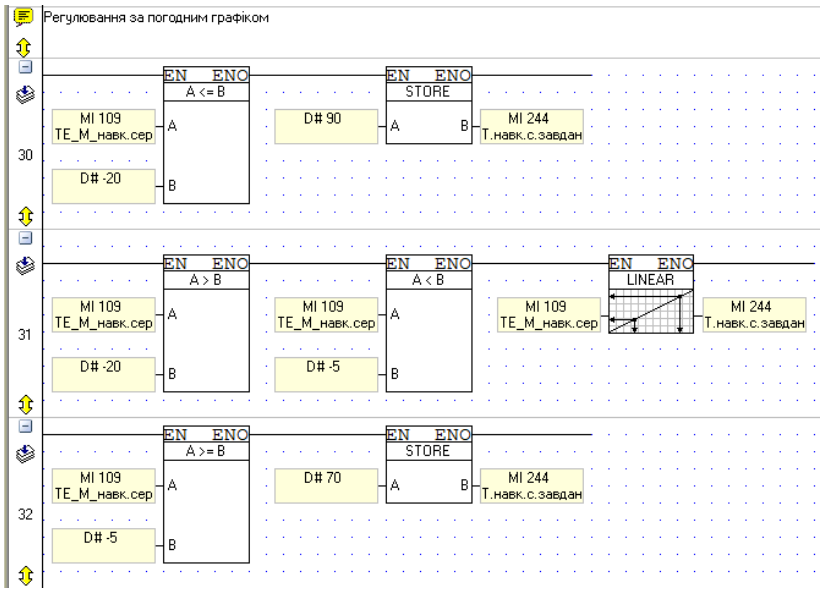



*Рисунок 5.22 Реалізація програми для регулювання за погодним графіком*

Даний фрагмент програми реалізує погодозалежне регулювання — формування температурної умови в залежності від температури зовнішнього повітря. Такий принцип часто використовують у системах опалення, де немає потреби тримати високі температури при теплій погоді.

Якщо температура зовнішнього повітря ≤ -20°C — уставка фіксується на 90°C для теплоносія, що є максимальним нагрівом.

При температурі від -20°C до -5°C — активується LINEAR, який плавно змінює залежно від температури залежність. Таким чином, при зростанні температури погоди — знижується нагрів.

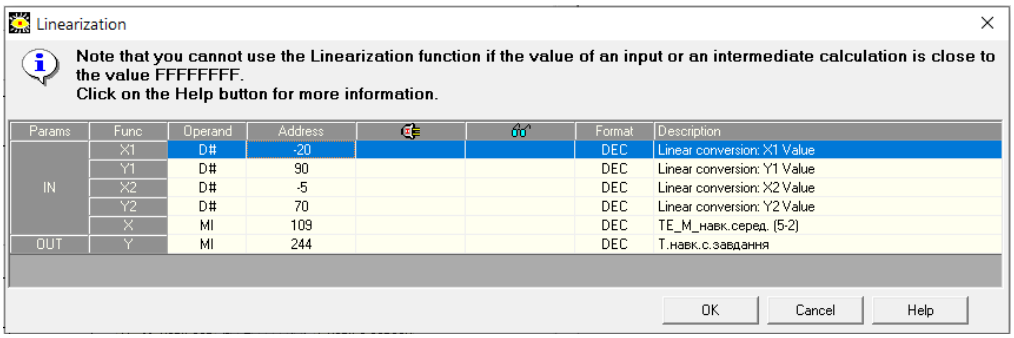



*Рисунок 5.23 Налаштування параметрів блоку LINEAR для погодозалежного формування завдання*

Якщо температура ≥ -5°C — уставка встановлюється на 70°C, це мінімальний нагрів, який буде відчуватися при незначному похолоданні.

Це дозволяє реалізувати оптимізоване управління теплом з урахуванням реальних погодних умов.

**Керування циркуляційними насосами системи опалення**

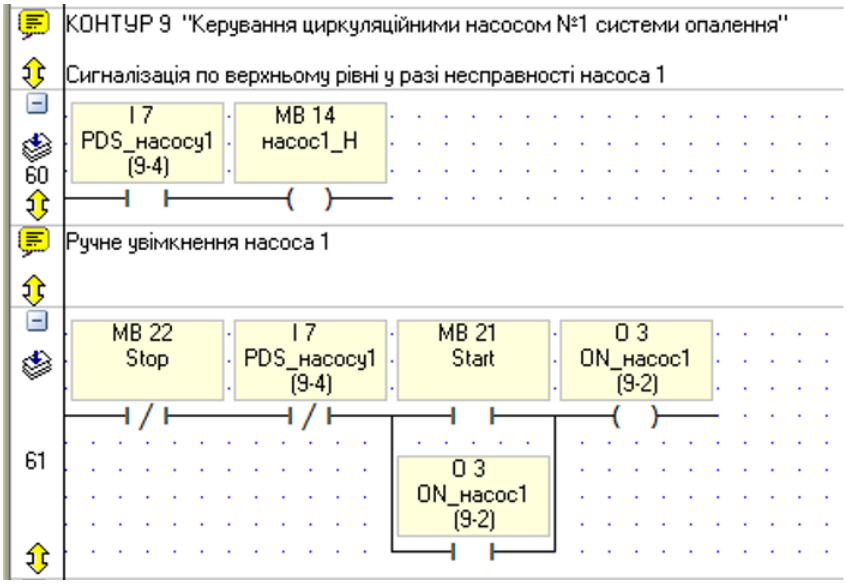



*Рисунок 5.24 Реалізація логіки ручного керування насосом №1 та сигналізації аварійного стану*

На рисунку 5.24 представлено фрагмент програми, що реалізує логіку керування циркуляційним насосом №1 системи опалення.

У разі виявлення несправності за допомогою дискретного входу I7 (PDS_насос1), формується відповідний сигнал MB 14 (насос1_H), який

використаний для відображення на панелі оператора, а також відразу передає сигнал для вимкнення насосу.

Ручне керування увімкненням насоса. Команди на запуск і зупинку видаються відповідно до бітових змін MB 21 (Start) та MB 22 (Stop). Для збереження стану насоса використовується контактне самозбереження, що забезпечує стабільність роботи насоса при короткочасному зникненні сигналу.

Запуск насоса можливий лише у разі відсутності сигналу аварії, тобто при активному стані давача PDS_насос1.

**Масштабування вихідного аналогового сигналу**

*Рисунок 5.25 Масштабування вихідного сигналу ПІД-регулятора для аналогового виходу*

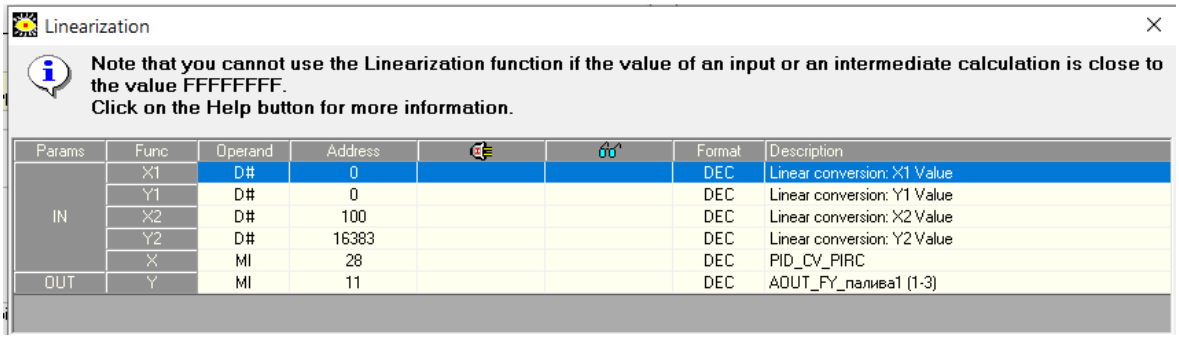



*Рисунок 5.26 Налаштування зворотного лінійного перетворення вихідного сигналу ПІД-регулятора для подачі на аналоговий вихід*

На рисунку 5.25 зображено реалізацію зворотного лінійного перетворення (масштабування) вихідного сигналу ПІД-регулятора у фізичній частині для подачі на аналоговий вихід контролера.

Після обчислення ПІД-регулятором величини (MI 28 PID_CV_PIRC), отримане значення перебуває у внутрішньому масштабі 0–100. Щоб передати цей

сигнал на аналоговий вихід контролера у вигляді 4–20 мА, необхідно виконати зворотне лінійне перетворення.

Вхід функції LINEAR — значення з MI 28 (вихід ПІД).

Вихід функції — MI 11 AOUT_FY_пальник, масштабовані значення.

**Висновок**

У п’ятому розділі сформовано й описано повний пакет програмного забезпечення системи автоматизації котельні. Виходячи з розгорнутої функціональної схеми, для кожного контуру створено графічний алгоритм із використанням стандартизованих функціональних блоків, а далі ці алгоритми перенесено у середовище VisiLogic. У програмі реалізовано масштабування аналогових сигналів, ПІД-регулювання з автоналаштуванням, безударне перемикання між ручним та автоматичним режимами, логіку аварійної сигналізації з гістерезисом, погодозалежне формування уставок і керування насосами. Задіяні програмні об’єкти зв’язано з адресним простором контролера, що забезпечує коректний обмін даними між усіма давачами та виконавчими механізмами. У підсумку розроблена програма функціонування, що представлена на аркуші 2 графічних матеріалів.

# РОЗДІЛ 6

# ПРИНЦИПОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У цьому розділі наведено принципову електричну схему з'єднання засобів автоматизації, виконану на основі розгорнутої функціональної схеми автоматизації. Принципова схема призначена для наочного відображення всіх електричних зв'язків між давачами, виконавчими механізмами, контролером Vision V570 та системою живлення. Електрична принципова схема є ключовим етапом проектування автоматизованої системи, що гарантує коректність монтажу, простоту подальшої експлуатації та відповідність діючим нормативним вимогам.

**Схема живлення модулів ПЛК**

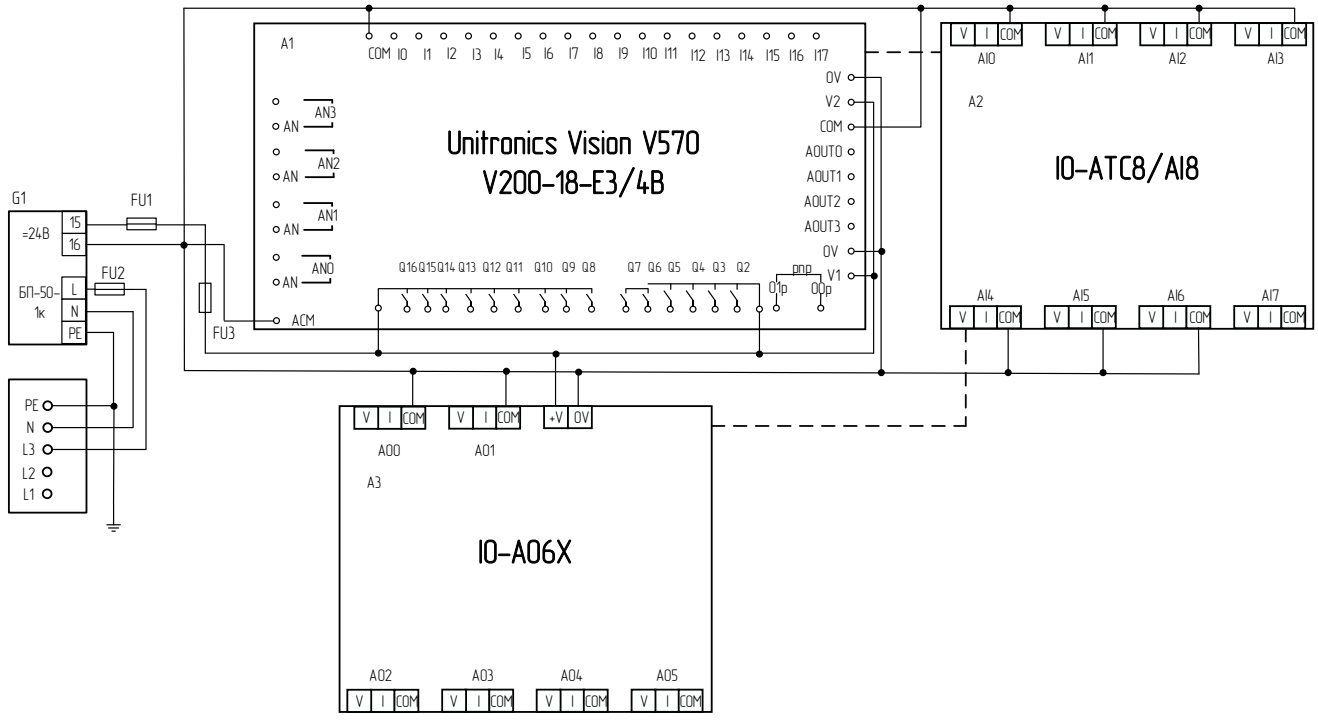



*Рисунок 6.1 Принципова електрична схема живлення контролера Unitronics Vision V570 (V200-18-E3/4B) та модулів розширення IO-ATC8/AI8 і IO-AO6X*

Живлення системи створюється від трифазної мережі, де через клемний блок підводяться фази L1, L2, L3, нульовий провід N та захисне заземлення PE. Для формування живлення ПЛК використовується фаза L3 у поєднанні з нульовим

проводом. Ці два провідники під’єднані до входу стабілізованого блоку живлення БП-50-1к (G1), який закріплено на DIN-рейці.

Всередині модуля G1 змінний струм перетворюється на стабільні +24 В і 0 В. На виході цього блоку встановлено запобіжник — FU2 в позитивному проводі. Додатково перед входом живлення БП-50-1к встановлено запобіжник FU1, що захищає ланцюг від перевантаження і коротких замикань на стороні змінної напруги.

Після виходу із захищених клем +24 В і 0 В напруга розподіляється через монтажні шини, які прокладені вздовж усіх модулів контролера Vision V570 та блоків розширення IO-ATC8/AI8 і IO-AO6X. Кожен модуль під’єднується до цих шин через відповідні клеми «+V» і «0 V» (або «V» і «COM»), що забезпечує централізовану подачу живлення та спрощує монтаж, налагодження й подальше технічне обслуговування.

**Під’єднання дискретних входів ПЛК до дискретних пристроїв**

На рисунку 6.2 зображено схему під’єднання всіх дискретних виходів дискретних приладів до цифрових входів контролера Unitronics Vision V570. Система містить такі види під’єднань:

- Газоаналізатор Варта 2-03, для виміру концентрації метану та чадного газу;
- Вібраційні рівнеміри VEGASWING 61 для контролю граничного рівня в котлах № 1 та № 2;
- Реле тиску Dungs GW 500 A5 для сигналізації зниженого/підвищеного тиску газу;
- Диференціальні реле Danfoss RT266AL на фільтрах і насосах для контролю перепаду тиску.

Усі прилади живляться від +24 В DC, розподілених через запобіжник FU1, окрім газоаналізатора, який живиться від +220 В, на даному під’єднані встановлений додатковий запобіжник FU5.

