

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:664.1:636.082.474

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва ННІ)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

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

\_\_\_\_\_ В.В. Каплун  
(підпис) (ПІБ)

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.2268"С".2023.12.14.001.ПЗ**

на тему **«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ ІЗ  
ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ  
SIEMENS»**

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(назва)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_ І.М. Болбот, д.т.н., професор  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

\_\_\_\_\_ Я.І. Анісімов  
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

\_\_\_\_\_ А.М. Гладкий, к.ф.-м.н., доцент  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2024**

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка  
\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
(бакалаврської, дипломної)

**Анісімову Ярославу Ігоровичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема кваліфікаційної магістерської роботи **«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА  
ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
КОТЛОАГРЕГАТОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ  
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ SIEMENS»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 14.12.2023 року № 2268«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2024 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Аналіз технологічного процесу отримання теплової енергії як об'єкта автоматизації.
2. Дослідження парового котлоагрегату як об'єкта автоматичного керування.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
4. Розробка цифрової системи керування.
5. Схеми системи автоматизації.
6. Розробка засобів візуалізації процесу керування паровим котлоагрегатом.
7. Техніко-економічне обґрунтування.

**Дата видачі завдання «15» грудня 2023 року**

**Керівник магістерської роботи** \_\_\_\_\_

(Підпис)

Гладкий А.М.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_

(Підпис)

Анісімов Я.І.

(Прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі розглядаються процеси виробництва пари в котлоагрегатах малої продуктивності та керування цими котлоагрегатами.

Предметом дослідження є зв'язки та закономірності процесів керування котлоагрегатом та їх вплив на енергоефективність технологічного процесу виробництва пари.

Мета дослідження полягає у підвищенні енергоефективності процесу виробництва пари в котлоагрегатах малої продуктивності шляхом удосконалення системи автоматичного керування котлоагрегатом, зокрема із використанням SCADA-технологій.

У магістерській роботі проаналізовані складові елементи технологічного процесу виробництва пари в котлоагрегатах; розроблена і досліджена математичну модель процесу виробництва пари в барабанному котлоагрегаті, визначені динамічні властивості котлоагрегату для каналу керування температурою насиченої пари на виході з котла у магістраль для споживача; розроблена функціональна схему автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом. Крім того, обґрунтований вибір комплексу технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування та розраховані показники якості її роботи, розроблена система автоматизації, створено операторський інтерфейс SCADA-системи контролю та керування у середовищі SIEMENS SIMATIC Process Control System 7, а також визначена економічна ефективність впровадження САК.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень і скорочень .....	5
Вступ .....	6
РОЗДІЛ 1. Аналіз технологічного процесу отримання теплової енергії як об'єкта автоматизації .....	9
1.1. Теплогенеруючі установки у промисловому і сільсько-господарському виробництві .....	9
1.2. Класифікація парових котлоагрегатів .....	11
1.3. Конструкція парового котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ .....	15
РОЗДІЛ 2. Дослідження парового котлоагрегату як об'єкта автоматичного керування .....	22
2.1. Параметричний аналіз котлоагрегату як об'єкта автоматизації .....	22
2.2. Розробка та дослідження математичної моделі теплових процесів у котлоагрегаті для виробництва пари .....	26
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань .....	32
3.1. Функціональна схема автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом .....	32
3.2. Вибір алгоритму керування .....	35
3.3. Реалізація алгоритму керування .....	37
3.3.1. Вибір програмованого логічного контролера .....	38
3.3.2. Обґрунтування вибору датчика температури .....	43
3.3.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК температурою пари на виході котлоагрегату .....	45
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування .....	51
4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК .....	51
4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування .....	54
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації .....	59
5.1. Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ .....	59
5.2. Вибір апаратури захисту та керування .....	64
5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів .....	65
5.2.2. Вибір електромагнітних пускачів .....	67
5.2.3. Вибір проміжних реле .....	68
5.3. Вибір проводів та кабелів .....	70
5.4. Вибір щита керування .....	71
РОЗДІЛ 6. Розробка засобів візуалізації процесу керування паровим котлоагрегатом .....	73
6.1. Програмне конфігурування обладнання .....	73
6.2. Розробка програмного забезпечення контролера .....	76
РОЗДІЛ 7. Техніко-економічне обґрунтування .....	80
Висновки .....	84
Література .....	85
Додатки .....	87

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ**

- ВЕР – вторинні енергетичні ресурси
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ПВС – пароводяна суміш
- ПЛК – програмований логічний контролер
- ПРА – пуско-регулююча апаратура
- САК – система автоматичного керування
- ТЕС – теплова електростанція
- ТЕЦ – теплова електроцентраль
- ЦСК – цифрова система керування
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерське управління та збір даних – програмний пакет, призначений для розробки або забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або управління

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасний етап розвитку людської цивілізації передбачає застосування різних видів енергії. Основну роль у цьому відіграє галузь під назвою енергетика. Енергетика – це галузь господарства, що охоплює велику кількість натуральних і штучних систем, що застосовуються для перетворення, розподілення та застосування енергетичних ресурсів.

В основному її завданням на сучасному етапі є перетворення одних видів енергії у інші.

Різні види форм енергії, властивість їх перетворення надає можливість застосовувати їх у відповідності до потреб промисловості, населення. Поєднання у застосуванні різноманітних форм енергії виникло в середині XIX століття, що дало змогу накопичити великий досвід трансформації певних форм енергії в інші. Потреба в перетворенні виникла у необхідності використання конкретних видів енергії (в основному тепла та електроенергії) в технологічних процесах, водночас за достатньо широкою різноманітності початкових енергоресурсів. Незважаючи на це, ці два види енергії використовуються в різних формах: теплота – у формі пари, високої температури газів та води різної температури, а електрика – у формі змінного або постійного струму.

Основними початковими джерелами були і залишаються осередки викопного палива (природний газ, нафта, вугілля, горючі сланці та ін.).

Трансформація енергії зазвичай проходить в різних системах. Сьогодні енергетикою застосовуються основні п'ять видів установок: генеруючі, акумулюючі, перетворюючі, транспортуючі та споживаючі.

Осередок сучасної теплоенергетики складається з теплових електростанцій (ТЕС), котрі працюють на базі парових турбін та котлів. Постійне удосконалення установок триває вже понад 100 років. Енергетична

ефективність використання конкретних видів енергоресурсів, рівень досконалості енергетичних установок визначається ККД установки.

Технологія окислення (спалювання палива) передбачає забезпечення подачі палива та окислювача в чітко визначених пропорціях для найбільш ефективного спалювання палива і отримання тепла. Такі установки характеризуються умовною неперервністю процесів, що в них протікають.

Системи автоматичного регулювання відіграють не аби яку роль у ході цього процесу, що дозволяє мінімізувати затрати, підвищити ефективність, здійснювати легкий контроль за об'єктом управління у ході виконання технологічного процесу.

Системи диспетчеризації, керування та збору даних – SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) є основним та найбільш перспективним методом автоматизованого керування складними динамічними системами та процесами у життєво важливих та критичних, з точки зору безпеки та надійності, областях. Тільки використання SCADA-систем дозволить здійснювати ефективне керування автоматизованими системами в промисловості та енергетиці, транспорті, машинобудуванні, автоматизації будівель, водопостачанні та водоочищенні, автомобілебудуванні. Тому питання впровадження комп'ютерно-інтегрованих SCADA-технологій, зокрема для удосконалення систем керування паровими котлоагрегатами, є своєчасними і актуальними.

**Об'єктом дослідження** є процеси виробництва пари в котлоагрегатах малої продуктивності та керування цими котлоагрегатами.

**Предметом дослідження** є зв'язки та закономірності процесів керування котлоагрегатом та їх вплив на енергоефективність технологічного процесу виробництва пари.

**Методи досліджень** ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масопереносу, математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дослідження полягає у підвищенні енергоефективності процесу виробництва пари в котлоагрегатах малої продуктивності шляхом удосконалення системи автоматичного керування котлоагрегатом, зокрема із використанням SCADA-технологій.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі задачі.