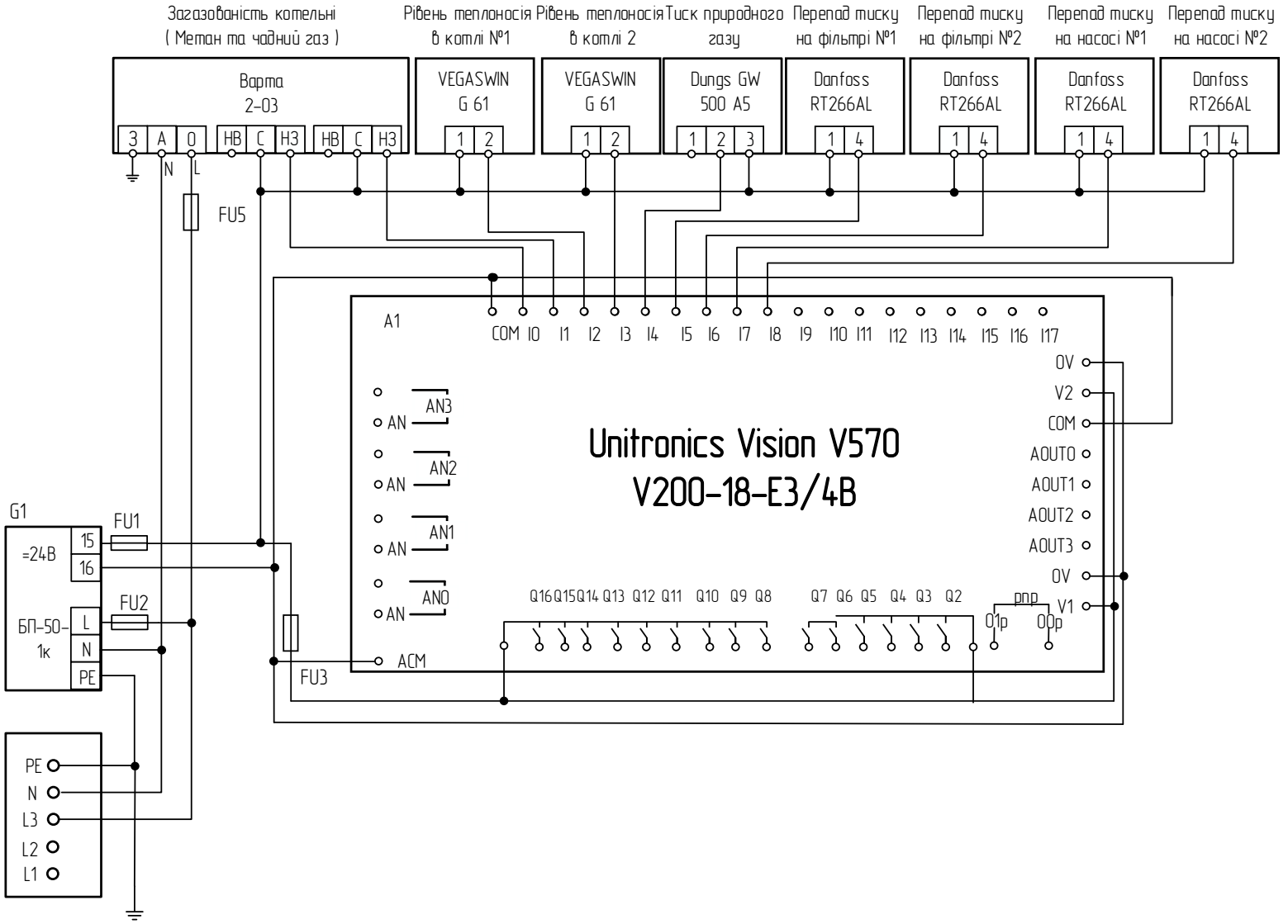



*Рисунок 6.2 Принципова електрична схема під'єднання дискретних входів I0…I8 ПЛК Unitronics Vision V570 (V200-18-E3/4B) до дискретних пристроїв*

**Під’єднання аналогових входів вимірювальних перетворювачів**

На рисунку 6.3 зображено чотири 4–20 мА перетворювачі під’єднані до входів AN0…AN3 контролера Vision V570 через загальний запобіжник FU4: AN0–AN2 – SITRANS TK L (температура зворотного теплоносія котлів №1 і №2 та на виході гідравлічного розподільника), AN3 – давач тиску газу ETRANS-P01. Живлення +24 В DC подається через FU4, повернення струму – по шині COM (0 В)/ACM.

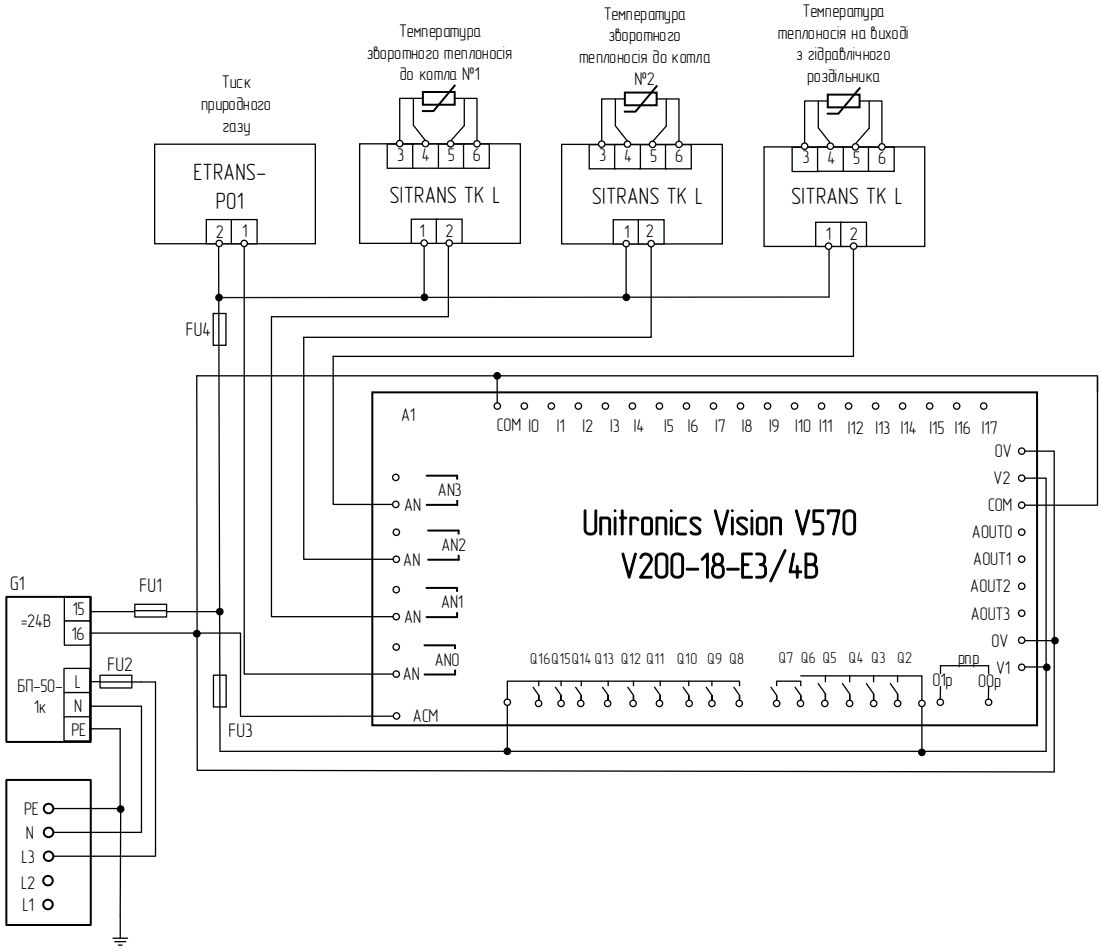



*Рисунок 6.3 Принципова електрична схема під’єднання аналогових входів контролера Unitronics Vision V570 до вимірювальних перетворювачів температури та тиску*

**Під’єднання дискретних виходів виконавчих пристроїв**

На рисунку 6.4 зображено під’єднання дискретних виходів контролера Unitronics Vision V570 (V200-18-E3/4B) до п’яти пристроїв плавного випуску SIRIUS 3RW30, які керують асинхронними насосами № 1–5, та до електромагнітного клапана відсічення газу Dungs MVDLE 5065/5.

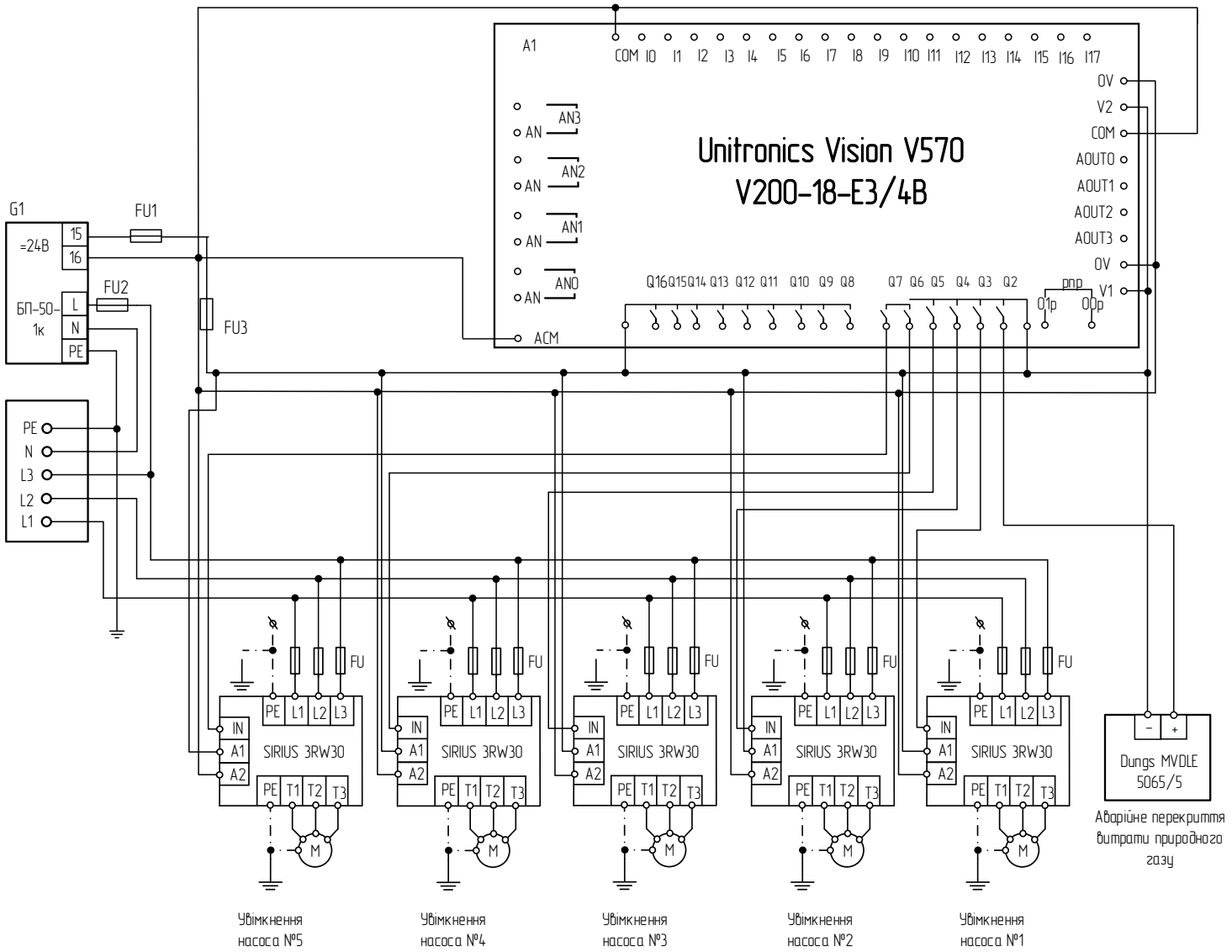



*Рисунок 6.4 Принципова електрична схема під'єднання дискретних виходів контролера Unitronics Vision V570 до пристроїв плавного пуску та клапана відсічення природного газу*

**Схема під’єднання аналогових входів модуля IO-ATC8/AI8**

У наведеній схемі (див. рисунок 6.5) модуль розширення IO-ATC8/AI8 контролера Unitronics Vision V570 приймає чотири 4–20 мА сигнали від перетворювачів:

– Sensit NK 510A – вимір температури навколишнього середовища;

– Три SITRANS TK L – температура теплоносія в контурі котла № 1, котла № 2 і контуру опалення виробничого приміщення;

– Два Сафір M5150 – тиск води в системі вентиляції та розширювальному баку.

Живлення всіх перетворювачів організовано за двопровідною 4–20 мА петлею від джерела +24 В DC через запобіжники FU4 та FU3. Повернення струму створюється по шині «COM» (0 В).

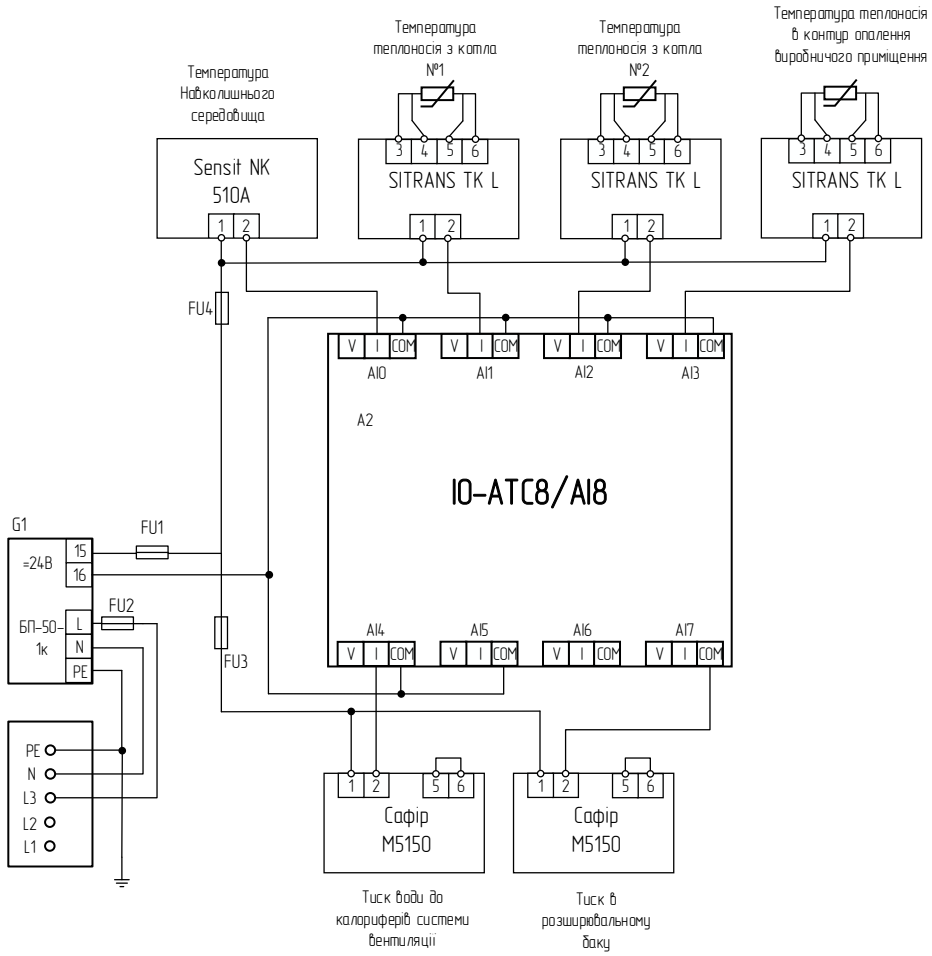



*Рисунок 6.5 Схема під’єднання аналогових перетворювачів до блоку IO-ATC8/AI8 контролера Unitronics Vision V570*

**Схема під’єднання аналогових виходів**

На рисунку 6.6 зображено під’єднання виконавчих механізмів до контролера Unitronics Vision V570, саме до модуля вводу/виводу V200-18-E3/4B та до модуля розширення IO-AO6X. До виходів модуля вводу/виводу V200-18-E3/4B під’єднано два клапани Burkert Type 8692 та 2 клапани Siemens SBX6. До виходів модуля розширення IO-AO6X  під’єднано клапан Burkert Type 8692 та клапан Siemens. Живлення і захист вихідних ланцюгів організовані через запобіжники FU4 та FU3, повернення струму здійснюється по шині COM (0 В).

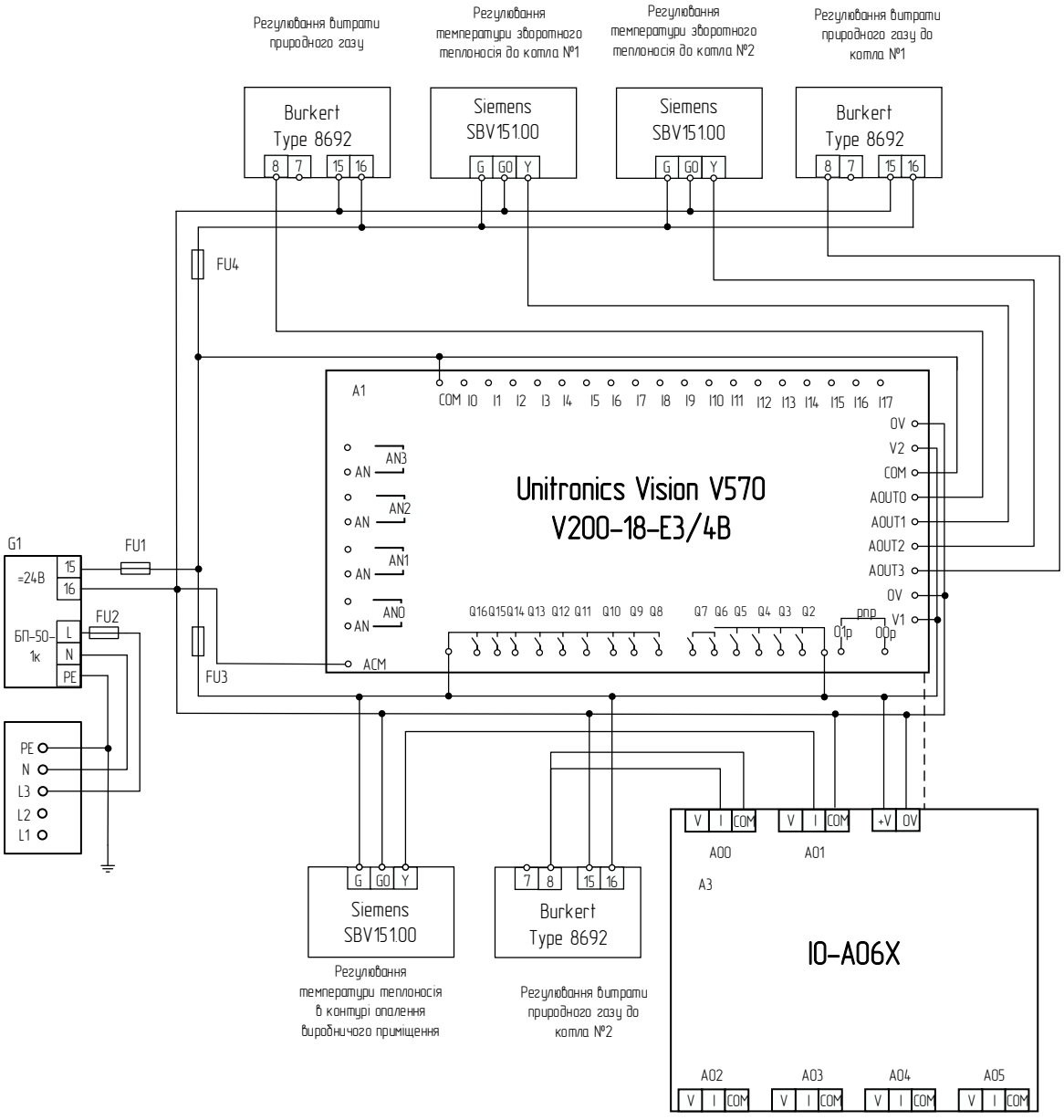



*Рисунок 6.5 Схема під’єднання аналогових виходів модулів V200-18-E3/4B  та IO-A06X контролера Unitronics Vision V570*

**Висновок**

У шостому розділі сформовано креслення принципової електричної схеми та представлено на аркуші 3 графічних матеріалів. Послідовно показано, як формуються ланцюги живлення контролера та модулів розширення, яким чином під’єднано дискретні й аналогові входи від давачів тиску, температури, рівня, газоаналізаторів і реле, а також виходи до клапанів, позиціонерів та пристроїв плавного пуску. У схемах закладено захист від перевантажень, гальванічну ізоляцію та єдину систему заземлення, що забезпечує безпечний і завадостійкий обмін сигналами.

# РОЗДІЛ 7

# РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРЯМОГО МЕРЕЖЕВОГО ТЕПЛОНОСІЯ

У цьому розділі здійснюється побудова математичної моделі системи автоматичного регулювання температури теплоносія на виході з котла, що відповідає контуру 6 функціональної схеми автоматизації (див. аркуш 1). Як регулюючий орган застосовується електропневматичний клапан, який змінює витрату газу, що надходить до пальника котла Viessmann Vitoplex 100.

Зміна положення клапана безпосередньо впливає на інтенсивність горіння, а отже — на динаміку підвищення температури прямого мережевого теплоносія. Цей принцип лежить в основі реалізації системи автоматичного керування температурою теплоносія на виході з котла.

Збуренням у даній системі регулювання є температура зворотного теплоносія, передавальна функція об’єкта є: $W(p) = \frac{0,95}{(52p+1)^3}$.

Температура теплоносія на виході з котла на початку процесу регулювання задана на рівні 70 °С.

Вихідною інформацією для математичного опису динаміки об'єкта керування є експериментальна крива розгону подана в таблиці 7.1. Крива розгону відображає зміну температури теплоносія в часі у відповідь на зміну положення регулюючого органу на 9 %.

*Таблиця 7.1*

Крива розгону

| Час, с | Температура, °С |
|---|---|
| 0 | 74.000 |
| 22 | 74.078 |
| 65 | 74.638 |
| 82 | 74.995 |
| 97 | 75.421 |
| 117 | 75.929 |
| 127 | 76.420 |
| 140 | 76.699 |
| 157 | 77.190 |
| 172 | 77.607 |
| 187 | 77.954 |
| 207 | 78.259 |
| 240 | 78.689 |
| 270 | 79.126 |
| 327 | 79.612 |
| 385 | 79.930 |
| 420 | 79.966 |
| 450 | 80.000 |

Оскільки регульована температура теплоносія подається на опалення адміністративних та виробничих приміщень, система автоматичного керування повинна забезпечувати стабільний тепловий режим, що відповідає заданим параметрам комфортного мікроклімату. Коливання температури можуть призвести до термічного дискомфорту персоналу, порушення роботи технологічного обладнання та зниження загальної енергоефективності системи опалення. Крім того, часті або глибокі зміни температури в трубопроводах викликають додаткове термічне навантаження на обладнання і знижують його ресурс. Зважаючи на перераховані умови регулювання, вимоги до якості процесу будуть наступними:

1. Допустиме максимальне динамічне відхилення $A_1 = 5^oC$
2. Допустима похибка регулювання $= 0.5\ ^oC$
3. Допустимий час регулювання $t_p = 480$ с.
4. Ступінь коливальності $m = 0.37$

### 7.1 Побудова моделі об’єкта керування

За даними з таблиці 7.1, в середовищі Matlab побудовано графік кривої розгону, який наочно демонструє зміну температури теплоносія на виході з котла в часі у відповідь на стрибкоподібну зміну регулюючої дії — а саме переміщення регулюючого органу на 9%, що змінює за витрату газу.

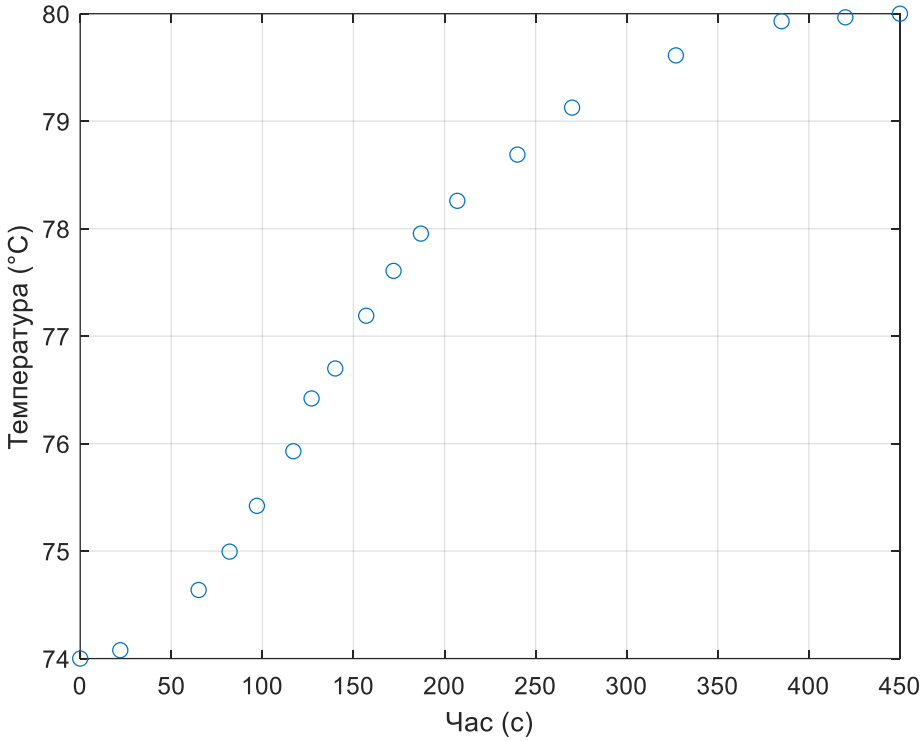



*Рисунок 7.1 Крива розгону температури теплоносія на виході з котла отримана в результаті зміни положення газового клапана на 9 %.*

Виходячи з аналізу побудованої кривої розгону, що відображає динаміку зміни температури теплоносія на виході з водогрійного котла Viessmann Vitoplex 100, для подальшого моделювання процесу регулювання було вибрано передавальну функцію у вигляді послідовного з’єднання трьох аперіодичних ланок із однаковими сталими часу.

$$W(p) = \frac{1}{(Tp+1)^n}, \tag{7.1}$$

де $T$ – стала часу;

$n$ – кількість аперіодичних ланок.

Для спрощення подальших розрахунків експериментальну криву $y^e(t)$ переводять у безрозмірний вигляд. Для цього кожне її значення ділять на повний приріст вихідної величини

$$\Delta y = y^e(\infty) - y_н, \tag{7.2}$$

де $y_н$ — вихідна точка системи до впливу;

$y^e(\infty)$ — значення вихідної величини після завершення перехідного процесу;

Отримана нормована характеристика задається формулою:

$$h^e(t) = \frac{y^e(t) - y_н}{\Delta y} \tag{7.3}$$

Визначаємо моменти часу $t_{05}$ та $t_{09}$ , коли нормована експериментальна крива $y^e(t)$ досягає відповідно 50 % та 90 % нормованого значення, тобто $h^e(t_{05})=0,5$ та $h^e(t_{09})=0,9$. Після цього обчислюємо відношення $t_{05}/t_{09}$ і перевіряємо, чи лежить воно в межах допустимого діапазону $0,43 \le t_{05}/t_{09} \le 0,68$ [37].

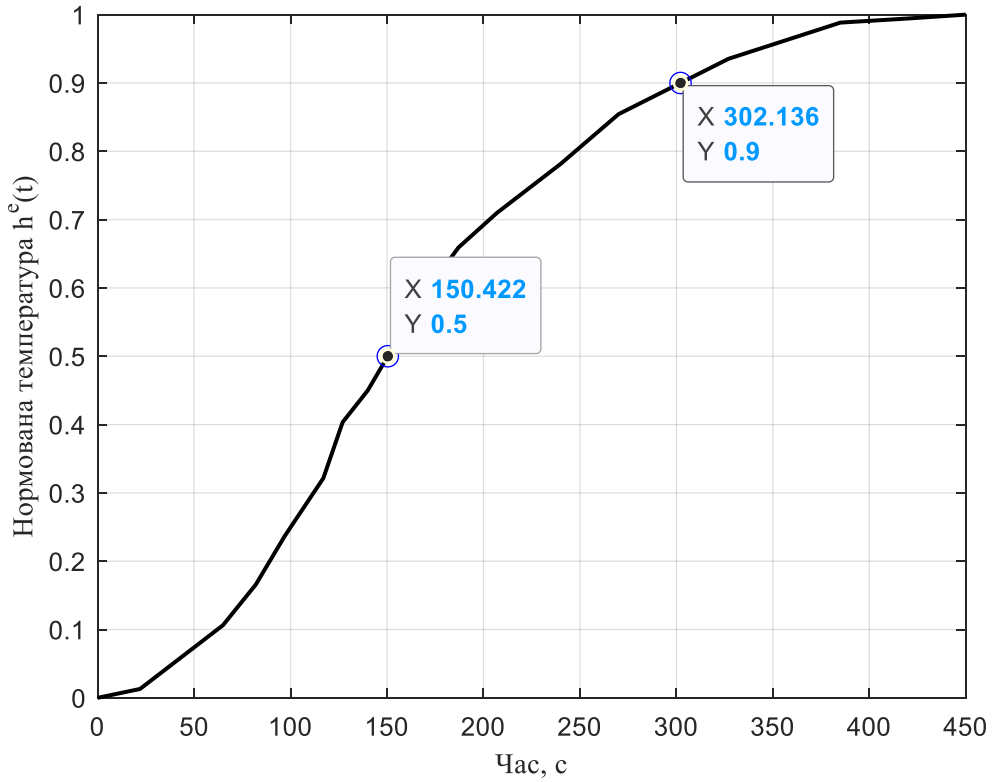



*Рисунок 7.2 Нормована крива розгону, отримана при зміні положення клапану газу на 9* % ходу РО

Відповідно до графіка представленого на рисунку 7.2, знаходжу значення моментів часу $t_{05}$= 150,42 та $t_{09}$=302,14. Відношення відповідно буде дорівнювати $t_{05}/t_{09}$ = 0,4978. Умова виконується.

*Таблиця 7.2*

Значення для $t_{05}/T$, $t_{09}/T$ та $t_{05}/t_{09}$, що розраховані за перехідною функцією

| *n* | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_{05}/T$ | 1.68 | 2.67 | 3.67 | 4.67 | 5.67 | 6.67 | 7.67 | 8.69 | 9.69 |
| $t_{09}/T$ | 3.89 | 5.32 | 6.68 | 7.99 | 9.27 | 10.53 | 11.77 | 12.99 | 14.21 |
| $t_{05}/t_{09}$ | 0.43 | 0.50 | 0.55 | 0.58 | 0.61 | 0.63 | 0.65 | 0.67 | 0.68 |

Згідно таблиці 7.2, визначаю яке значення відношення $t_{05}/t_{09}$ є найближчим до 0,4978. При *n* = 3, значення відношення є найближчим, а отже знаходжу сталу часу [37].

$t_{05}/T$ = 2,67.

$t_{09}/T$ = 5,32.

Звідси, $T_1$ =56,34 с, а $T_2$ =56,79 с. Шукаємо середнє арифметичне для сталої часу — $T = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{56,34 + 56,79}{2} = 56,57$ с.

Отже, передавальна функція об’єкта регулювання має вигляд:

$$W(p) = \frac{1}{(56,57p + 1)^3} \cdot k \qquad (7.4)$$

Для отриманих значень *n* та *T* знаходимо перехідну функцію:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{1}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2\right) \qquad (7.5)$$

Передавальний коефіцієнт визначається так:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y^e(\infty) - y_н}{\Delta x} = \frac{80 - 74}{9} = 0,66 \frac{°C}{\%}, \qquad (7.6)$$

де $\Delta x$ = 9 — стрибкоподібна зміна вхідної величини;

$y^e(\infty)$=80.