1. Проаналізувати складові елементи технологічного процесу виробництва пари в котлоагрегатах.
2. Розробити і дослідити математичну модель процесу виробництва пари в барабанному котлоагрегаті, визначити динамічні властивості котлоагрегату для каналу керування температурою перегрітої пари на виході з котла у магістраль для споживача.
3. Розробити функціональну схему автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом.
4. Обґрунтувати вибір комплексу технічних засобів автоматизації для реалізації системи керування та розрахувати показники якості її роботи, розробити систему автоматизації із операторським інтерфейсом SCADA-системи контролю та керування параметрами технологічного процесу виробництва пари.
5. Визначена економічна ефективність впровадження САК.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 1.1. Теплогенеруючі установки у промисловому і сільсько-господарському виробництві

Основним джерелом виробництва теплової і електричної енергії є теплові електричні станції (ТЕС), які використовують хімічну енергію палива для виробітку механічної, електричної і теплової енергії [1].

Найбільш економічним способом отримання теплової енергії є комбінований її та електричної енергії виробіток на теплоелектроцентралях (ТЕЦ). Однак не завжди наявні необхідні умови, які економічно виправдовують спорудження великих ТЕЦ. У цьому випадку виробництво теплової і електричної енергії відокремлюється одне від одного.

При відокремленому або комбінованому виробництві теплової та електричної енергії найчастіше у якості теплоносія використовується водяна пара. Агрегати, що призначені для виробітку водяної пари, називають *парогенераторами*, або *котельними агрегатами*.

Окрім водяної пари як теплоносій використовується гаряча вода. Агрегати, призначені для отримання гарячої води, називають *водогрійними котлами*. Таким чином, основним агрегатом, призначеним для виробітку пари або гарячої води, є парогенератор або водогрійний котел [3].

Установки, що виробляють пару або гарячу воду, являють собою доволі складний комплекс різноманітних пристроїв і механізмів і називаються *парогенеруючими* або *котельними установками*.

Окрім зазначених установок, існує також велика кількість агрегатів, які для отримання теплової енергії у якості теплоносія використовують нагріте повітря (рис. 1.1).

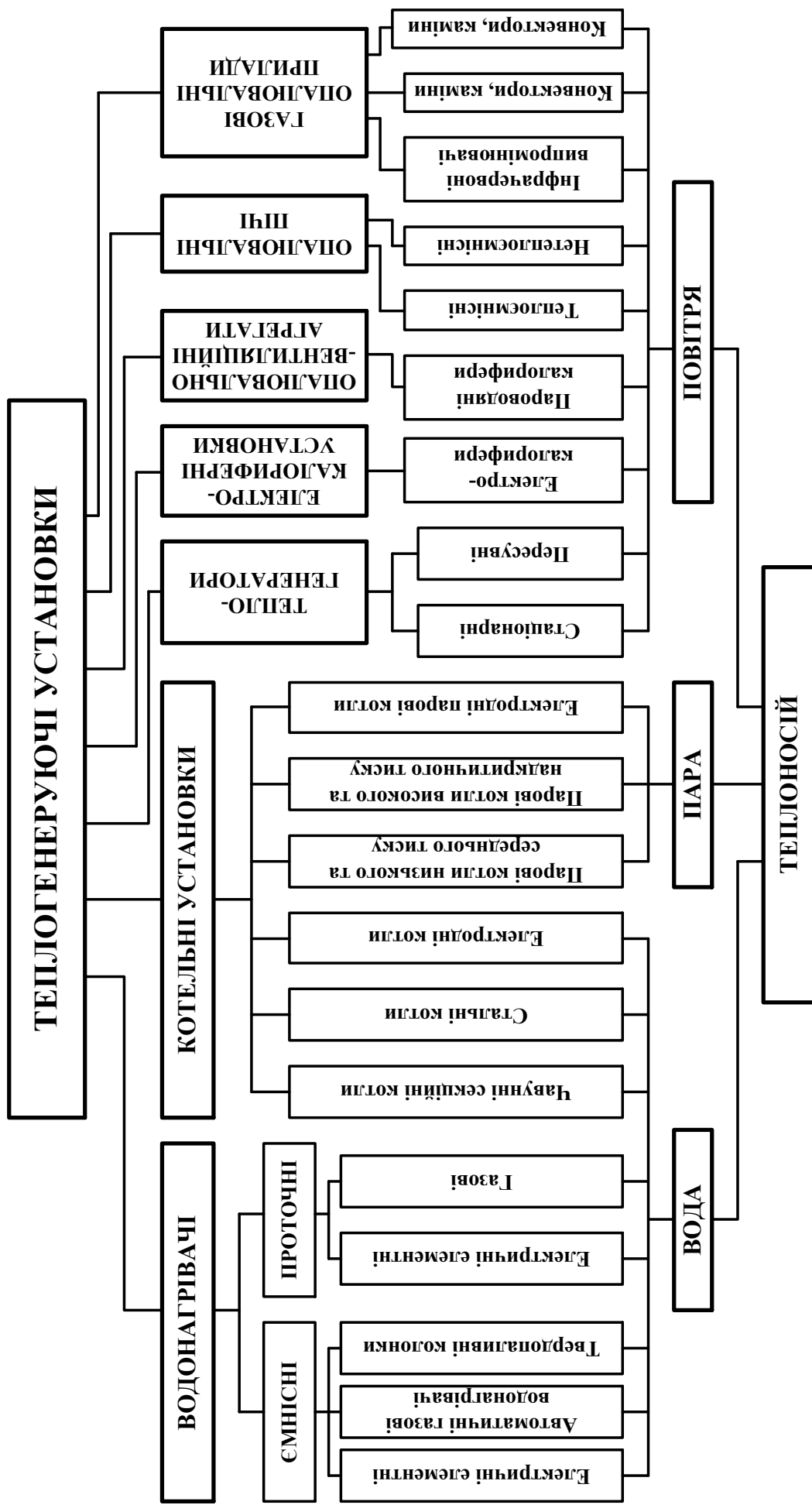


Рис. 1.1. Класифікація теплогенеруючих установок за видом теплоносія

Якщо розглянути теплопостачання будівель, існує два різновиди: *централізоване* і *місцеве*. При централізованому теплопостачанні здійснюється окремим районам (промисловим або житловим). Для ефективної роботи централізованої мережі теплопостачання її будують, розділяючи на рівні, де робота кожного елемента полягає у виконанні однієї задачі. Із кожним рівнем задача елемента зменшується. Місцеве теплопостачання – постачання теплом одного або декількох будинків. Система централізованого теплопостачання містить джерело теплової енергії (ТЕЦ), теплову мережу і установки теплоспоживання. Джерелами місцевого теплопостачання є котельні установки (котлоагрегати), печі, водонагрівачі.

*Котельна установка (котлоагрегат)* являє собою комплекс пристроїв, розміщених у спеціальних приміщеннях і призначених для перетворення хімічної енергії палива у теплову енергію пари або гарячої води. Основними елементами котлоагрегату є котел, топковий пристрій (топка), живильні та тягодутьові пристрої. Крім того, часто котельні оснащуються обладнанням для хімоводоочищення, до складу якого входять: освітлювачі із блоком освітлювальних фільтрів; блок Na-катіонних фільтрів I та II ступеня; NaCl-іонітовий фільтр [5].

## **1.2. Класифікація парових котлоагрегатів**

Для потреб енергетичної галузі промисловість виробляє широкий спектр парових котлоагрегатів, які можна класифікувати за призначенням, продуктивністю, параметрами пари, конструктивним оформленням, способами циркуляції води в них і т.п. [14].