За допомогою середовища Matlab побудовано графік для порівняння експериментальної та розрахункової кривих перехідних процесів, а також виконано

обчислення абсолютної та зведеної похибок з метою перевірки адекватності математичної моделі системи автоматичного регулювання температури теплоносія на виході з котла. Для цього представлено наступну програму:

```
clc; clear;

t = [  0,  22,  65,  82,  97, 117, 127, 140, 157, 172, 187, 207, 240, 270, 327, 385, 420,
450 ];
T = [74.000, 74.078, 74.638, 74.995, 75.421, 75.929, 76.420, 76.699, ...
     77.190, 77.607, 77.954, 78.259, 78.689, 79.126, 79.612, 79.930, ...
     79.966, 80.000];
% правильно визначаємо початкову і кінцеву температуру
T0    = T(1);        % 74 °C
Tinf  = T(end);      % 80 °C
delta = Tinf - T0;   % 80 – 74 = 6
% нормована експериментальна крива
h_e = (T - T0)/delta;    % від 0 до 1
% розраховані параметри
T1 = 56.57;
n  = 3;
% теоретична одинична крива третього порядку
h = 1 - exp(-t/T1).*(1 + t/T1 + 0.5*(t/T1).^2);
% знову повертаємо в °C
T_model = h*delta + T0;  % від 74 до 80 °C
figure;
plot(t, T,       'ob', 'DisplayName','Експериментальна'); hold on;
plot(t, T_model, '-k', 'LineWidth',1.5, 'DisplayName','Розрахована');
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Температура, °C');
legend('Location','best');
delta1=max(abs(h-h_e));
sigma1=max(abs(h-h_e))*100;
sigma2=sqrt(sum(T-T_model).^2/length (T));
```

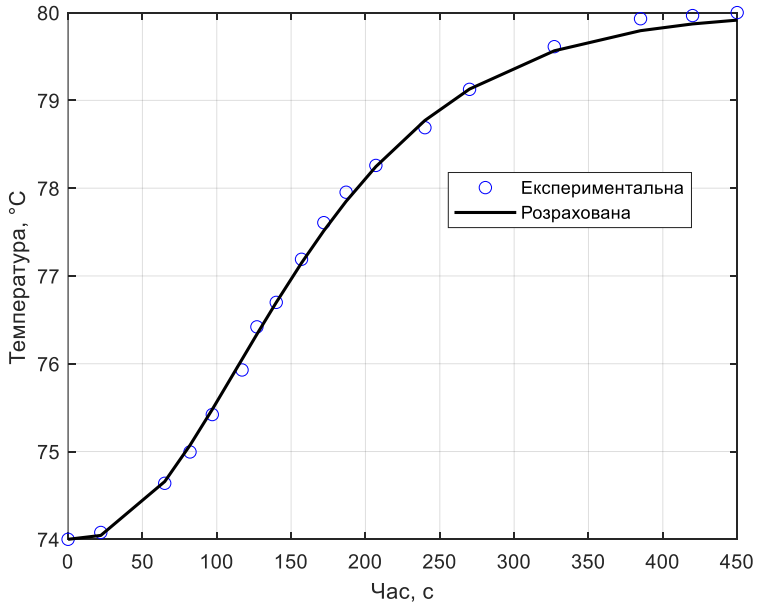


*Рисунок 7.3 Порівняння експериментальної та розрахункової кривих розгону системи регулювання температури теплоносія на виході з котла при зміні положення клапану газу на 9 %*

Після компіляції програми отримали наступні похибки:
sigma1 = 2,2624% — зведена похибка максимальна,
sigma2 = 0,0872 °C — середнє квадратичне відхилення.

Оскільки зведена похибка не перевищує 3 %, можна зробити висновок, що розроблена модель достовірно відтворює експериментальну криву розгону. Таким чином передавальна функція об'єкта регулювання — теплоносія на виході з водогрійного котла по каналу зміни положення регулювального органу на 9 % набуде такого вигляду:

$$W(p) = \frac{0,66}{(56,57p+1)^3}. \qquad (7.7)$$

### 7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання

В умовах експлуатації водогрійного котла одним із основних завдань є підтримка стабільної температури теплоносія. Температура теплоносія безпосередньо залежить від інтенсивності горіння газу в пальнику, яка, у свою чергу, залежить від ступеня відкриття регулюючого газового клапана. Таким чином, система автоматичного регулювання змінює витрату газу з метою точного отримання заданої температури теплоносія.

З огляду на інерційність об'єкта, наявність запізнення в тепловій відповіді та вимоги до точності й стабільності регулювання, для реалізації керування було обрано ПІД-регулятор. Цей тип регулятора містить пропорційну, інтегральну та диференційну складові, що дозволяє не лише оперативно реагувати на відхилення температури теплоносія від заданого значення, але й ефективно компенсувати зовнішні збурення, зокрема зміни температури навколишнього середовища, а також зменшувати коливання в процесі регулювання.

### 7.3 Параметрична оптимізація системи регулювання

Метою є визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора для забезпечення якісного керування температури теплоносія в котлі. Як згадувалося раніше, температура теплоносія регулюється зміною витрати газу, що подається до пальника. З відкриттям регулюючого клапана зростає витрата палива, що веде до підвищення температури теплоносія. Таким чином, ефективність системи автоматичного регулювання залежить від правильно вибраних параметрів регулятора.

Поширеним методом для знаходження параметрів ПІД-регулятора є розширених частотних характеристик, який враховує фазові властивості регулювання об’єкта. Цей метод дає змогу в деякому діапазоні частот забезпечити бажані характеристики системи, зокрема стабільність і достатній запас стійкості по фазі та по амплітуді.

Пошук оптимальних параметрів ПІД-регулятора виконується на основі моделі об’єкта, поданої у вигляді розгорнутої амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик.

На підставі залежності критерію якості параметрів формується залежність від параметрів регулятора, що дозволяє знайти оптимальну комбінацію коефіцієнтів. Це забезпечує не лише стійкість і достатню швидкість, а й мінімізацію енергетичних витрат системи, зменшення перерегулювання та підвищення якості перехідного процесу в цілому.

Передавальна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_i p} + T_d p, \tag{7.8}$$

де $k_p$ — пропорційна складова;

$\frac{k_p}{T_i p}$ — інтегральна складова;

$T_d p$ — диференційна складова.

Потрібно виділити робочий діапазон частот регулятора. Для цього діапазону граничними частотами є ω∗ і ω∗∗. Знаходимо числовим методом розв’язуванням рівнянь або ж графічним:

$$\varphi_{OP}(m,\omega*) = -\frac{\pi}{2} + arctg(m),$$
$$\varphi_{OP}(m,\omega**) = -\pi. \qquad (7.9)$$

Використовую саме графічний спосіб визначення ω∗ і ω∗∗. За допомогою розширених частотних характеристик ОР створюю у Matlab код, наведений нижче, для створення графіку фазо-частотної характеристики, саме за ним вже і буде знайдено ω∗ і ω∗∗.

```
T = 56.57;
k = 0.66;
m = 0.37;
w = 0:0.0001:0.03;
p = -m * w + 1i * w;
% Побудова частотної характеристики об'єкта
G_w = k ./ ((T .* p + 1).^3);
phi = phase(G_w);  % фазова характеристика
% Визначення фазових меж
phi_limit_low = -pi;
phi_limit_edge = -pi/2 + atan(m);
% Формування горизонтальних меж для побудови
phi_vec1 = phi_limit_low * ones(size(w));
phi_vec2 = phi_limit_edge * ones(size(w));
% Знаходження відповідних частот
w_edge1 = spline(phi, w, phi_limit_edge);
w_edge2 = spline(phi, w, phi_limit_low);
% Візуалізація результату
figure;
plot(w, phi, 'k', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(w, phi_vec1, 'k--', 'LineWidth', 1);
plot(w, phi_vec2, 'k--', 'LineWidth', 1);
plot(w_edge1, phi_limit_edge, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'none');
plot(w_edge2, phi_limit_low, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'none');
grid on;
xlabel('\omega, рад/с', 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('\phi(\omega), рад', 'FontName', 'Times New Roman');
```

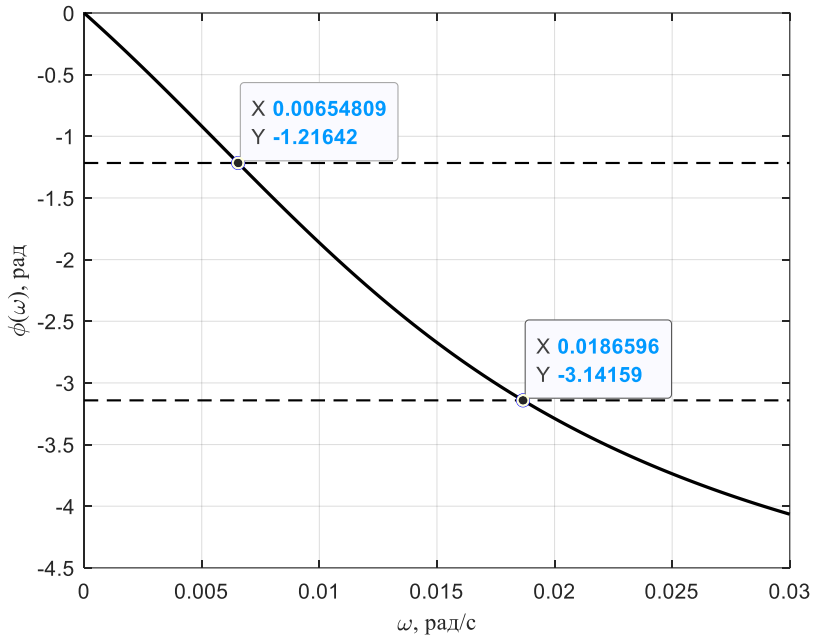



*Рисунок 7.4 Розширена фазо-частотна характеристика об'єкта регулювання температури теплоносія на виході з котла*

У результаті виконання коду в програмному середовищі Matlab, отримані наступні результати:

ω∗ = 0,0065

ω∗∗ = 0,0186

Зазвичай область допустимого запасу стійкості в просторі параметрів налаштування ПІД-регулятора утворює поверхню у тривимірному просторі, яку можна описати через координати: $k_p$, $\frac{k_p}{T_{із}}$, $T_d$.

Якщо фіксувати один із цих трьох параметрів, задача зводиться до обчислення двох інших. Таким чином, за відомого значення часу диференціювання $T_d$, можна обчислити решту параметрів ПІД-регулятора — $k_p$ та $\frac{k_p}{T_{із}}$, скориставшись наступними виразами:

$$\begin{cases} \dfrac{k_p}{T_{із}} = \dfrac{\omega\sqrt{m^2+1}\left(m\cos\gamma(m,\omega)-\sin\gamma(m,\omega)\right)}{A_{OP}(m,\omega)} + \omega^2(1+m^2)T_d \\ k_p = \dfrac{\sqrt{m^2+1}\cos\gamma(m,\omega)}{A_{OP}(m,\omega)} + 2T_d m\omega, \end{cases} \tag{7.10}$$

де $\gamma(m,\omega) = \varphi_{OP}(m,\omega) + arctg(m) - \pi;$

$A_{OP}$ — розширена амплітудно-частотна характеристика об'єкта керування.

За заданими значеннями ступеня коливальності $m$ та часу диференціювання $T_d$, можна побудувати площину параметрів $k_p$ та $\frac{k_p}{T_{із}}$, яка визначає межу стійкої області регулювання. В межах цієї області вже відшукують такі значення параметрів, які забезпечують не лише стійкість, а й задовольняють умови оптимальності налаштування [37].

Встановлені значення параметрів налаштування повинні додатково відповідати наступній умові:

$$0 \le \frac{T_d}{T_{із}} \le 0{,}5 \qquad (7.11)$$

Якщо ця умова порушується, це свідчить про надмірне значення $T_d$, і його слід зменшити для забезпечення правильного функціонування регулятора.

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора здійснюється у середовищі MATLAB, що забезпечує ефективну побудову границь області стійкості системи в просторі коефіцієнтів регулятора. Для об'єкта автоматизації — системи регулювання температури теплоносія на виході з водогрійного котла — виконується моделювання динаміки замкненого контуру із застосуванням інтегрального квадратичного критерію якості, який дозволяє визначити оптимальні значення коефіцієнтів регулятора з урахуванням динамічних властивостей системи. Нижче наведено програму у програмному середовищі MATLAB з даним підходом:

```
clc; clear all;

% Вихідні параметри об'єкта
T1 = 56.57;
n = 3;
k = 0.66;
m = 0.37;
Td = 38;

% Частотний діапазон
w = 0.0065:0.0001:0.022;
```

```
% Обчислення фазо-частотної характеристики
p = -w * m + 1i * w;
Wor = k ./ ((T1 * p + 1).^n);
AOR = abs(Wor);
fi = phase(Wor);

% Розрахунок коефіцієнтів регулятора
y = abs(fi) + atan(m) - pi;
kP_Ti = w .* sqrt(m^2 + 1) .* (m .* cos(y) - sin(y)) ./ AOR + w.^2 .* (m^2 + 1) * Td;
kP = sqrt(m^2 + 1) .* cos(y) ./ AOR + 2 * Td * m .* w;

% Інтегральний критерій якості (J)
t = 0:1000;
for i = 1:length(w)
    WOR = tf(k, [T1 1])^n;
    WAR = tf(kP_Ti(i), [1 0]) + tf(kP(i)) + tf([Td 0], 1);
    Wsar = feedback(WOR, WAR);
    y = step(Wsar, t) * 20;
    S(i) = trapz(t, y.^2);
end

% Оптимальні значення
Jmin = min(S);
id = find(S == Jmin);
kPopt = kP(id);
kP_Tiopt = kP_Ti(id);

% Додаткові обчислення
Ti = kPopt / kP_Tiopt;
pb = Td / (Ti * kPopt);

% Побудова графіка 1: Границя області стійкості
figure(1)
plot(kP, kP_Ti, 'k', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(kPopt, kP_Tiopt, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'none', 'MarkerSize', 8);
grid on;
xlabel('k_P', 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('k_P / T_i', 'FontName', 'Times New Roman');

% Побудова графіка 2: Залежність інтегрального критерію від kP
figure(2)
plot(kP, S, 'k', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(kPopt, Jmin, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'none', 'MarkerSize', 8);
grid on;
xlabel('k_P', 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('J_{I^2}', 'FontName', 'Times New Roman');
```

В результаті виконання програми отримано наступні графіки:

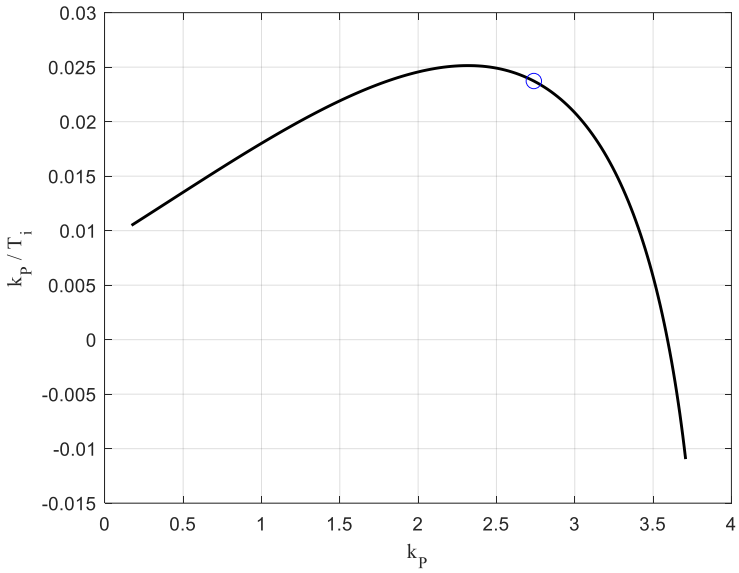



*Рисунок 7.5 Границя області запасу стійкості САР температури теплоносія на виході з котла для заданого m=0,37*

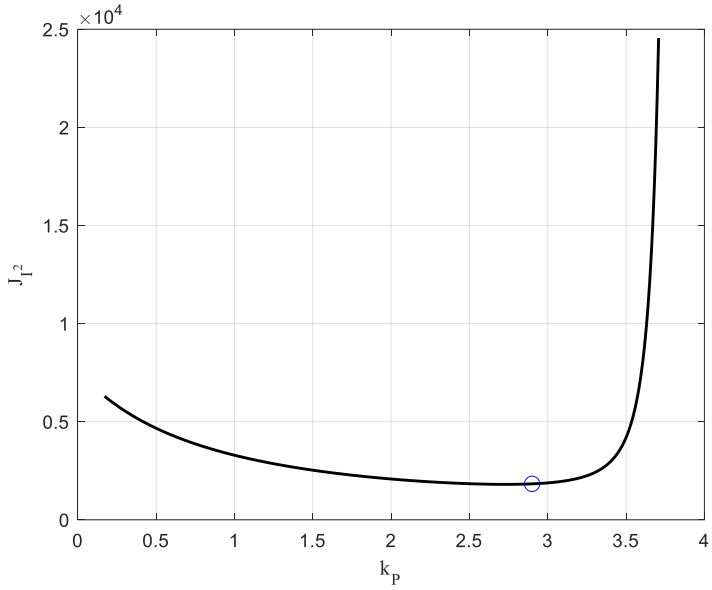



*Рисунок 7.6 Залежність значення інтегрального критерію якості від коефіцієнта підсилення $k_P$ при пошуку оптимальних параметрів ПІД-регулятора для системи регулювання температури теплоносія на виході з котла*

Після виконання розрахункового коду та побудови графіків були визначені оптимальні параметри ПІД-регулятора, що забезпечують найкращу якість регулювання відповідно до заданого інтегрального критерію:

Оптимальне $\frac{k_p}{T_{із}}$ = 0,0218;

Оптимальне $k_p$ = 2,9329;

$T_d$ = 38.

$J_{min}$= 1806.

Перевіряємо чи налаштування відповідають наступній умові: $0 \le \frac{T_d}{T_{із}} \le 0,5$

$$\frac{T_d}{T_{із}} = \frac{38}{134,7} = 0,2821;$$

$$0 \le 0,2821 \le 0,5.$$

Оскільки умови оптимізації з 7.1 виконано, передавальна функція ПІД-регулятора, який використовується для автоматичного регулювання температури води на виході з котла в системі опалення адміністративних та виробничих приміщень, набуває наступного вигляду:

$$W(p) = 2,9329 + \frac{0,0218}{p} + 38p. \qquad (7.12)$$

### 7.4 Дослідження перехідних процесів в САР

Після знаходження об’єкта моделі регулювання та визначення оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора за критерієм мінімуму інтегральної квадратичної оцінки була реалізована структурна модель системи автоматичного регулювання температури теплоносія на виході з котла Viessmann Vitoplex 100 в середовищі Simulink (див. рисунок 7.7).

У моделі враховано:

- збурення у вигляді зміни температури зворотної води, яке реалізується через передавальну функцію третього порядку з параметрами, що відповідають тепловій інерційності системи;

- регулюючу дію, що моделює переміщення регулюючого органу (електропневматичного клапана) на заданий відсоток ходу;
- вплив зовнішніх погодних умов, реалізований у вигляді MATLAB Function блоку T_boiler_outdoor_fcn, що задає необхідну температуру подачі теплоносія згідно з погодозалежним графіком (див. рисунок 1.2);

При комп'ютерному моделюванні ПІД-регулятора враховані параметри пропорційної, інтегральної та диференціальної складових з відповідними коефіцієнтами, визначених на основі попередніх розрахунків.

Об'єктом регулювання виступає аперіодична ланка третього порядку, яка описує теплову динаміку котельного обладнання. Вихідний вплив від регулятора змінює витрату газу, а отже, і швидкість нагріву теплоносія.

Запропонована модель дозволяє дослідити динаміку системи за різних вхідних дій: збурення, зміна регулюючого сигналу, а також реакція на зміну температури навколишнього середовища згідно з температурним графіком (див. рисунок 1.2).

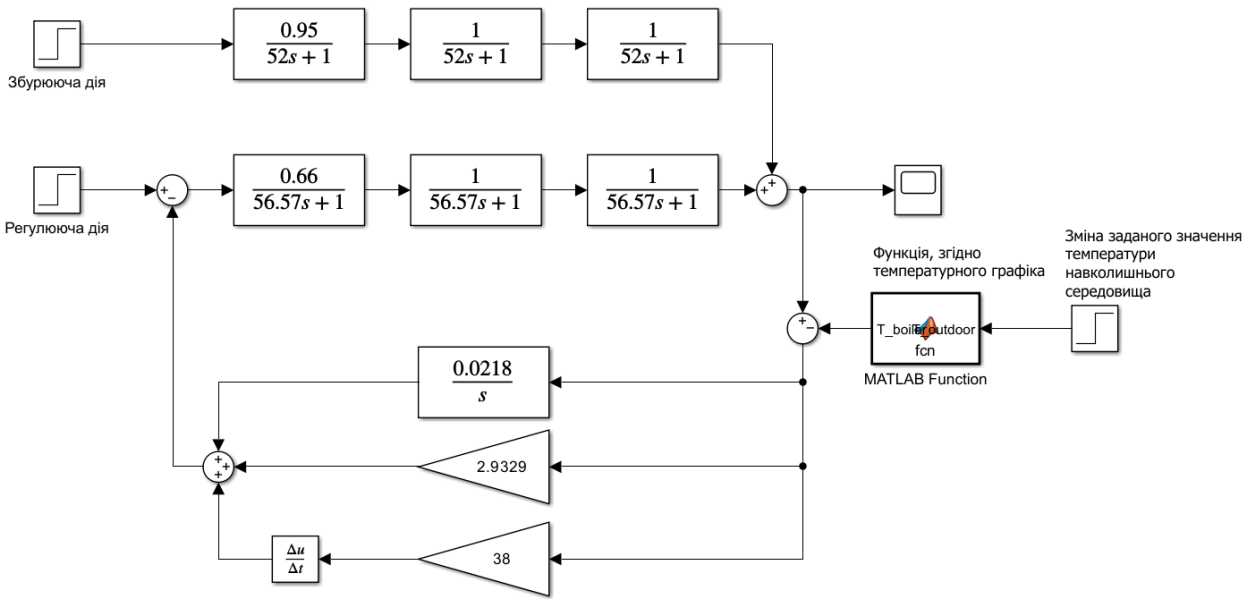



*Рисунок 7.7 Структурна схема моделі системи автоматичного регулювання температури теплоносія на виході з котла з урахуванням температурного графіка та зовнішніх збурень*

Для реалізації погодозалежного регулювання температури теплоносія на виході з котла в моделі системи автоматичного керування використано допоміжну функцію outdoor_to_boiler_temp, яка реалізована у вигляді окремого блоку MATLAB Function у середовищі Simulink. Функція стверна згідно температурного графіка описаного в розділі 1.4.

Ця функція призначена для визначення величини зміни температури теплоносія на виході з котла відносно початкового значення 70 °C, залежно від поточної температури навколишнього середовища. Функція реалізує лінійну інтерполяцію між заданими граничними умовами:

- при температурі навколишнього середовища -20 °C температура подачі має збільшуватись на +20 °C відносно бази, тобто до 90 °C;
- при температурі -5 °C додаткова зміна не потрібна, залишається 70 °C;
- при проміжних значеннях температура визначається за лінійною залежністю.

У діапазоні температур навколишнього середовища від -20 до -5 °C, температура теплоносія на виході з котла визначається згідно з формулою:

$$T_{\text{котла}} = 70 + \Delta T,$$

$$\Delta T = \Delta T_{max} - \left(\Delta T_{max} - \Delta T_{min}\right) \cdot \frac{T_{\text{зовн}} - T_{min}}{T_{\text{перех}} - T_{min}}, \qquad (7.13)$$

де ΔT— Температурний еквівалент температури навколишнього середовища,

$\Delta T_{max}$= 20 °C — максимально допустиме підвищення (тобто до 90 °C),

$\Delta T_{min}$= 0 °C — без підвищення (тобто базові 70 °C),

$T_{зовн}$ — температура навколишнього середовища (°C),

$T_{min}$= − 20 °C — температура, при якій потрібне максимальне підвищення,

$T_{перех}$= − 5 °C — температура, вище якої підвищення не потрібне.

Таким чином, знайдена функція 7.13 забезпечує адаптацію температури теплоносія відповідно до умов зовнішнього середовища згідно з температурним

графіком і виступає джерелом заданого значення в контурі автоматичного регулювання.

Реалізація функції outdoor_to_boiler_temp для погодозалежного розрахунку температури котла на основі температури навколишнього середовища

```
function delta_T = outdoor_to_boiler_temp(T_outdoor)
% OUTDOOR_TO_BOILER_TEMP - Функція для визначення зміни температури теплоносія
% відносно базового рівня (70°C), залежно від зовнішньої температури.
% Вхід:
%   T_outdoor - температура навколишнього середовища (°C)
% Вихід:
%   delta_T - наскільки температура котла має бути вищою за 70°C (°C)

% Межі температур
T_min = -20;           % при -20°C -> +20°C до бази
T_break = -5;          % при -5°C і вище -> 0°C до бази
delta_T_max = 20;      % максимум: 70 + 20 = 90°C
delta_T_min = 0;       % мінімум: 70 + 0 = 70°C

% Визначення delta_T залежно від температури
if T_outdoor <= T_min
    delta_T = delta_T_max;
elseif T_outdoor >= T_break
    delta_T = delta_T_min;
else
    % Лінійна інтерполяція між -20°C і -5°C
    delta_T = delta_T_max - ...
        (delta_T_max - delta_T_min) * (T_outdoor - T_min) / (T_break - T_min);
end

end
```

Після реалізації структурної моделі системи автоматичного регулювання температури теплоносія у середовищі MATLAB Simulink проведено імітаційне моделювання для аналізу її динамічних властивостей. Метою моделювання є перевірка здатності системи реагувати на типові збурення, а також адекватне зміни регулюючої дії та відслідковування заданого значення температури відповідно до погодозалежного графіка.

У результаті моделювання отримано три перехідні характеристики, що відображають реакцію об'єкта керування на:

1. зміну регулюючої дії, зміну положення регулюючого органу на 15% (див. рисунок 7.8);
2. зовнішнє збурення, а саме зміна температури зворотного мережевого теплоносія на 4°C (див. рисунок 7.9);
3. зміну заданої температури, сформованої відповідно до температури

зовнішнього середовища 0 °С, відповідно зміна температури прямого мережевого теплоносія зміниться на 6,7 °С (див. рисунок 7.10).

Дані графіки надають можливість оцінити якість регулювання, стійкість системи та ефективність застосування ПІД-регулятора для підтримання стабільної температури теплоносія на виході з котла.

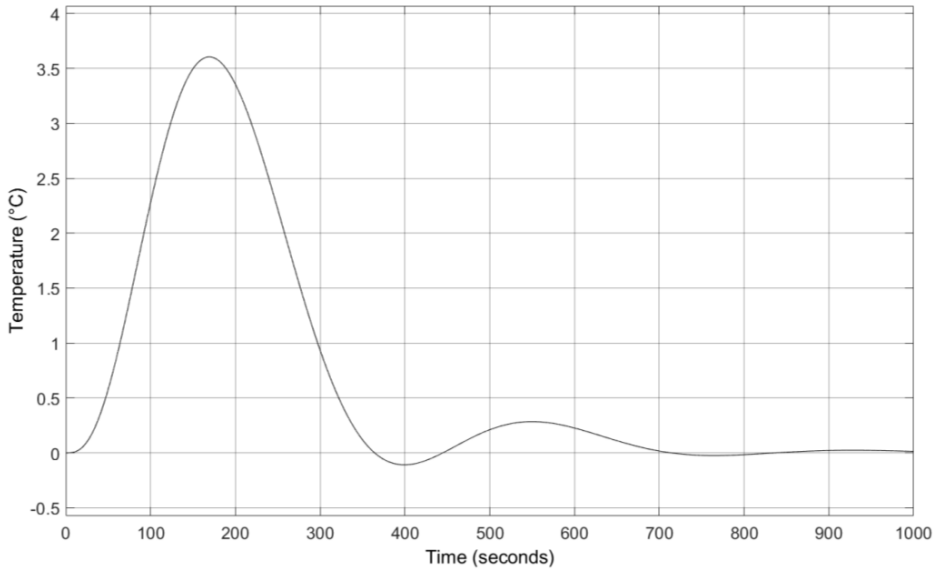



*Рисунок 7.8 Перехідна характеристика системи регулювання температури теплоносія на виході з котла при зміні положення регулюючого органу витрати газу на 15 %*

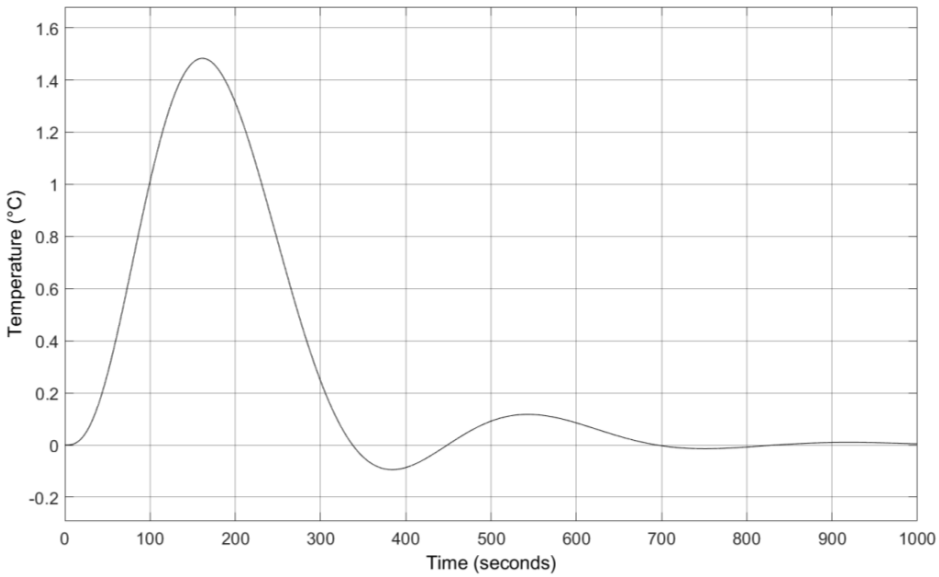



*Рисунок 7.9 Перехідна характеристика системи регулювання температури теплоносія на виході з котла при збурюючій зміні температури зворотного теплоносія на 4˚С*

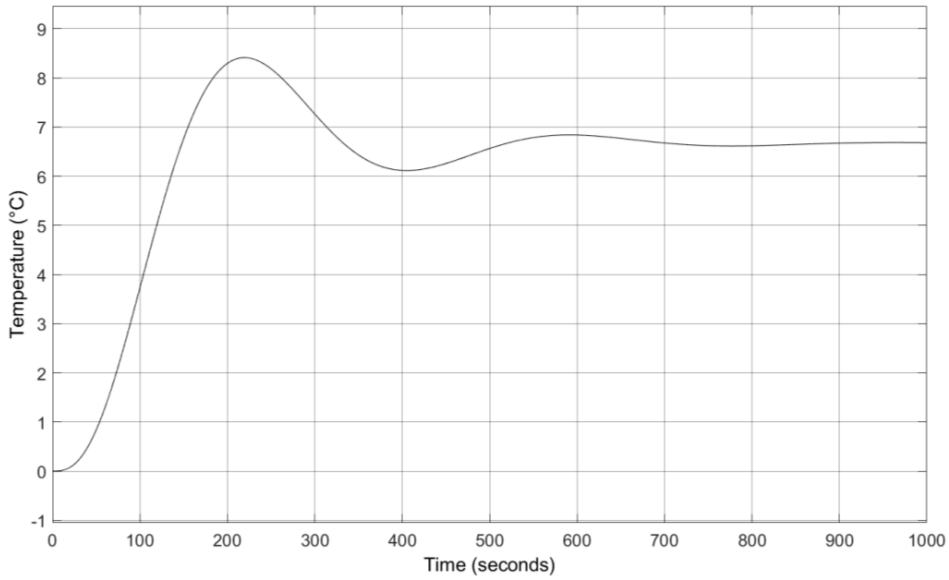



*Рисунок 7.10 Перехідна характеристика системи регулювання температури теплоносія на виході з котла при зміні заданого значення на 6,7˚С, яка виникає відповідно до температурного графіка при зниженні температури навколишнього середовища до –10 °С*

На основі отриманих графіків перехідних процесів проведено обрахунок параметрів для оцінювання якості системи регулювання: час регулювання та максимальне динамічне відхилення. Ці показники дозволяють оцінити ефективність функціонування системи в умовах зміни зовнішніх впливів та перевірити, наскільки точно вона відповідає вимогам до якості регулювання. Порівняння отриманих показників якості перехідних процесів з заданими вимогами наведено в таблиці 7.3.

*Таблиця 7.3*

Показники якості роботи системи регулювання

| Показник якості | Зміну положення регулюючого органу на 15% | Зміна температури зворотного мережевого теплоносія на 4°С | Зміна заданого значення температури прямого мережевого теплоносія на 6,7 °С | Вимоги до якості регулювання |
|---|---|---|---|---|
| $A_1$,˚С | 3,6 | 1,5 | 1,7 | 5 |
| $t_p$, с | 321 | 273 | 439 | 480 |

**Висновок**

У сьомому розділі виконано математичне моделювання системи автоматичного регулювання температури прямого мережевого теплоносія, що реалізується шляхом керування положенням регулювального органу на витраті газу до котла. На основі експериментальної кривої розгону побудовано адекватну передавальну функцію об’єкта керування, яка точно описує його динамічну поведінку.

$$W(p) = \frac{0,66}{(56,57p+1)^3} \tag{7.14}$$

При порівнянні експериментальної та розрахованої кривих розгону була вирахувана максимальна зведена похибка 2,26%, що не перевищує 3%. Це свідчить про адекватність знайденої передавальної функції об’єкта регулювання температури прямого мережевого теплоносія.