За *призначенням* парові котлоагрегати поділяються на:

- енергетичні (котлоагрегати великої продуктивності середнього і великого тиску), що виробляють пару для парових турбін;

- промислові (котлоагрегати малої і середньої продуктивності, із малим і середнім тиском), які виробляють пару як для парових турбін, так і для технологічних вимог підприємств;
- опалювальні, що виробляють пару для опалення промислових, житлових та громадських будівель; до них відносять і водогрійні котли;
- утилізаційні – котли-утилізатори, призначені для отримання пари або гарячої води за рахунок використання теплоти вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) при переробці відходів хімічних виробництв, побутового сміття і т.д.;
- енерготехнологічні – призначені для отримання пари за рахунок ВЕР і які є невід'ємною частиною технологічного процесу (наприклад, содоренегераційні агрегати).

За *продуктивністю* виділяють котлоагрегати великої (більше 200 т/год.), середньої (25-200 т/год.) і малої (до 25 т/год.) продуктивності.

За *тиском* розрізняють котлоагрегати надвисокого (18-20 МПа) і надкритичного (більше 22,5 МПа) тиску, високого (14 МПа) тиску, середнього (4-10 МПа) і низького (до 1,4 МПа) тиску.

За *характером руху води, пароводяної суміші і пари* парові котлоагрегати поділяють на барабанні із багаторазовою природньою циркуляцією (рис. 1.2, а – барабанні парові котли низького, середнього і високого тиску), барабанні із багаторазовою примусовою циркуляцією (рис. 1.2, б – котли-утилізатори) та прямоточні (рис. 1.2, в – котли надвисокого і надкритичного тиску) [16].

У барабанних котлах із природньою циркуляцією (рис. 1.2, а, 1.3) внаслідок різниці щільності рідини у лівих (опускних) трубах 2 і пароводяної суміші у правих трубах (підйому) 4 відбувається рух води вниз, а пароводяної суміші – ввєрх. Підйомні труби розташовані у топці котла із боку нагріву (у зоні більших температур) і називаються екранними. Сукупність опускних і підйомних труб називають котельним пучком, інколи – кип'ятильними трубами.

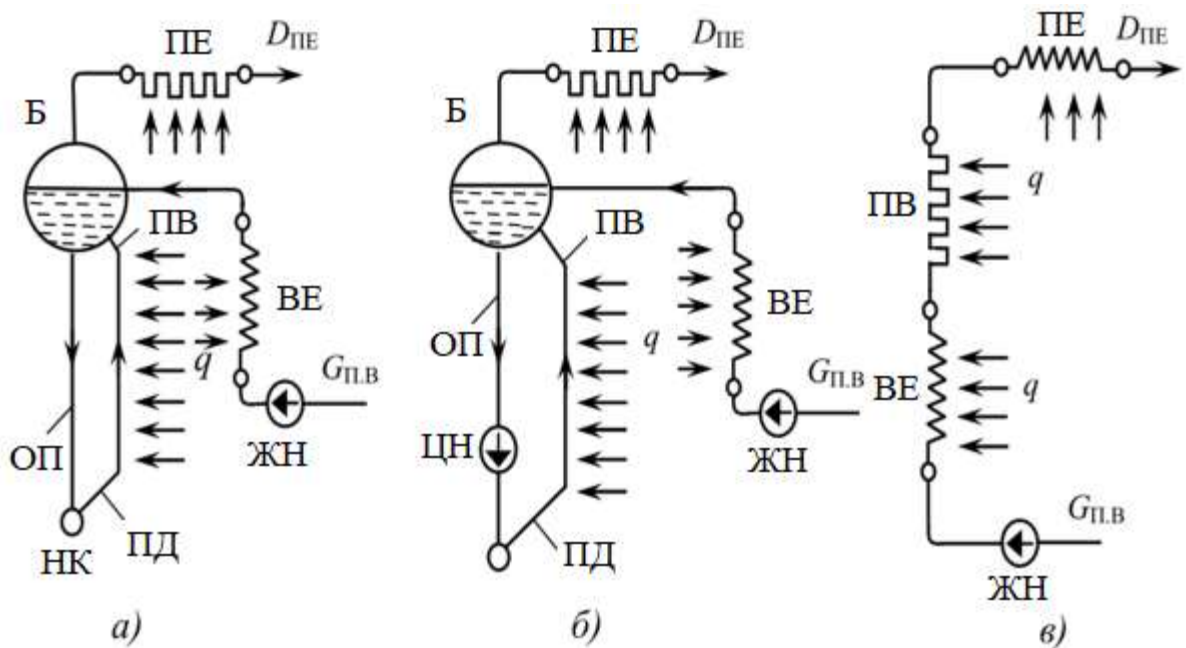


Рис. 1.2. Схема генерації пари у парових котлах:

а – природня циркуляція; б – багаторазова примусова циркуляція; в – прямиоточний рух; Б – верхній барабан; ПВ – поверхні випаровування; ПЕ – пароперегрівач; ВЕ – водяний економайзер; ЖН – живильний насос; ЦН – циркуляційний насос; НК – нижній барабан (колектор); ОП – опускні труби; ПД – підйомні труби;  $D_{ПЕ}$  – витрата перегрітої пари;  $G_{ПВ}$  – витрата живильної води;  $q$  – підведення теплоти

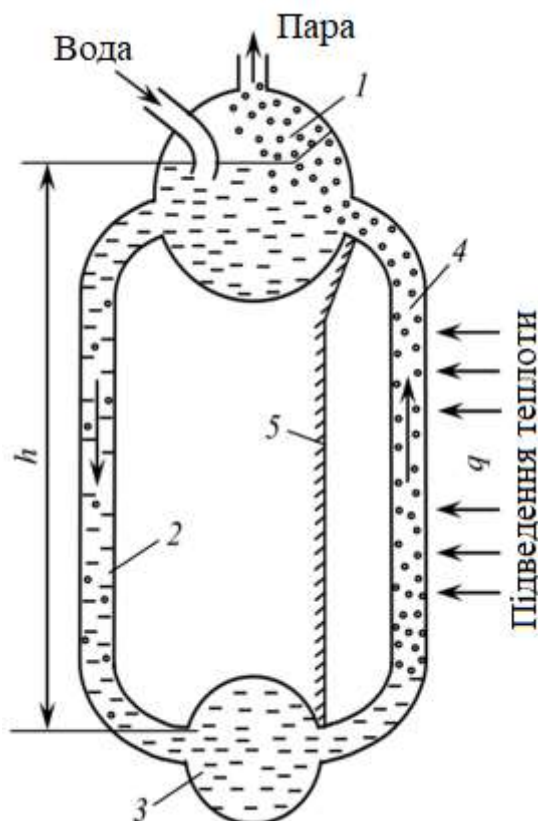


Рис. 1.3. Природня циркуляція води у паровому котлоагрегаті:

1 – верхній барабан котла; 2 – опускні труби; 3 – нижній барабан (колектор); 4 – піднімальні труби; 5 – зовнішня поверхня топкової камери

У котлах із багаторазовою примусовою циркуляцією (рис. 1.2, б) рух теплоносія здійснюється за допомогою циркуляційного насоса.

У прямоточних котлах (рис. 1.2, в) барабан і циркуляційний контур відсутній, вода прокачується живильним насосом через водяний економайзер та випаровувальні поверхні, які з'єднані послідовно.

За видами спалюваного палива розрізняють газові, мазутні та твердопаливні котли.

Крім зазначених ознак, котлоагрегати відрізняються конструктивними ознаками (наприклад, конструкцією теплообмінників та їх кількістю, та ін.).

Отже, котлоагрегати великої потужності (продуктивність  $D_{\text{шт}}$  у межах 200...2500 т/год., температура  $t_{\text{шт}}$  перегрітої пари 540...570°C, тиск перегрітої пари  $P_{\text{шт}} \geq 10$  МПа) є енергетичними котлами, або парогенераторами, які використовуються на теплових електростанціях.

Котлоагрегати середньої потужності ( $D_{\text{шт}} = 35...200$  т/год.,  $t_{\text{шт}}$  близько 440°C,  $P_{\text{шт}} = 4...10$  МПа) вважаються промисловими, які встановлюються на ТЕЦ.