Із застосуванням середовища MATLAB визначено оптимальні параметри ПІД-регулятора за критерієм мінімізації інтегральної квадратичної оцінки за перехідним процесом каналом регулювальної дії. Отримані значення забезпечують стабільне функціонування системи та відповідність основним вимогам до якості регулювання, отже передавальна функція ПІД-регулятора має такий вигляд:

$$W(p) = 2,9329 + \frac{0,0218}{p} + 38p. \tag{7.15}$$

У Simulink змодельовано реакцію системи на три типи впливів: зміну завдання, збурення по температурі зворотного мережевого теплоносія та зміну регулюючої дії. За результатами моделювання визначено динамічні характеристики системи, що узагальнено у таблиці 7.3. Дослідження підтвердило, що система забезпечує задовільну якість регулювання відповідно до встановлених технологоічних вимог, а саме максимальне динамічне відхилення не перевищує допустимих 5 $^{o}$C та час регулювання менше за допустимий 480с.

# РОЗДІЛ 8

# ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## Вступна частина

Однією з найважливіших складових інженерної практики є забезпечення належного рівня охорони праці під час впровадження та подальшої експлуатації будь-якої автоматизованої системи. Соціальний аспект охорони праці полягає в тому, що незадовільний стан безпеки на виробництві сприяє накопиченню суспільних напруг, підриває довіру громадян до індустріальних проєктів та може стати джерелом політичних конфліктів. З економічної точки зору, виробничі травми та аварії призводять до суттєвих фінансових втрат як для підприємства, так і для держави загалом, а також створюють додаткові соціально-економічні проблеми в родинах постраждалих. Ця суперечність між суспільною користю праці та особистою трагедією робітника при нещасному випадку потребує системного вирішення через проєктування безпечних технологічних процесів.

Предметом даної роботи є охорона праці при впровадженні та експлуатації автоматизованої системи керування котельного агрегату промислового підприємства. Система включає два водогрійні котли Viessmann Vitoplex 100 загальною тепловою потужністю 1 900 кВт, закриту циркуляційну систему з гідрвалічним розподільником, насосне обладнання та контрольно-вимірювальні прилади. Автоматизація реалізована на базі ПЛК Unitronics Vision V570 з встановленими давачами температури й тиску в прямих та зворотних лініях, системою керування насосами та операторськими панелями в щитовому відділені. Усі складові розміщені в технічному приміщенні котельні, що детермінує підвищені вимоги до вентиляції, електробезпеки та протипожежного захисту.

У ході роботи необхідно врахувати наявність таких потенційно небезпечних факторів: високі температури теплоносія, підвищений тиск в системі, вплив напруги живлення щитового обладнання, рухомі частини насосів та можливість

виходу з ладу клапанів. Відповідно, розробка рішень з охорони праці передбачатиме організаційно-технічні заходи з безпечної експлуатації котельного устаткування, забезпечення гігієнічних умов праці в приміщенні, а також комплекс протипожежних заходів.

### 8.1. Технічні рішення щодо безпечної експлуатації засобів автоматизації

Проект, монтаж і експлуатацію котельні слід вести з урахуванням чинних нормативних документів. Зокрема, необхідно виконувати державні будівельні норми та міжгалузеві правила з безпеки праці – зокрема, правила для парових і водогрійних котлів, трубопроводів води та систем газопостачання. Усі технічні рішення мають відповідати ДБН “Котельні” і узгоджуватися з рекомендаціями виробника обладнання. Персонал повинен мати кваліфікацію і бути проінструктованим відповідно до «Правил технічної експлуатації котлів» і «Правил безпеки електроустановок споживачів».

Проект розміщення котельні виконується із забезпеченням достатніх відстаней між котлами, корпусами та стінами, а також зручною експлуатацією обладнання. Відстані і конфігурацію потрібно передбачити згідно з вимогами НПАОП 0.00-1.26, 0.00-1.60 та ДБН (п. 4.26). Крім того, вентиляція, освітлення та водопостачання мають забезпечувати безпечні умови обслуговування (уникнення перегріву, спеки, задимлення тощо). Позакорпусне обладнання (насоси, деаератори, пальники) дозволено розміщувати на відкритих майданчиках лише з організацією захисту від замерзання та з дотриманням вимог пожежної безпеки і охорони навколишнього середовища [29].

Для кожного котла Vitoplex 100 передбачають захисну автоматику (запобіжні клапани, пристрої контролю тиску й температури, газові клапани з блокуванням подачі палива при затуханні полум’я і т.д.). НПАОП 0.00-1.26-96 вимагає використання тільки сертифікованих котлів з перевіреними приладами безпеки та щорічними гідравлічними випробуваннями. Пальникова система оснащується давачами наявності полум’я і контролю утворення чадного газу. У разі витоку газу чи перевищення концентрації CO вентиляція котельні має миттєво збільшити об’єм

обміну та спрацювати аварійна сигналізація (п. 17.1.5–17.1.6 ДБН). Водопідготовка відповідає вимогам виробника Viessmann і санітарних норм – за необхідності застосовуються фільтри і реагенти для запобігання накипу та корозії [29].

Параметри та матеріали трубопроводів для пари і теплоносія мають обиратися з урахуванням робочого тиску і температури котлів. Монтаж труб виконують за правилами НПАОП 0.00-1.11-98, що регламентують будову та безпечну експлуатацію парових і водяних магістралей. Зокрема, труби обладнуються запобіжними та зливними клапанами, розрахованими на тиск котлів, і регулярно промиваються для запобігання корозії. Всі магістралі опалення та системи водопідготовки повинні мати теплоізоляцію і захист від замерзання у зимовий період.

Автоматика котельні проектується відповідно до п. 17.1 ДБН «Котельні». Згідно з п. 17.1.2 ДБН необхідно дотримуватися вимог НПАОП 0.00-1.20 (газ), 0.00-1.26 (котли), 0.00-1.60 (енергетичне обладнання). Система автоматики включає моніторинг основних параметрів і аварійне відключення при виході їх за безпечні межі. Також встановлюють системи сигналізації загазованості (кожний котел і сама котельня) – вони мають спрацьовувати при досягненні 20 % від нижньої межі вибуху газу. Багаторівневі аварійні відключення гарантують, що при відмові одного котла система безпечного запуску резервного котла спрацює коректно [29].

Котельня як потенційно вибухонебезпечне приміщення облаштовується згідно з НАПБ А.01.001-2004 та ДБН В.2.5-77. У приміщенні передбачають пінні та вуглекислі вогнегасники, забезпечують легкий доступ до них. Стіни й перекриття протипожежні, а двері мають самозакриватися. Згідно з п. 4.23–4.26 ДБН, котельня забезпечується водопостачанням для пожежогасіння, наявністю аварійних виходів і дотриманням норм розміщення пальників та ємностей. Відповідність цим вимогам гарантує захист від пожежної небезпеки і протипожежних ризиків.

Електрообладнання котельні монтують за правилами НПАОП 40.1-1.21-98 і ПУЕ, з урахуванням застосування чотирипровідної мережі з глухозаземленою нейтраллю. Згідно з п. 1.7.61 ПУЕ, у виробничих та адміністративних спорудах слід

використовувати систему TN-S (розділений PEN-провідник). Захисне заземлення та з’єднання захисних провідників з системою вирівнювання потенціалів обов’язкові. Електричні щити встановлюють у сухому вентильованому приміщенні, наявні УЗО та автомати захисту від струмів короткого замикання. При непрямому дотику автоматичне вимкнення живлення має спрацювати миттєво. Корпуси обладнання (насоси, двигуни) та металеві частини системи ретельно заземлені, відповідно до ПУЕ і НПАОП 0.00-1.21-98. Відстані до електропроводок відповідають категорії приміщення за вибухопожежною безпекою, а змонтовані лампи та розетки мають клас захисту не нижче IP54 [30].

## 8.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 8.2.1. Мікроклімат

У технічному приміщенні котельні мікрокліматичні умови визначені для працівників з помірною фізичною активністю та регламентуються ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» і ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні». Температурний режим підтримується в межах 18–22 °С, що запобігає переохолодженню під час виконання короткочасних сервісних операцій та оберігає від перегріву в умовах підвищених теплових навантажень. Відносна вологість повітря утримується на рівні 40–60 %, що виключає ризик теплового стресу та утворення конденсату на елементах обладнання. Швидкість руху повітря не перевищує 0,2 м/с, що усуває дискомфорт, викликаний протягами, і забезпечує рівномірний розподіл температури в об’ємі приміщення [32].

Для стабільного підтримання нормативних параметрів застосовано систему механічної вентиляції з кратністю повітрообміну 3–5 год$^{-1}$ згідно з ДБН В.2.5-77:2014 та обладнано фільтрами грубого очищення припливного повітря. У разі підвищення зовнішньої температури досягнення необхідної температурної межі забезпечується охолодженням припливного повітря холодильною установкою. Вимірювання параметрів мікроклімату здійснюють автоматизовані термоанемометри, гігрометри й термометри, дані з яких реєструються не рідше ніж двічі за зміну, а у випадку відхилень від нормативів

система автоматичного керування коригує продуктивність вентиляційних каналів або активує охолоджувальні контури [32].

Дотримання встановлених мікрокліматичних умов підтримує оптимальний тепловий комфорт, зберігає рівень працездатності персоналу та знижує ймовірність теплових або холодових захворювань, що сприяє безпечній та ефективній експлуатації котельного обладнання [32].

**Розрахунок кількості дефлекторів для витяжної вентиляції котельного приміщення**

Для встановлення двох водогрійних котлів Viessmann Vitoplex 100 потужністю 950 кВт кожен необхідно визначити розміри приміщення, які водночас задовольнятимуть вимоги нормативів безпеки та забезпечуватимуть доступ до вузлів обслуговування. Вихідними геометричними даними є глибина корпусу котла u = 2,147 м і його повна ширина з контролером e = 1,425 м. Згідно з каталогом Viessmann перед пальником має залишатися фронтальний сервіс-прохід не менше 1,8 м, тоді як ДБН В.2.5-77:2014 і НПАОП 0.00-1.26 передбачають щонайменше 0,6 – 0,7 м для бічних і заднього проходів, причому локальне звуження основного проходу до 0,6м допускається на відстані до 1,5м.

Найраціональнішим для компактних котельних є розташування агрегатів боковими стінками одне до одного так, щоб пальники були спрямовані у спільний фронтальний коридор. За такого компонування довжина приміщення складається з глибини котла, фронтального та заднього проходів [34].

$$L = u + a_{фр} + b_{зад} = 2{,}147\,м + 2{,}3\,м + 0{,}6\,м = 5{,}147\,м \qquad (8.1)$$

Ширину приміщення формують дві повні ширини котлів, міжкотловий зазор та бічні проходи:

$$B = 2e + b_{мк} + 2b_{бц} = 2 \cdot 1{,}425\,м + 0{,}85\,м + 2 \cdot 0{,}85\,м = 5{,}4\,м. \qquad (8.2)$$

Площа котельні обчислюється як добуток отриманих габаритів:

$$S = L \cdot B = 5{,}147\,м \cdot 5{,}4\,м \approx 27{,}8\,м^2 \qquad (8.3)$$

Для уніфікації прийнято рішення оформити план 5,15 м × 5,40 м, що дає 27,8 м² із невеликим резервом під монтаж димових каналів, насосного вузла, гідрострілки та ремонтні роботи. Висота стелі не повинна бути меншою за 3,2 м, щоб забезпечити нормативний повітрообмін.

Об’єм приміщення котельні визначаємо як добуток площі $S$=28м² та висоти $H$=2,8 м

$$V = 28 \cdot 3,2 = 89,6 м^3 \quad (8.4)$$

Приймаємо кратність повітрообміну $k$=3, отже сумарна витрата повітря становить

$$L = kV = 3 \cdot 89,6 = 268,8 \frac{год}{м^3}. \quad (8.5)$$

Діаметр патрубка дефлектора ЦАГИ визначаємо за формулою:

$$d_g = 0,0188 \sqrt{\frac{L}{v_g}} = 0,0188 \sqrt{\frac{268,8}{3 \cdot 0,4}} = 0,2814 м, \quad (8.6)$$

де $v_g = 0,4 v_{шв.в} = 0,4 \cdot 3$ м/с.

Згідно обрахунків, можна використовувати 1 дефлектор, потрубок якого рівний Ø 300 мм. Якщо брати в розрахунок дефлектори з патрубком Ø 200 мм, продуктивність яких при швидкості вітру 3 м/с можна обрахувати виходячи з паспортної продуктивності дефлектора Ø 300 мм [34]:

$$Q_{200} \approx Q_{300} \frac{\pi (0,1)^2}{\pi (0,15)^2} = 360 \cdot \frac{0,0314}{0,0707} = 160 \frac{м^3}{год}, \quad (8.7)$$

Таким чином, необхідна кількість дефлекторів

$$n = \frac{L}{Q_{200}} = \frac{268,8}{160} = 1,68 \Rightarrow 2 шт. \quad (8.8)$$

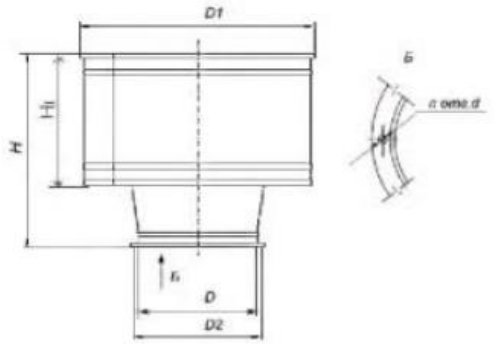



*Рисунок 8.1 Габаритно-монтажна схема дефлектора типу ЦАГИ*

Відтак для організації витяжної вентиляції котельного приміщення достатньо встановити два дефлектори Ø 200 мм. Це рішення забезпечить нормативну витрату повітря із запасом і відповідає санітарним та конструктивним вимогам [34].

### 8.2.2. Склад повітря робочої зони

Склад повітря робочої зони регламентується ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та Гігієнічними регламентами хімічних речовин у повітрі робочої зони (наказ МОЗ України № 1596). Забезпечується концентрація кисню не менше 19,5 %, вуглекислого газу – не більше 0,2 %, оксидів азоту – не більше 0,085 мг/м³, монооксиду вуглецю – не більше 5 мг/м³, пилу – не більше 5 мг/м³. Дотримання нормативних ПДК шкідливих речовин гарантує відсутність гострих токсичних і хронічних професійних захворювань.

Для підтримання якісного складу повітря передбачено витяжну вентиляцію безпосередньо в зонах утворення шкідливих викидів (запальні камери, відводи димових газів) із окремими канальними витяжками. Надходження свіжого повітря здійснюється через фільтри та повітрозбірники, розташовані поза зоною теплового випромінювання. Якість повітря контролюється газоаналізаторами та переносними газовимірювальними приладами не рідше ніж раз на зміну зі складанням протоколів перевірок.

### 8.2.3. Виробниче освітлення

Виробниче освітлення технічного приміщення котельні організоване відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне та штучне освітлення». Для забезпечення комфортного та безпечного світлового середовища враховано наступні норми:

- Середня розрахункова освітленість на робочих рівнях (0,75–0,85 м над підлогою) становить 200 лк у виробничих зонах з огляду та обслуговування обладнання, 300 лк у зонах керування пультами та 500 лк безпосередньо біля контрольних приладів та органів управління.
- Оптичні світильники з антивідблисковими щитками.
- Розташування світильників у шаховому порядку на висоті 3,0 м забезпечує рівномірний розподіл світла та мінімум тіней. Природне освітлення організовано через віконні прорізи та світлові ліхтарі з КПО ≥ 1,5 %.
- Технічне обслуговування у вигляді очищення світильників і відбивачів від пилу – раз на 6 місяців, заміна ламп при зниженні світлового потоку нижче 80 %, перевірка заземлення та кабельної мережі – при кожному ТО та документування результатів у журналі освітлення.
- Для аварійного освітлення встановлено автономні LED-світильники з автономним живленням не менше 1 години. [31]

### 8.2.4. Виробничий шум

Рівень промислового шуму в котельному приміщенні регламентується ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». За санітарними нормативами середній еквівалентний рівень шуму для зон обслуговування обладнання не перевищує 65 дБА, а в безпосередній близькості до насосних і вентиляційних агрегатів допускається до 75 дБА. Рівні шуму понад 85 дБА вимагають обов’язкового використання засобів індивідуального захисту органів слуху та встановлення технічних заходів з шумозниження.

Для зниження шумового навантаження встановлені акустичні кожухи навколо насосів і вентиляторів, виготовлені з шумопоглинаючих матеріалів, що забезпечують зниження рівня шуму до 10–15 дБ. Також застосовуються силен-блоки та віброізоляційні опори для фундаментів обладнання, які гасить вібрації та перешкоджають передачі звуку по конструкціям.