Котлоагрегати малої потужності із насиченою або слабоперегрітою парою на виході  $t_{\text{шт}} = 220...250^\circ\text{C}$  (продуктивність  $D_{\text{шт}} \leq 35$  т/год.,  $P_{\text{шт}} \leq 1,4$  МПа) відносяться до виробничо-опалювальних і використовуються в парових або пароводогрійних котельнях.

Буквені позначення типу котла та виду спалюваного палива прийнята наступною: Е – з природньою циркуляцією; Пр – з примусовою циркуляцією; П – прямоточний; Пп – прямоточний із проміжним перегрівом; Еп – барабанний із природньою циркуляцією та проміжним перегрівом; Г – газоподібне паливо; М – мазут; Б – буре вугілля; К – кам'яне вугілля; Т, Ж – відповідно із твердим та рідким шлаковидаленням. Наприклад, котел барабанний із природньою циркуляцією продуктивністю 210 т/год. із тиском 13,8 МПа і температурою перегрітої пари 565°C на кам'яному вугіллі із твердим шлаковидаленням маркується: Е-210-13,8-565 КТ [16].

При виконанні спрощених технологічних схем і схем автоматизації необхідно враховувати наступні конструктивні особливості котлоагрегатів:

1) до складу котлів великої продуктивності входять складні пароперегрівачі, які містять радіаційну, радіаційно-конвекційну і конвекційну складові, що розділені пароохолоджувачами та паропідігрівачами;

2) до складу котлів середньої продуктивності також входять різноманітні поверхні нагріву – конвекційний пароперегрівач із поверхневим пароохолоджувачем, одно- або двохступеневим економайзером і паронагрівачем;

3) котли малої потужності містять меншу кількість поверхонь теплообміну: не містять пароперегрівача, оскільки на виході отримується насичена пара (у деяких випадках наявний слабкий нерегульований пароперегрівач для температур 220 або 250°C), відсутній підігрівач повітря перед топкою, а економайзер часто винесений за межі котла [22].

Така різноманітність конструкцій котлоагрегатів не дозволяє створити єдину універсальну систему автоматичного керування їх роботою. Однак для барабанних парових котлів із природною циркуляцією (рис. 1.2, а, 1.3) можна виділити певні загальні потоки, які є характерними для цих котлів, визначити основні канали керування і відокремити їх як окремі одно-контурні системи.

### **1.3. Конструкція парового котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ**

Парові двохбарабанні котли із розвиненими котельними пучками типу Е, Е (КЕ), ДКВ (рис. 1.4) відносяться до котлів малої продуктивності низького та середнього тиску, що працюють на газоподібному, рідкому або твердому паливі [24].

Котел складається із верхнього 1 та нижнього 2 барабанів однакової довжини, які розміщені на одній вертикальній вісі. Барабани з'єднані між собою вигнутими кип'ятильними трубами (одинадцять рядів по чотирнадцять

штук), які утворюють відповідно перший 3 та другий 4 газоходи конвекційної поверхні нагрівання. Газоходи розділені між собою сталюю ширмою всією висотою газоходу котла з вікном (від фронту котла) із правого боку. Труби кип'ятільного пучка відділені від топки вертикальною ширмою 6 із жаростійкої сталі всією висотою топки, яка не доходить до лівої стінки котла, залишаючи вікно зліва від проходу топкових газів із топки у газохід.

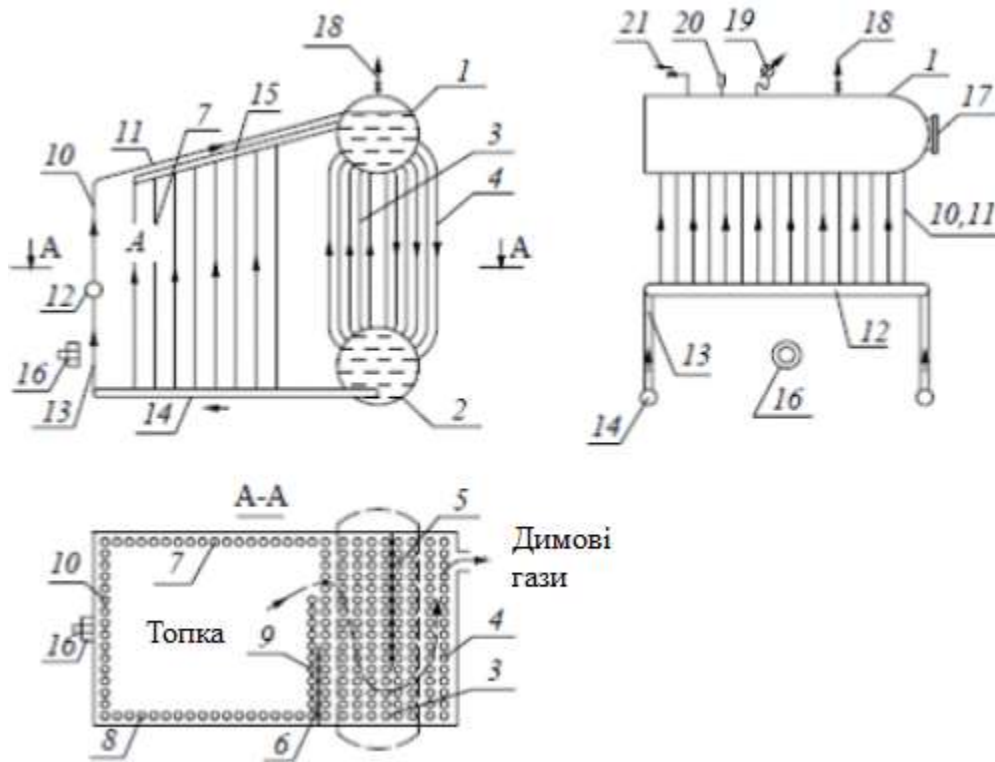


Рис. 1.4. Принципова схема котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ:

1,2 – відповідно верхній і нижній барабани; 3,4 – кип'ятільні труби (котельний пучок) першого і другого газоходів (піднімальні і опускні труби); 5,6 – металеві перегородки; 7,8 – лівий і правий бічні екрани топки; 9 – задній екран топки; 10,11 – фронтальний і даховий екрани; 12 – фронтальний колектор; 13 – перепускні труби; 14,15 – нижній і верхній колектори бічного екрану; 16 – палик; 17 – водоваказівне скло; 18 – паропровід; 19 – манометр; 20 – термометр; 21 – запобіжний клапан

Уся трубна система зібрана на одній рамі – звареному металевому каркасі. Частина нижнього барабану закріплюється нерухомо, а інші частини котла мають ковзаючі опори і реperi, які контролюють подовження елементів при температурному розширенні.

Топка сформована екранними трубами, які утворюють відповідно: 7 – лівий бічний екран; 8 – правий бічний екран (подібний лівому); 9 – задній екран топки; 10 та 11 – передній (фронтальний) і дахові екрани. Фронтальний колектор 12 в кутах топки з'єднаний двома перепускними трубами 13 із двома нижніми колекторами бічних екранів для забезпечення необхідної циркуляції води у котлі. Лівий бічний екран топки виконаний з вертикальних труб 7, приварених до нижнього горизонтального колектора 14 та верхньому похилому колектору 15. Правий бічний екран топки виконаний аналогічно лівому. Нижні колектори бічних екранів топки приварені до нижнього барабану, а верхні колектори – до верхнього барабану. Верхні колектори екранів мають люки для чищення труб і огляду колектора. Пальник 16 розташований під фронтальним колектором 12.

Обмуровка фронтальної, задньої і бічних стінок котлоагрегату виконана трьох-шаровою, а дахового екрану – із чотирьох шарів, причому у першому шарі використовується вогнестійка цегла, решта шарів складається з ізоляційних плит. Нижня частина в топці – викладається вогнестійкою (діатомовою) цеглою. Обмуровка котлоагрегату назовні вкривається металевою листовою обшивкою для зменшення всмоктування повітря у газовий тракт. Обмуровка, ізоляція та металева обшивка котла закріплюються на каркасі.