Контроль за рівнем шуму здійснюється сертифікованими шумомірами не рідше одного разу на місяць з оформленням протоколів вимірювань. У разі перевищення граничних значень проводяться пусконалагоджувальні роботи з регулювання вентиляційних клапанів, заміри вібраційних навантажень та огляд акустичних елементів. Оператори при виконанні ремонтних або регламентних робіт у зонах підвищеного шуму забезпечуються берушами або навушниками з рівнем ослаблення не менше 25 дБ.

### 8.2.5. Виробничі вібрації

Нормативно-граничні значення виробничої вібрації в технічному приміщенні котельні встановлені в ДСТУ 12.1.012:2008 «Вібрація. Загальні вимоги по безпеці». Для зон обслуговування обладнання середньозважений рівень вібраційних прискорень не має перевищувати 2,5 м/с² у діапазоні частот 1–100 Гц. При роботі безпосередньо на насосних агрегатах і люках вібрація може сягати до 4,0 м/с², але не повинна перевищувати граничних значень, призначених для локальної вібрації.

Для мінімізації вібраційного навантаження застосовуються вібропоглинаючі опори і силен-блоки під рами насосів та вентиляторів, пружинні або гумові амортизатори у системах кріплення трубопроводів, також проектуються фундаменти з антивібраційними прокладками та ізоляційними швами.

Моніторинг вібрації здійснюється за допомогою віброметрів та акселерометрів із частотою вимірювань не рідше ніж раз на квартал. У разі виявлення перевищень проводиться коригування кріплень, переналагодження балансування та заміна зношених амортизаторів для забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

### 8.2.6. Виробничі випромінювання

Виробничі випромінювання технічного приміщення котельні включають інфрачервоне теплове випромінювання від поверхонь котлів і трубопроводів, а також електромагнітні поля від силових кабелів і електрообладнання. Норми безпеки регламентуються Державними гігієнічними нормативами радіаційної безпеки ДГН 6.6.1-5.001-98. Згідно з цими нормативами, щільність теплового потоку на відстані 0,5 м від поверхні обладнання не повинна перевищувати 500 Вт/м², а рівень електромагнітного поля в робочій зоні – 10 В/м.

Для забезпечення безпечних рівнів випромінювань може бути впроваджена термостійка теплоізоляція та екрани з відбиваючого матеріалу на теплових поверхнях котлів і труб, прокладання силових кабелів у заземлених металевих коробáх та монтаж ліній живлення з екранованими проводами, розташування операторських робочих місць на відстані не менше 1 м від основного нагрівального обладнання, також регулярна перевірка рівнів ІЧ-випромінювання інфрачервоними термокамерами та вимір електромагнітних полів за допомогою міліметрових вольтметрів не рідше ніж раз на півроку.

Дотримання встановлених нормативів запобігає перегріванню організму персоналу, знижує ризик ураження електромагнітними полями та сприяє довготривалому безпечному функціонуванню системи автоматизації.

## 8.3. Пожежна безпека

Пожежна безпека котельного приміщення організована відповідно до ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» та НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Метою розділу є забезпечення попередження загоряння, раннього виявлення осередку пожежі та обмеження його поширення для мінімізації ризиків і втрат.

### 8.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

Реалізація системи запобігання пожежі базується на багаторівневому підході до моніторингу та контролю вибухо- та пожежонебезпечних параметрів. Постійний

аналіз концентрації природного газу здійснюється за допомогою стаціонарних газоаналізаторів з електрохімічними сенсорами, розміщених у зонах підключення паливних магістралей. Пристрої обладнані автоматичною системою самокалібрування та резервним живленням, що гарантує їхню працездатність при аварійному стрибку напруги не менше ніж протягом двох годин. Дані газоаналізаторів у режимі реального часу передаються до програмно-апаратного комплексу ПЛК, який при фіксації зростання концентрації газу вище порогового рівня, генерує команду на перекриття електромагнітних та пневматичних заслінкових клапанів у паливних лініях. Одночасно ініціюється запуск вентиляційних установок із підвищеною продуктивністю для швидкого видалення газоповітряної суміші з приміщення.

Захист від перегріву реалізовано через використання високоточних термопар з класом точності не нижче B, встановлених у критичних точках котла: на корпусі пальникового відсіку, на виході димових газів та в зоні магістральних трубопроводів. Сигнали кожного давача обробляються модулем ПЛК, який запускає поетапне зниження теплового навантаження при перевищенні температури 90 °C і повністю блокує подачу палива при досягненні 100 °C. Така схема забезпечує плавне зниження потужності і виключає різкі температурні перепади, які можуть призвести до самозаймання ізоляційних матеріалів та елементів конструкції.

Розподільні щити та апаратні панелі виготовлені з термозапобіжними вставками та ущільненнями іншого класу для запобігання утворенню іскри. Кабельні траси виконані з використанням екранованих вогнестійких кабелів із двошаровою ізоляцією, прокладених у металевих лотках із додатковим заземленням, що усуває ризик статичного розряду та поширення іскроутворень.

Механічні передавальні елементи насосних агрегатів та вентиляторів оснащені магнітними муфтами безконтактного типу, які виключають механічне тертя та іскроутворення. У вузлах фільтрації димових газів встановлені вибуховідводи та струшувачі, що при локальних спалахах вибухонебезпечного

пилу знижують енергію вибухової хвилі й запобігають руйнуванню фільтрувальних елементів.

Для гарантування безперервності функціонування системи запобігання передбачена надлишкова архітектура резервування: дубльовані модулі газоаналізу та термоконтролю розміщені в окремому щитовому відсіленні з автономними каналами зв’язку, що забезпечують роботу протягом хоча б чотирьох годин у разі виходу з ладу основного обладнання. Інформація з резервних модулів накопичується в базі SCADA через OPC UA, що дозволяє проводити ретроспективний аналіз та оптимізувати графік технічного обслуговування.

Організаційна складова системи запобігання включає регулярні інструментальні перевірки герметичності з’єднань паливних трубопроводів із застосуванням ультразвукової дефектоскопії, щотижневе видалення пилових та конденсатних відкладень із внутрішніх стінок газопроводів, а також щоквартальні випробування приводів заслінкових клапанів із документальним підтвердженням працездатності в протоколах. Після аварійного блокування паливних ліній автоматично запускається надлишковий повітрообмін протягом 15 хвилин для видалення залишкових парів палива та виключення повторного загоряння [33].

### 8.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

Проєктування системи протипожежного захисту виконано з урахуванням основних принципів надійності, резервування та простоти обслуговування, передбачених у ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту». Основним джерелом гасіння є спринклерна мережа, що охоплює весь машинний зал, операторську кімнату та щитову. Система побудована за схемою двох незалежних контурів, кожен із окремою насосною установкою продуктивністю 8 л/с і тиском 0,8 МПа, що гарантує необхідну інтенсивність подачі води 5 л/м²·хв під час надзвичайної події.

До складу протипожежного захисту входить порошкова установка класу АВС, що активується автоматично від димових детекторів, розташованих по периметру машинного залу. Порошкові розпилювачі підключені до центрального

колектора з резервним балоном емульсії об’ємом 200 л, здатним забезпечити локальне гасіння при витраті 10 л/с. Цей контур призначений для запобігання поширенню вогню на електричні панелі та насосні агрегати.

Для згладжування гасіння в зоні газогорілок і теплообмінників застосовано систему пінного пожежогасіння з піноутворювальними генераторами, які подають піну в співвідношенні 1 % концентрату до 99 % води. Пінні вежі розташовані на відстані до 3 м від обладнання, що піддається ризику загоряння газу. Резервні ємності з концентратом загальним об’ємом 400 л забезпечують не менше 15 хвилин безперервної роботи.

Ключовим елементом системи є внутрішній протипожежний водогін з пожежними кранами та пожежними гідрантами. Три точки підключення з комплектами шлангів довжиною 30 м забезпечують оперативне подавання води кожному сегменту котельні. Розташування гідрантів узгоджене з нормативною схемою пожежного зонування та гарантує доступність у радіусі 20 м від будь-якої точки приміщення.

Організацію димовидалення та вентиляції в екстреному режимі реалізовано через систему теплових димоелектровентиляторів — чотири пристрої з продуктивністю 10 000 м³/год, що запускаються автоматично при підвищенні температури понад 70 °C або при спрацьовуванні димових давачів. Ці вентилятори створюють надлишковий тиск у коридорах та знижену температуру димової суміші, сприяючи безпечній евакуації персоналу.

Система оповіщення та управління евакуацією побудована на інтегрованих панелях керування, які синхронізовані зі світловими і звуковими сповіщувачами. Для покращення видимості шляхів евакуації використано фотолюмінесцентні стрічки та таблички відповідно до ДСТУ EN ISO 7010:2019, що забезпечує розпізнавання напрямку руху навіть за відсутності основного освітлення.

Всі елементи системи протипожежного захисту проходять обов’язкове технічне обслуговування: щомісячні перевірки насосів і клапанів під робочим тиском; щоквартальні випробування спринклерних та порошкових контурів; щорічне комплексне тестування димовидалення та системи оповіщення,

супроводжуване документальним оформленням згідно з вимогами НПАОП 0.00-1.69-13.

**Висновок**

У цьому розділі проведено комплексний аналіз умов безпеки при впровадженні та експлуатації автоматизації котельні для опалення адміністративних та виробничик приміщень промислового підприємства. З урахуванням конструктивних особливостей котельного обладнання та специфіки технічного приміщення, було розглянуто технічні рішення щодо безпечної експлуатації засобів автоматизації, забезпечення належних гігієнічних умов праці, а також протипожежного захисту.

Запропоновані заходи відповідають чинним нормам охорони праці, будівельним та електротехнічним регламентам і спрямовані на мінімізацію виробничих ризиків, забезпечення стійкої роботи автоматизованої системи, а також збереження здоров’я та працездатності персоналу.

# РОЗДІЛ 9

# ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Одним із ключових етапів впровадження сучасних технічних рішень на промислових об’єктах є оцінка їх економічної доцільності. Автоматизація технологічних процесів, зокрема в системах теплопостачання, дозволяє не лише підвищити енергоефективність та стабільність роботи обладнання, але й суттєво скоротити експлуатаційні витрати підприємства.

У межах даної роботи розглядається модернізація котельного господарства промислового підприємства шляхом впровадження системи автоматичного керування на базі двох водогрійних котлів Viessmann Vitoplex 100. Основна мета – забезпечення ефективного, безпечного та стабільного опалення адміністративних та виробничих приміщень, з одночасним зниженням витрат на обслуговування та споживання енергоресурсів.

В обґрунтуванні надано оцінку вартості основного обладнання, засобів автоматизації, допоміжних елементів, а також вартості монтажних робіт. Крім того, розраховано ключові економічні показники ефективності: термін окупності, річну економію експлуатаційних витрат, економію палива та потенціал зменшення працівників.

## 9.1 Розрахунок основних техніко-економічних показників

Для визначення вартості впровадження системи автоматизації складається кошторис, що включає витрати на закупівлю, транспортування та монтаж контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації.

Монтажні витрати враховують вартість матеріалів, енергоресурсів, оплати праці та супутніх витрат. Орієнтовно, загальні витрати на монтаж становлять 45 % від вартості обладнання. Окремо враховуються витрати на транспортування, які приймаються на рівні 25 % від загальної вартості КВПіА.

*Таблиця 9.1*

Вартість засобів автоматизації та приладів

| № | Назва | Тип | К-сть | Варітсть одинці приладу, грн | Загальна вартість, грн |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ПВП тиску | ETRANS P-01/ 1B / 06S | 1 | 6 343 | 6 343 |
| 2 | Термоперетворювач опору | SITRANS TS500 7MC650 SA4 | 6 | 12 666 | 75 996 |
| 3 | ВП для термоперетворювач опору | SITRANS TK L | 6 | 15 835 | 95 010 |
| 4 | ПВП температури | Sensit NK 510A | 1 | 4 500 | 4 500 |
| 5 | ПВП тиску | Сафір M5150 | 2 | 5 000 | 10 000 |
| 6 | Реле рівня | VEGASWING 61 | 2 | 10 000 | 20 000 |
| 7 | Газосигналізатор | Варта 2-03 | 1 | 2 955 | 2 955 |
| 8 | Реле тиску | Dungs GW 500 A | 1 | 4 260 | 4 260 |
| 9 | Реле перепалу тиску | Danfoss RT266AL 017D008166 | 4 | 17 195 | 68 780 |
| 10 | Регулюючий клапан | Bürkert Type 2301 | 3 | 14 000 | 42 000 |
| 11 | Позиціонер | Bürkert Positioner Type 8692 | 3 | 14 000 | 42 000 |
| 12 | Електромагнітний клапан | Dungs MVDLE 5065/5 | 1 | 27 603 | 27 603 |
| 13 | Насос | DAB K 55/50 T | 5 | 34 470 | 172 350 |
| 14 | Триходовий клапан | Siemens VXF47.100 | 3 | 37 492 | 112 476 |
| 15 | Пристрій плавного пуску | SIRIUS 3RW30 14-1BB04 | 5 | 6 279 | 31 395 |
| 16 | Електропривід | Siemens SBV151.00 | 3 | 18 605 | 55 815 |
| 17 | Мікропроцесорний контролер | Unitronics Vision V570 | 1 | 32 263 | 32 263 |
| 18 | Модуль вводу/виводу | V200-18-E4XB | 1 | 11 806 | 11 806 |
| 19 | Модуль розширення 1 | IO-ATC8/AI8 | 1 | 10 200 | 10 200 |
| 20 | Модуль розширення 2 | IO-AO6X | 1 | 8 230 | 8 230 |
| | | | | Всього | 833 982 |

Отже, згідно даних таблиці, загальна вартість засобів автоматизації та приладів становить: В1 = 833982 грн.

Витрати на монтаж становлять: В2 = 833982 · 0,45 = 375 291 грн.

Вартість транспортних витрат виходить: В3 = 833982 · 0,25 = 208 495 грн.

Загальна вартість автоматизації котельні: В = В1 + В2 + В3 = 1 417 768 грн.

Розраховуємо амортизаційні витрати, що становлять 40% від загальної вартості: 1 417 768 · 0,4 = 567 107 грн.

### 9.2 Розрахунок впливу автоматизації на техніко-економічні показники

Зміни техніко-економічних показників промислового підприємства залежать від впровадження автоматизації. Відповідно до цього впровадження потрібно визначити, що саме буде впливати на економію. Головним напрямком розрахунку економії після впровадження автоматизації – є витрата палива.

Котельня з двома котлами Viessmann Vitoplex 100 до впровадження автоматизації споживала 887 600 м$^3$/рік.

Річне споживання після впровадження автоматизація скоротилося до 798 840 м$^3$/рік.

Річна економія обсягу газу становить 887 600 - 798 840 = 88760 м$^3$/рік.

Враховуючи ціну на газ, що на теперішній час становить 8.548 грн за м$^3$ палива, рахуємо економію на паливі протягом року: 88 760 · 8.548 = 758 720 грн.

### 9.3 Розрахунок чисельності основних робітників бригади

До впровадження автоматизації котельна з двома водогрійними котлами Viessmann Vitoplex 100 працювала в цілодобовому тризмінному режимі й потребувала двох операторів котельні на зміну, оскільки кожен із котлів вимагав ручного налаштування параметрів горіння та постійного контролю показників тиску й температури. Таким чином, лише в оперативному складі щодня задіяли шість операторів. Окрім того, штатна чисельність включала начальника котельні, який координував роботу змін, а також двох технічних фахівців (інженера з технічного обслуговування й електромонтера) для виконання планових і

позапланових ремонтів. У підсумку до автоматизації загальна кількість персоналу котельні становила дев’ять осіб.

Після встановлення системи автоматичного керування, яка забезпечує безперервне регулювання співвідношення «повітря–газ», модуляцію подачі палива залежно від теплового навантаження та дистанційний моніторинг усіх ключових параметрів, потреба в операторському складі суттєво зменшилася. Один оператор котельні здатний одночасно контролювати обидва котли й супутні вузли, оскільки усі режими роботи відображаються на єдиному HMI-терміналі з архівацією даних. Для цілодобового тризмінного обслуговування тепер достатньо трьох операторів. У технічному складі залишаються начальник котельні й один інженер з обслуговування автоматизованого обладнання, який також виконує дрібний ремонт. Отже, після автоматизації загальна чисельність персоналу скорочується до п’яти осіб.