**Газоповітряний тракт.** Паливо і повітря подаються у пальник 16, а у топці виникає факел горіння. Тепло від топкових газів у топці, за рахунок радіаційного та конвекційного теплообміну, передається усім екранним трубам (радіаційна поверхня нагріву), де ця тепло передається воді, яка циркулює по екранам. Топкові гази виходять із топки і через вікно зліва у металевій перегородці 6 переходять у перший газохід 3, де передають теплоту конвекційному пучку труб, а потім, огинаючи перегородку 5 з правого боку і поворотом на 180°, входять у другий газохід 4 кип'ятильного пучка труб і з температурою приблизно 250°C через задню стінку виходять із котла і прямують до димососу, а потім у димову трубу.

**Основні контури природної циркуляції.** Живильна вода після пом'якшення по трубопроводам живильної лінії, живильним насосом подається у водний об'єм барабану 1, де змішується з котловою водою. На живильній лінії встановлений зворотний клапан і вентиль.

В котлі наявні чотири контури природної циркуляції.

- 1-й контур (по кип'ятильним трубам). Котлова вода з верхнього барабану 1 опускається у нижній барабан 2 по кип'ятильним трубам 4 конвекційного пучка, розташованим у другому газоході – в області більш низьких температур топкових газів. Пароводяна суміш (ПВС), яка утворюється при цьому, піднімається у верхній барабан по трубам заднього екрану топки 6 і кип'ятильним трубам 3, розташованим у першому газоході – в області високих температур топкових газів.

- 2-й контур (по лівому бічному екрану). Котлова вода із нижнього барабану підводиться до нижнього колектору 14, розподіляється по ньому, а ПВС, що утворилася, по трубам 7 лівого бічного екрану, розташованим у топці, піднімаються у верхній колектор 15, звідки потрапляють у верхній барабан.

- 3-й контур (по правому бічному екрану топки 8) – здійснюється аналогічно лівому бічному топковому екрану.

- 4-й контур (по фронтальному і даховому екрану топки). Котлова вода із нижніх колекторів бічних екранів по перепускним трубам 13 підводиться до фронтального колектору 12, розподіляється по ньому, а ПВС, що утворилася, по трубам фронтального 10 і дахового 11 екранів спрямовується у верхній барабан.

Вода і ПВС із усіх контурів циркуляції піднімається у верхній барабан, де у паросепараційних пристроях відділяється пара, а вода змішується із котловою водою і процес циркуляції повторюється. Після паросепараційних пристроїв отримана суха насичена пара паропроводом 18 надходить споживачеві.

Котел оснащений двома пружинними запобіжними клапанами 21 і відповідною арматурою: термометром 20, манометром 19, водяним оглядовим вікном 17. На задній стінці котла встановлений обдувний апарат, а на обмуровці, у верхній частині топки – вибуховий запобіжний клапан. У котлі три точки періодичної продувки: з нижнього барабану і двох нижніх колекторів бічних екранів.

Структурна схема процесу отримання пари у зазначеному котлоагрегаті зображено на рис. 1.5. Даний комплекс складається із серії теплообмінників, з'єднаних один із одним, і використовується для передачі тепла від спалюваного палива до води, яка при досягненні точки ентальпії перетворюється у водяну пару, при цьому відпрацьовані залишки продуктів згорання залишають топку, віддаючи своє тепло живильній води у економайзері.

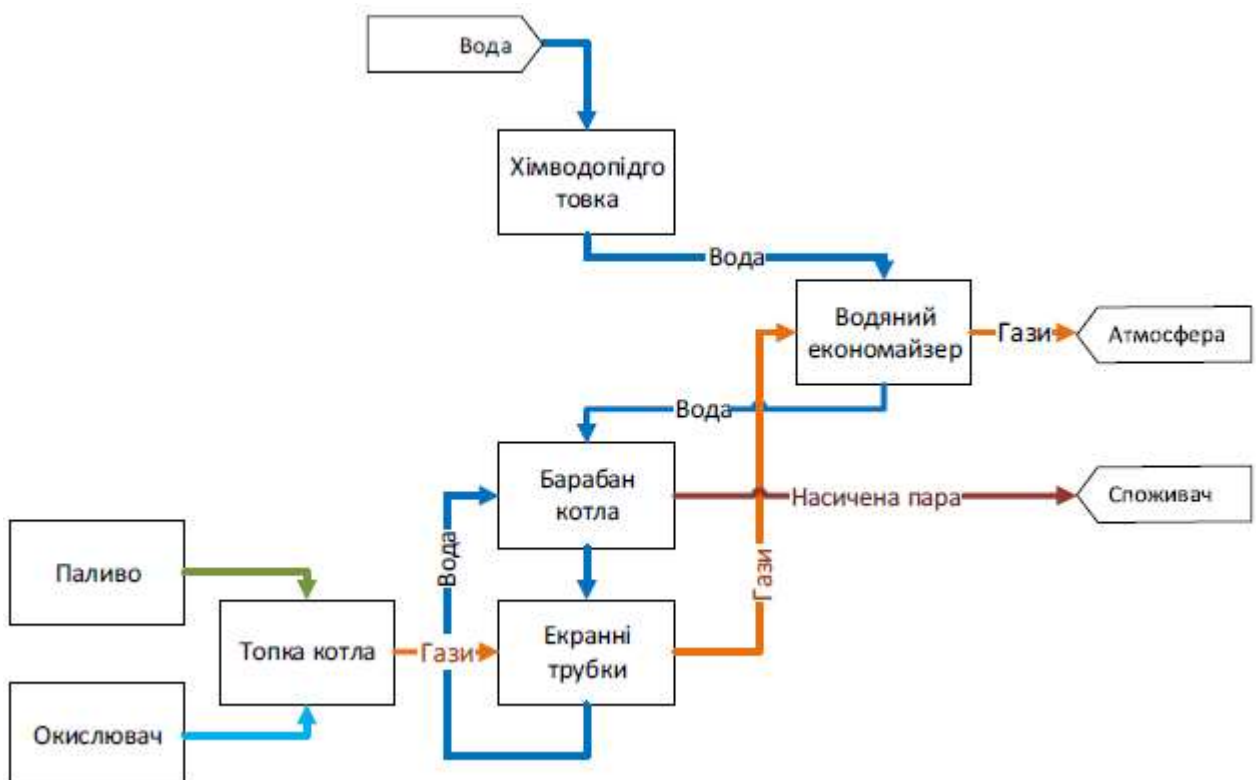


Рис. 1.5. Структурна схема отримання пари у паровому котлоагрегаті

Зовнішній вигляд барабанного котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ зображений на рис. 1.6, 1.7, технічні характеристики котлоагрегату наведені в таблиці 1.1.

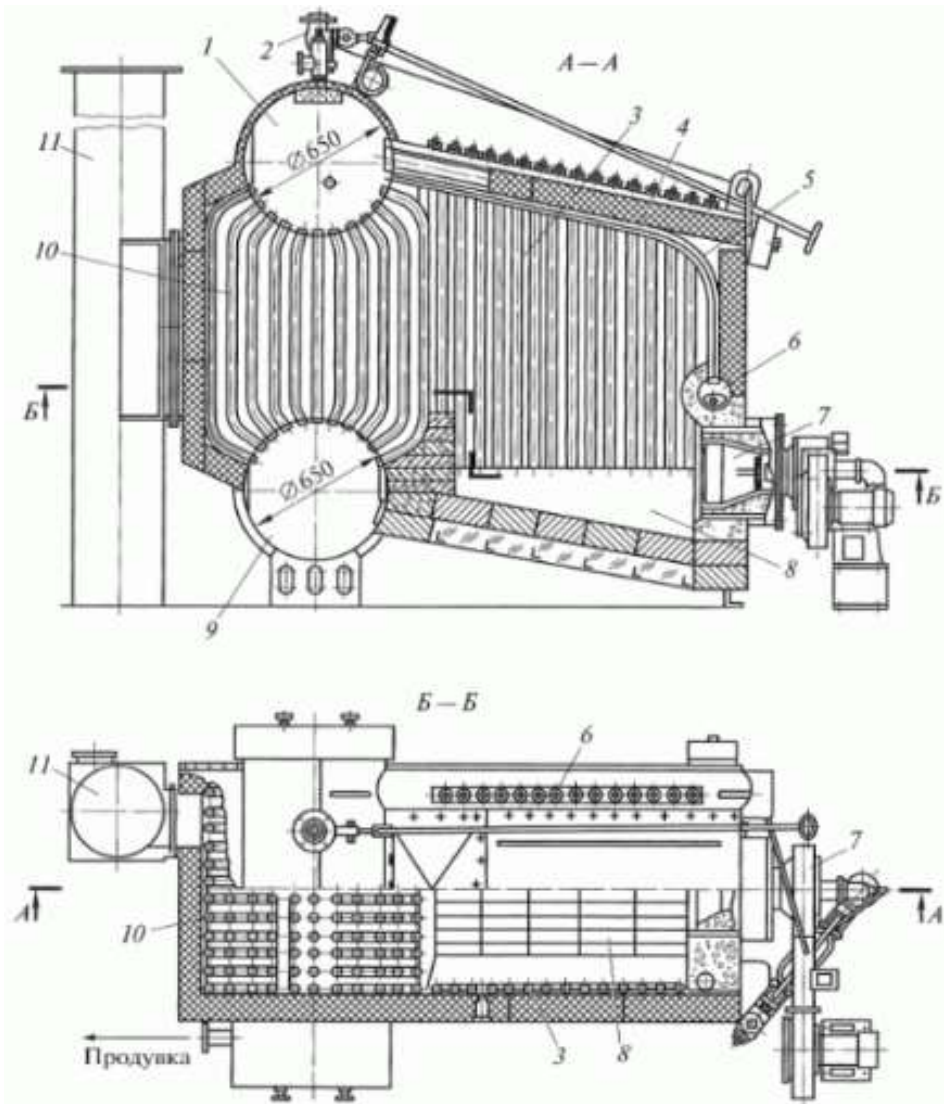


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд барабанного котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ:  
 1 – верхній барабан; 2 – головний паровий вентиль; 3 – бічний екран; 4 – даховий екран; 5 – фронтальний екран; 6 – колектор; 7 – пальник; 8 – комірня топка; 9 – нижній барабан; 10 – котельний пучок (кип'ятильні труби); 11 – димова труба



а)



б)

Рис. 1.7. Зовнішній вигляд котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ  
(ЕнергоМетМаш, Черкаська обл.) (а) та його котельний пучок (б)

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ [24]

Показник	Е-2,5-0,9 ГМ	Е-2,5-0,9 ГМН (із наддувом)
Номінальна паропроductивність, т/год.	2,5	
Робочий тиск на виході, МПа (кгм/см <sup>2</sup> )	0,9 (9,0)	
Розрахункове паливо	Газ (Г), мазут (М)	
Розрахункова витрата палива	(М) 190 кг/год. (Г) 210 м <sup>3</sup> /год.	(М) 186 кг/год. (Г) 220 м <sup>3</sup> /год.
Температура насиченої пари на виході, (основний режим), °С	190	
Розрахункова температура живильної води, °С	50	
Вологість насиченої пари, %	3,0	
ККД, %	89 (мазут) 91 (газ)	88 (мазут) 89,5 (газ)
Об'єм води у котлі, м <sup>3</sup>	2,68	2,52
Повна поверхня нагріву, м <sup>2</sup>	80,13	
Розрідження (-), тиск (+) у топці, Па	(- 30,0), (+500)	
Температура газів на виході з топки, °С	225	235
Температура зовнішньої поверхні котлоагрегату, °С	50	
Маса котлоагрегату, м	8100	6400

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРОВОГО КОТЛОАГРЕГАТУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

#### 2.1. Параметричний аналіз котлоагрегату як об'єкта автоматизації

Як було зазначено, різноманітність конструкцій котлоагрегатів не дозволяє створити єдину універсальну систему автоматичного керування їх роботою. Однак для барабанних парових котлів із природною циркуляцією можна виділити певні загальні потоки, які є характерними для цих котлів, визначити основні канали керування і відокремити їх як окремі одно-контурні системи.

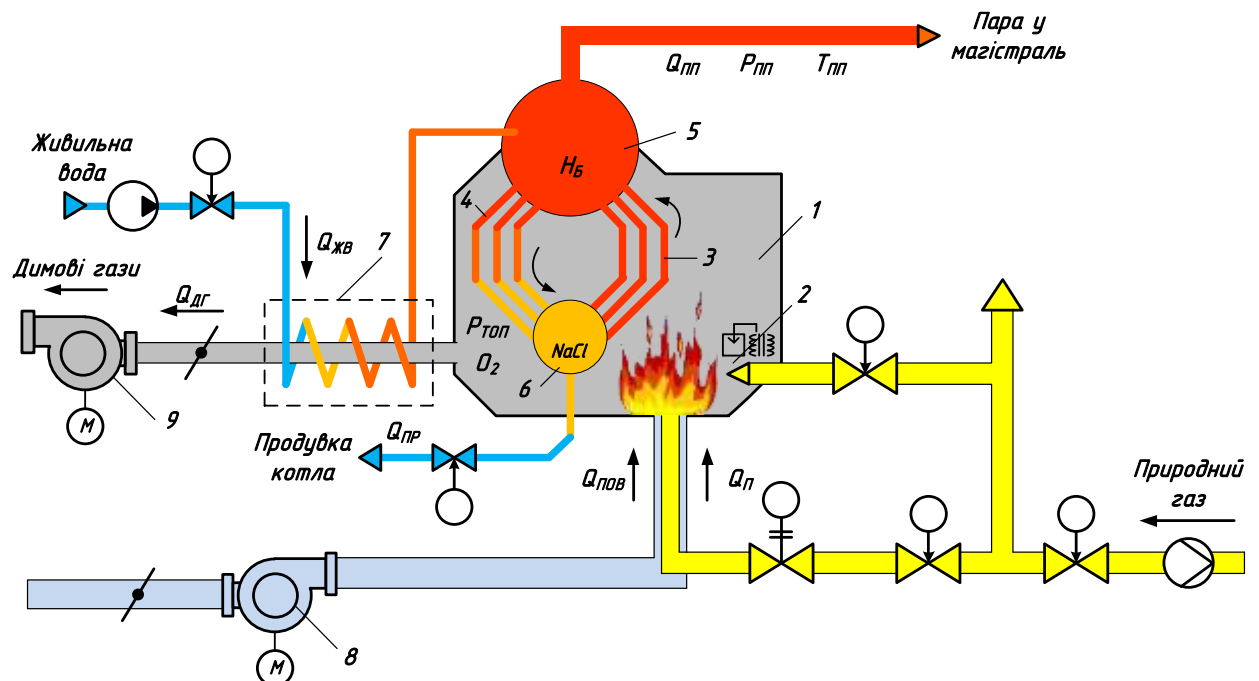


Рис. 2.1. Технологічна схема барабанного котлоагрегату:

1 – топка; 2 – пальник; 3 – піднімальні труби; 4 – опускні труби; 5 – верхній барабан котла; 6 – нижній барабан (колектор); 7 – економайзер; 8 – дутьовий вентилятор подачі повітря; 9 – димосос

Розглянемо основні ділянки керування барабанним паровим котлоагрегатом, спрощена технологічна схема якого наведена на рис. 2.1.

Циркуляційний контур (котельний пучок) парового котлоагрегату складається із верхнього барабану 5, нижнього барабану 6, піднімальних труб 3 та опускних труб 4.

Процес паротворення відбувається в піднімальних трубах 3 за рахунок підведення тепла від високотемпературного пальника 2, яке виділяється при спалюванні палива у топці 1 котлоагрегату.