### 9.4 Розрахунок фонду заробітної плати (основних робітників)

Згідно із Законом України «Про оплату праці», оплата праці персоналу базується на тарифній системі, що враховує тарифні розряди, посадові оклади та кваліфікаційні характеристики працівників. У даному розділі розглядається річний фонд заробітної плати операторів контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації (КВПіА) до та після впровадження автоматизованої системи керування котельнею.

Основний фонд заробітної плати кожного оператора обчислюється за формулою: $F_{осн_до} = 100 \cdot 1960 \cdot 9 = 1\,764\,000$ грн/рік,

де тарифна ставка оператора становить 100 ₴/год, ефективний річний фонд робочого часу: 1960 год, та кількість операторів, необхідних для цілодобового обслуговування: 9.

Після автоматизації достатньо n = 5 операторів, отже

$F_{осн_після} = 100 \cdot 1960 \cdot 5 = 980\,000$ грн/рік.

Додатковий фонд заробітної плати, який включає премії й компенсаційні виплати, розраховується як 10 % від основного:

$F_{дод} = F_{осн} \cdot 0.10$

Відповідно,

$F_{дод_до} = 1\ 764\ 000 \cdot 0.10 = 176\ 400$ ₴/рік,

$F_{дод_після} = 980\ 000 \cdot 0.10 = 98\ 000$ ₴/рік.

Загальний річний фонд заробітної плати одного оператора дорівнює сумі основного та додаткового:

$F_{зп_до} = 1\ 764\ 000 + 176\ 400 = 1\ 940\ 400$ грн/рік,

$F_{зп_після} = 980\ 000 + 98\ 800 = 1\ 078\ 000$ грн/рік.

В результаті розрахунку річного фонду заробітної плати після автоматизації, ми отримали загальну суму в 1 078 000 ₴ на п’ять операторів. Щоб визначити середньомісячний дохід одного фахівця, слід поділити цю величину на 5 (кількість операторів) і на 12 місяців:

$F_{зп_один} = F_{зп_після} / 5 / 12 = 1\ 078\ 000 / 5 / 12 = 17\ 967$ грн/міс.

Різниця між цими величинами визначає річну економію фонду заробітної плати в результаті оптимізації чисельності обслуговуючого персоналу:

$\Delta F_{зп} = F_{зп_до} – F_{зп_після} = 1\ 940\ 400 – 1\ 078\ 000 = 862\ 400$ грн/рік

### 9.5 Розрахунок експлуатаційних витрат на автоматизацію

У цьому підрозділі виконується комплексний розрахунок експлуатаційних витрат, пов’язаних із впровадженням системи автоматизації котельні. До складу цих витрат входять енергозатрати на живлення контрольно-вимірювальних приладів, насосів та пристроїв плавного пуску; витрати на утримання технічного персоналу, який обслуговує КВПіА; амортизаційні відрахування на оновлення обладнання; фонди заробітної плати та обов’язкові соціальні внески; а також витрати на ремонт та технічне обслуговування системи.

Нижче наведено послідовність розрахунків для кожної зі статей витрат:

– енергозатрати на електроенергію:

З урахуванням всіх контрольно-вимірювальних приладів, насосів та пристроїв плавного пуску витрата електроенергії становить 37 300 кВт·год.

Щорічне споживання енергії становить:

$З_1 = 37\ 300 \cdot 4{,}32 = 161\ 136$ грн/рік.

– утримання прийнятого робітника на обслуговування КВПіА:

$З_2 = 17\ 967 \cdot 12 \cdot 1 = 215\ 604$ грн/рік.

– амортизаційні відрахування:

$З_3 = 567\ 107$ грн/рік.

– ремонтні витрати:

$З_4 = 25\ 000$ грн/рік.

– податки та соціальні відрахування:

$З_5 = (0{,}05 + 0{,}22) \cdot 215\ 604 = 58\ 213$ грн/рік.

Отже, загальна сума експлуатаційних витрат складає:

$З_е = З_1 + З_2 + З_3 + З_4 + З_5 = 1\ 027\ 060$ грн/рік

### 9.6 Розрахунок річного економічного ефекту і терміну окупності

Для фінального підтвердження доцільності впровадження автоматизованої системи керування котельнею визначають три основні економічні показники: річний чистий економічний ефект, термін окупності капіталовкладень та коефіцієнт економічної ефективності.

По-перше, обчислимо загальну умовно-річну економію $Е_{заг}$, віднявши від сумарної економії за всіма джерелами $Е_с$ експлуатаційні витрати $З_е$:

$Е_{заг} = Е_с - З_е = (\Delta Е_{газ} + \Delta Е_{зп}) - З_е = (758\ 720 + 862\ 400) - 1\ 027\ 060 = 1\ 621\ 120 - 1\ 027\ 060 = 594\ 060$ грн/рік.

Річна економія природного газу становить 758 720 грн/рік, річна економія на заробітній платі: 862 400 грн/рік; сума експлуатаційних витрат: 1 027 060 грн/рік.

По-друге, чистий річний економічний ефект $Е_ч$ з урахуванням капіталовкладень K і нормативу ефективності $Е_п$ (прийнято 0,15) знаходимо як:

$Е_ч = Е_{заг} - K \cdot Е_п = 594\ 060 - 1\ 417\ 768 \cdot 0{,}15 = 594\ 060 - 212\ 665 = 381\ 395$ грн/рік.

По-третє, термін окупності $Т_{ок}$ показує, за скільки років капітальні інвестиції відшкодуються за рахунок загальної умовно-річної економії:

$T_{ок}$ = K / $E_{заг}$ = 1 417 768 / 594 060 = 2,39 роки.

І нарешті, коефіцієнт економічної ефективності Е є оберненою величиною до терміну окупності:

Е = 1 / $T_{ок}$ = 1 / 2,39 = 0,42.

Отже, автоматизація котельні з двома Viessmann Vitoplex 100 забезпечує чистий річний ефект у розмірі 381 395 грн, окупається за 2,39 року та має високий коефіцієнт ефективності = 0,42, що свідчить про економічну доцільність проєкту в довгостроковій перспективі.

*Таблиця 9.4*

Зведена таблиця основних техніко-економічних показників

| № | Показник | Одиниці | Величина |
|---|---|---|---|
| 1 | Витрати на автоматизацію | Грн. | 1 417 768 |
| 2 | Чисельність робітників | Чол. | 5 |
| 3 | Місячна заробітна плата | Грн. | 17 967 |
| 4 | Річний економічний ефект | Грн. | 381 395 |
| 5 | Термін окупності | Роки | 2,39 |
| 6 | Коефіцієнт економічної ефективності | - | 0,42 |

**Висновок**

У результаті комплексного аналізу економічного обґрунтування автоматизації котельні з двома Viessmann Vitoplex 100 було встановлено, що загальний обсяг капітальних вкладень у обладнання, монтаж та логістику складає 1 417 768 грн. Завдяки точному керуванню процесом горіння й оптимізації чисельності обслуговуючого персоналу досягається суттєва річна економія: понад 758 720 грн на паливі та близько 862 400 грн на оплаті праці при експлуатаційних витратах 1 027 060 грн.

Отримані показники засвідчують чистий річний прибуток у розмірі близько 381 395 грн, що дозволяє окупити проект приблизно за 2,39 року. Коефіцієнт економічної ефективності на рівні 0,42 вказує на високу віддачу інвестицій і довгострокову рентабельність автоматизованої системи керування котельнею. Такий результат підтверджує доцільність вкладень у автоматизацію як з точки зору зниження операційних витрат, так і з позиції підвищення стабільності та безпеки теплопостачання.

# ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено проєкт автоматизації водогрійної котельні, що забезпечує теплопостачання адміністративних та виробничих приміщень. Основною метою роботи було підвищення ефективності, безпеки та стабільності функціонування котельного обладнання за рахунок впровадження сучасної системи автоматичного керування.

Проведено аналіз технологічного процесу як об’єкта керування, побудовано матеріальний і тепловий баланси, а також обґрунтовано номінальні значення параметрів роботи котельної установки. В основі котельні лежить використання двох газових котлів Viessmann Vitoplex 100, що забезпечують теплову потужність 1900 кВт. Особливості гідравлічного і температурного режимів були враховані при побудові функціональної та структурної схем автоматизації.

В рамках проєкту було розроблено спрощену функціональну схему автоматизації з каскадною структурою регулювання температури, у якій пріоритет надано точному підтриманню температури прямого теплоносія з обмеженням температури зворотного теплоносія. Додатково реалізовано стабілізацію тиску газу в пальниковій системі. Такий підхід дозволив досягти високої стабільності температури та зниження витрати газу приблизно на 5 %.

На основі розробленої ФСА обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема програмованого логічного контролера Unitronics Vision V570, давачів та виконавчих механізмів. Розроблено програмне забезпечення для ПЛК, а також змодельовано роботу системи регулювання температури прямого мережевого теплоносія на виході з водогрійного котла, з урахуванням динаміки об’єкта керування. За результатами моделювання підтверджено достатній рівень точності та швидкодії системи автоматичного регулювання.

Також у роботі розглянуто питання охорони праці та економічної ефективності впровадження автоматизації. Доведено, що впроваджена система дозволяє зменшити витрати на обслуговування, підвищити енергоефективність та надійність теплопостачання об’єкта.

# СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Viessmann. Низькотемпературний газовий котел Vitoplex 100. Технічний паспорт, 2014. – 34 с. (витяг із характеристик: двоходовий котел, ККД 94 %, макс. t = 95 °C). URL: https://www.viessmann.ua/content/dam/public-brands/ua/pdf/products/nyzkotemperaturni-gazovi-kotly/vitoplex/datasheet-vitoplex-100-%20pv1bdb-ua.PDF/_jcr_content/renditions/original./datasheet-vitoplex-100-%20pv1bdb-ua.PDF

2. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. – Наказ Мінсоцполітики України № 333 від 05.03.2018. – 192 с. (розд. 1, п. 19: визначення енерготехнологічного котла). URL: https://dnaop.com/html/54590/doc%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-1.81-18

3. Beregbud. Водогрійна котельня. Котельня водогрійного режиму. Водогрійна котельня – принцип роботи, опис, комплектація URL: https://beregbud.com.ua/ustatkuvannya-dlya-vodogrijnix-kotelen/

4. Unitronics. Vision570 PLC Technical Datasheet, 2016. (PLC з інтегрованим 5,7″ HMI, підтримка до 1000 I/O). URL: https://www.unitronicsplc.com/vision-series-vision570/

5. ТермоТехСервіс. Огляд котла Viessmann Vitoplex 100, 2013. URL: https://ttservice.com.ua/produktsiya/gazovye-kotly/viessmann-vitoplex-100-110-0-2000-0-kvt

6. Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів (ПБЕ), НПАОП 0.00-1.08-94. – 148 с. URL: https://dnaop.com/html/89/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-1.08-94

7. Конспект лекцій «Котельні установки промислових підприємств», ДДТУ (2019). URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl40.pdf

8. Теплові навантаження споживачів. Теплова схема котельні, КПІ ім. Сікорського (2022) URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/6530a0eb-a178-4015-a816-5ce52eadf534/download

9. Закон збереження маси, Wikipedia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%B8

10. Бакулін О. А. Автоматизація теплових процесів: підручник. – Київ: Арій, 2018.

11. Unitronics – V200-18-E4XB Snap-in I/O Module, (специфікація модуля локального I/O) URL: https://www.unitronicsplc.com/Documents/Vision/Snap-in/UG_V200-18-E4XB.pdf

12. Vitoplex 100 Data Sheet; Vitotronic 100 Manual URL: https://cdn0.scrvt.com/2828ebc457efab95be01dd36047e3b52/f4fdbcc1ca7c41d0/149174ef3ada/5822426VPA00012_1_vitoplex_200_technical_guide.PDF

13. ETRANS-P01. Технічна специфікація. Промислова технічна документація виробника. – 2023. URL: https://storage.ua.prom.st/2308446_etrans_po1_datasheet_ua_compressed.pdf.

14. SITRANS TSinsert/TS100/TS200/ TS500 Siemens Industry. – 2013. URL:https://cache.industry.siemens.com/dl/files/908/73021908/att_32064/v1/A5E03920348-03en_TS100200500_en-US.pdf

15. SITRANS TK L Siemens SiePortal. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/document/7306608/sitrans-tk-l-transmitter-for-temperature-(pt100)?dti=0&lc=en-IE

16. Sensit NK 510A. Промисловий давач температури з виходом 4-20 мА /Інтернет-каталог компанії \"Seltok\". URL: https://seltok.com/catalog/sensit-nk-510a-promisloviy-datchik-temperaturi-z-vikhodom-4-20-ma-30-c-do-60-c-50-mm-ip65/

17. Давачі тиску «Сафір М» із цифровою мікропроцесорною обробкою сигналу. ТОВ «Завод Манометр». URL: https://manometr-kharkiv.com/wp-content/uploads/2021/10/501_%D0%9D%D0%95_21.1.pdf.

18. VEGASWING 61: Operating Instructions. Офіційна документація від VEGA Grieshaber KG. – 2023. URL: https://www.vega.com/api/sitecore/DocumentDownload/Handler?documentContainerId

=2821&documentGroupId=29226&fileExtension=pdf&languageId=2&version=14-03-2023.

19. Газосигналізатори ВАРТА 2: Паспорт. ТОВ "ТЕМІО". URL: https://temio.com.ua/product/varta-2-03/

20. GW...A5: Реле тиску газу і повітря. Karl Dungs GmbH & Co. KG. URL: https://www.dungs.com/en/product/gwa5-compact-pressure-switch-for-gas-air-flue-and-exhaust-gases-for-multifunctional-gas-controls.

21. Pressure switch, Differential pressure switch RT Danfoss. – 2017. URL: https://assets.danfoss.com/documents/latest/219455/AI241086442336en-001103.pdf.

22. Type 2301 - Pneumatically operated 2-way Globe Control Valve. Christian Bürkert GmbH & Co. KG. URL: https://www.burkert.com/en/type/2301.

23. Bürkert Type 8692: Digital Electro-Pneumatic Positioner. Bürkert Fluid Control Systems. – 2024. URL: https://www.burkert.com/en/type/8692.

24. Інструкція з експлуатації та монтажу електромагнітного клапана типів MVD, MVDLE – 2017. URL: https://www.dungs.com/en/product/mv-4-mvd-mvd-5-mvdle-5-single-stage-safety-solenoid-valve.

25. Інструкція з монтажу та експлуатації насосів DAB K.URL: https://www.promnasos.com.ua/pdf/instructions/Cod_001355003.pdf

26. Siemens VVF47.. and VXF47.. 2-port and 3-port Flanged Valves.Beijing Siemens Cerberus Electronics Ltd. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109789331/A6V10366184.pdf.

27. Technical Datasheet for 3RW3014-1BB04. Siemens. URL: https://mall.industry.siemens.com/mall/Catalog/DatasheetDownload?downloadUrl=teddatasheet%2F%3Fformat%3DPDF%26caller%3DMall%26mlfbs%3D3RW3014-1BB04%26language%3Den.

28. Electromotoric actuators for seat valves SBX.., SBV… .Beijing Siemens Cerberus Electronics Ltd. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/326/109789326/att_1046084/v3/A6V10366171.pdf.

29. ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні». Київ: Мінрегіон України, 2014.

30. НПАОП 0.00-1.26-96 «Правила для парових і водогрійних котлів». Київ: Мінпраці України, 1996.

31. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне та штучне освітлення». Київ: Мінрегіон України, 2018.

32. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Київ: МОЗ України, 1999.

33. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Київ: ДСНС України, 2014.

34. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : Підруч. для вищ. навч. закладыв. Львів : Афіша, 2002. 320 с.

35. Модульна котельня Vitomodul 300-4000 кВт. Viessmann UA. Сучасні кліматичні рішення компанії Viessmann URL: https://www.viessmann.ua/uk/rishennya/komertsiyno-promyslovyy/vodohrijni-transportabelni-kotelni/vitomodul-do-4000-kw.html

36. Температурні графіки теплопостачання. Теплоенергетика України. URL: https://www.ter-en.com/ua/calculation/temperaturnyy_grafik

37. Крих Г.Б., Матіко Ф.Д. Теорія автоматичного керування: курс лекцій. Львів : НУЛП, 2023. 16 с.