Для підтримки процесу горіння в топці створюється повітряно-газова суміш, для чого за допомогою дутьового вентилятора 8 подається повітря із витратою  $Q_{ПОВ}$ , а також через регулюючий клапан природній газ із витратою  $Q_{П}$ . Продукти згорання (димові гази), що утворилися у процесі горіння, відсмоктуються із топки димососом 9 із витратою  $Q_{ДГ}$ , створюючи у топці розрідження  $P_{ТОП}$ , проходять економайзер 7, і через димову трубу виділяються у навколишнє середовище. Рівень спалювання природнього газу (ефективність процесу горіння у топці) характеризується кількістю вільного кисню  $O_2$  у димових газах.

Живильна вода із витратою  $Q_{ЖВ}$  надходить у водяний економайзер 7, в якому нагрівається за рахунок випромінювання та конвекційного теплообміну від димових газів до певної температури, і направляється до верхнього барабану котла 5. Разом із живильною водою у циркуляційний контур котлоагрегату надходять солі  $NaCl$ . Частина солей, що накопичуються в котловій воді, видаляється безперервною продувкою із витратою  $Q_{ПР}$ .

Основними регульованими величинами котла є витрата перегрітої пари  $Q_{ПП}$ , її тиск  $P_{ПП}$  і температура  $T_{ПП}$ . Перегріта пара направляється споживачеві, який може змінювати її витрату. Отже змінною величиною для котлоагрегату є витрата пари, а її тиск і температура повинні підтримуватися у межах допустимих відхилень, які визначаються відповідно до вимог заданого режиму роботи споживача теплової енергії.

Задане значення температури пари  $T_{III}$  може бути отримане за рахунок підвищення або зменшення температури горіння у топці (збільшення або зменшення подачі природнього газу). У котлоагрегатах середньої та великої потужності це відбувається за допомогою встановлення пароперегрівачів та пароохолодників.

Тиск перегрітої пари  $P_{III}$  і тиск у барабані котла  $P_B$  змінюються в усіх випадках виникнення дисбалансу між кількістю спожитої пари, і пари, що генерується в піднімальних трубах, і може підтримуватись за рахунок зміни тепловиділення у топці, тобто за рахунок зміни подачі палива.

Крім підтримки зазначених витрат перегрітої пари і заданих значень  $P_{III}$  та  $T_{III}$ , слід підтримувати у межах допустимих відхилень: рівень води у барабані котла  $H_B$ , розрідження у топці  $P_{ТОП}$ , солеміст котлової води, а також оптимальне співвідношення "природній газ-повітря" для максимальної продуктивності роботи пальника.

Перераховані вище величини змінюються в результаті регулюючих впливів і під дією зовнішніх та внутрішніх збурень, що носять закономірний або випадковий характер, таких як коливання витрати пари, якості і витрати палива, температура живильної води, порушення щільності топки і т.п. З цього випливає, що паровий котел як об'єкт керування в цілому являє собою складну динамічну систему з цілим рядом взаємозалежних вхідних і вихідних величин (рис. 2.2).

Складність взаємозв'язків полягає у тому, що деякі вхідні величини, прямо впливаючи на вихідні величини, побічно впливають на інші вихідні параметри. Цей непрямий вплив буває важко врахувати. Наприклад, зміна витрати палива  $Q_{II}$  прямо (суцільна лінія) впливає на витрату перегрітої пари  $Q_{III}$  і у той же час впливає на вміст вільного кисню в димових газах  $O_2$  і тиск перегрітої пари  $P_{III}$ ; витрати води, що подається в барабан котла прямо впливає на температуру перегрітої пари  $T_{III}$ , на яку також впливає витрата пари з барабана котла і розрідження в топці  $P_{ТОП}$ ; витрати перегрітої пари  $Q_{III}$ , будучи вихідною величиною стосовно витрати палива  $Q_{II}$ , служить вхідною

величиною (впливом) стосовно тиску  $P_{III}$  і температури  $T_{III}$  перегрітої пари [8,16].

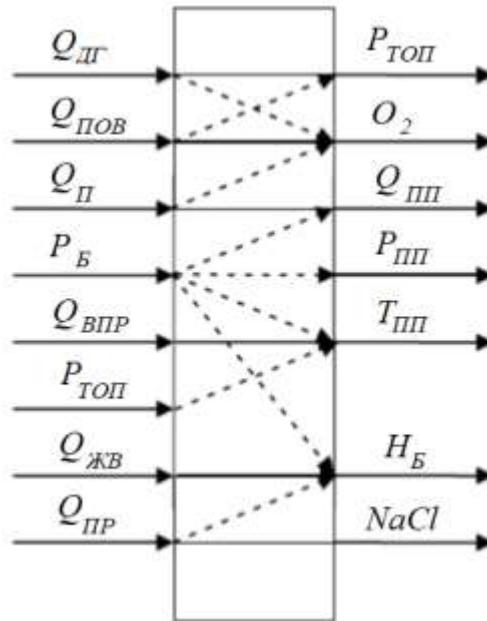


Рис. 2.2. Параметрична схема взаємозв'язків між вихідними та вхідними величинами барабанного котлоагрегату

Однак явна виражена спрямованість ділянок регулювання котла за основними каналами регулюючих впливів, таких як витрата живильної води  $Q_{ЖВ} \rightarrow$  рівень води в барабані  $H_Б$ , витрата палива  $Q_П \rightarrow$  тиск перегрітої пари  $P_{III}$ , дозволяє здійснювати стабілізацію регульованих величин за допомогою незалежних одноконтурних систем, зв'язаних лише через об'єкт керування. При цьому регулюючий вплив тієї або іншої ділянки (суцільні лінії на рис. 2.2) служить основним способом стабілізації регульованої величини, а інші впливи (пунктирні лінії) є стосовно цієї ділянки внутрішніми або зовнішніми збурюваннями.

## 2.2. Розробка та дослідження математичної моделі теплових процесів у котлоагрегаті для виробництва пари

Складемо математичну модель теплових процесів, що відбуваються в котлоагрегаті при виробництві пари. За законом збереження енергії відповідно зі схемою теплових потоків (рис. 2.3), рівняння енергетичного балансу в котлоагрегаті має наступний вигляд

$$Q_g - Q_{hv} + Q_{gp} - Q_{dg} - Q_k - Q_{vt} - Q_{him} = 0 \quad (2.1)$$

де  $Q_g$  – кількість теплоти, яка утворюється при згоранні газу, Вт;

$Q_{gp}$  – кількість теплоти, що міститься у парі при 150°C, Вт;

$Q_{hv}$  – кількість теплоти у воді після економайзера на вході в котлоагрегат при 70°C, Вт;

$Q_{dg}$  – кількість теплоти, що виводиться із топки із димовими газами, Вт;

$Q_k$  – теплова енергія, що знаходиться у котлоагрегаті, Дж;

$Q_{vt}$  – втрати теплової енергії з котла у навколишнє середовище, Вт;

$Q_{him}$  – втрати теплової енергії від хімічного не догорання, Вт.

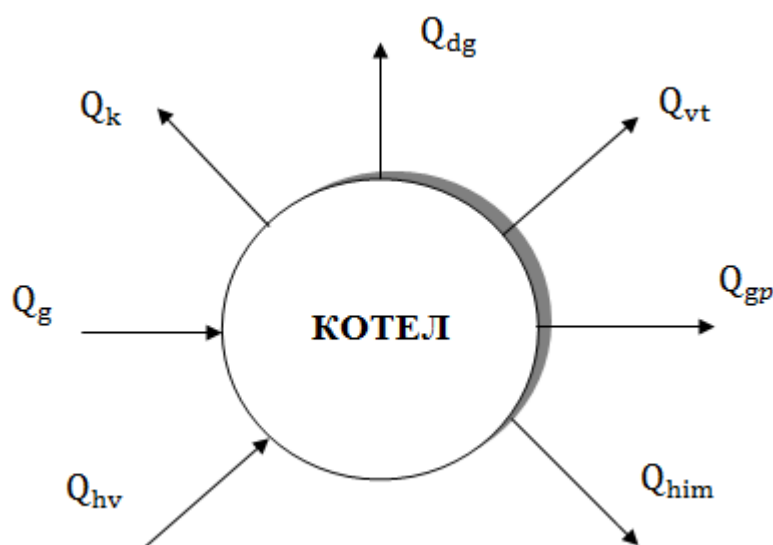


Рис. 2.3. Структурна схема теплових потоків в котлоагрегаті

При згоранні природного газу в топці котлоагрегату отримується наступна кількість теплоти, Вт

$$Q_g = \frac{G_g}{\rho_g} \cdot q_g, \quad (2.2)$$

де  $G_g$  – витрати природного газу, кг/с;

$q_g$  – питома теплота згорання природного газу, Дж/м<sup>3</sup>;

$\rho_g$  – густина природного газу, кг/м<sup>3</sup>;

Теплота пари на виході з котлоагрегату, Вт, дорівнює

$$Q_{gp} = G_{gp} \cdot t_{gp} \cdot C_{gp}, \quad (2.3)$$

де  $G_{gp}$  – фактична продуктивність котлоагрегату, або кількість пари, що через парову магістраль забирає споживач, кг/с;

$t_{gp}$  – температура пари на виході котлоагрегату, °С;

$C_{gp}$  – теплоємність пари при 200°С, Дж/(кг·°С);

Кількість теплоти, яка міститься у холодній на вході водяного тракту парового котлоагрегату після економайзера, Вт, визначається як

$$Q_{hv} = G_{hv} \cdot t_{hv} \cdot C_{hv}, \quad (2.4)$$

де  $G_{hv}$  – витрати води, що живить паровий котел, кг/с;

$t_{hv}$  – температура води на виході економайзера, °С (приймається значення 70°С);

$C_{hv}$  – теплоємність води при 70°С, Дж/(кг·°С).

Кількість теплоти, що виводиться із топки котлоагрегату з димовими газами у навколишнє середовище, Вт, визначається за виразом

$$Q_{dg} = (G_{pov} + G_g) \cdot t_{dg} \cdot C_{dg}, \quad (2.5)$$

де  $G_{pov}$  – витрати повітря, необхідні для повного згорання газу, кг/с;

$G_g$  – витрати газу при згоранні в пальнику, кг/с;

$t_{dg}$  – температура димових газів, що видаляються димососом при створенні розрідження в котлоагрегаті, °С;

$C_{dg}$  – теплоємність димових газів, Дж/(кг·°С).

Кількість енергії, що знаходиться у котлі, Дж:

$$Q_k = V_k \cdot \rho_{gv} \cdot C_{gp} \cdot t_{gp}, \quad (2.6)$$

де  $V_k$  – об'єм котла, м<sup>3</sup>;

$\rho_{gp}$  – густина пари, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість теплоти, яка недоотримується при хімічному неповному згоранні природного газу, Вт

$$Q_{vt} = Q_g \cdot k_n, \quad (2.7)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт хімічного не догорання природного газу.

Кількість теплоти, що втрачається у навколишнє середовище, Вт:

$$Q_{vt} = Q_g \cdot k_n, \quad (2.8)$$

де  $k_{zov}$  – коефіцієнт втрат у навколишнє середовище.

Від моделювання статичного режиму переходимо до динамічного режиму, коли температура пари на виході котлоагрегату буде змінюватись під дією різних збурень. Рівняння (2.1) набуде такого вигляду

$$\frac{dQ_k}{d\tau} = Q_g - Q_{hv} + Q_{gp} - Q_{dg} - Q_{vt} - Q_{him}, \quad (2.9)$$

Підставивши у вираз (2.9) рівняння (2.2) – (2.8), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{dV_k \cdot \rho_{gv} \cdot C_{gv} \cdot t_{gv}}{d\tau} = & \frac{G_g}{\rho_g} \cdot q_g - G_{hv} \cdot t_{hv} \cdot C_{hv} + G_{gv} \cdot t_{gv} \cdot C_{gv} - \\ & - (G_{pov} + G_g) \cdot t_{dg} \cdot C_{dg} - Q_g \cdot k_n - Q_g \cdot k_h, \end{aligned} \quad (2.10)$$

Після перетворень вираз (2.10) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{V_k \cdot \rho_{gv} \cdot C_{gv}}{G_{gv} (C_{gv} + (G_{pov} + G_g)) \cdot C_{dg}} \cdot \frac{dt_{gv}}{d\tau} + t_{gv} \\ & \frac{\frac{G_g}{\rho_g} \cdot q_g \cdot (1 - k_n - k_h) + G_{gv} \cdot t_{hv} \cdot C_{hv} + G_g (1 + k_{pov}) \cdot C_{dg} \cdot \Delta t_{gv}}{G_{gv} \cdot C_{gv} + (G_{pov} + G_g) \cdot C_{dg}} = 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Позначимо постійну часу нагрівання як

$$T = \frac{V_k \cdot \rho_{gv} \cdot C_{gv}}{G_{gv}(C_{gv} + (G_{pov} + G_g)) \cdot C_{dg}}. \quad (2.12)$$

За допомогою наведених рівнянь у пакеті Simulink середовища MATLAB створена імітаційна модель теплових процесів в котлоагрегаті (рис.2.4).

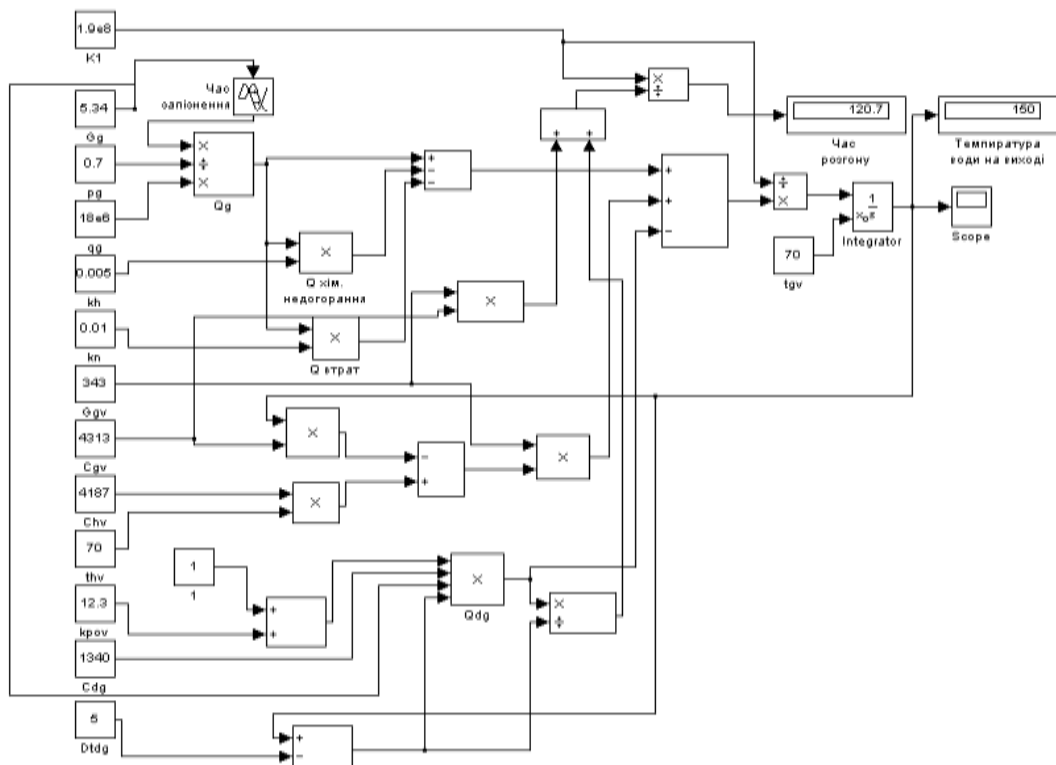


Рис. 2.4. Імітаційна модель теплових процесів у котлоагрегаті

Визначимо такі параметри передатної функції котлоагрегату для каналу керування температурою пари на виході котлоагрегату, як час транспортного запізнення  $\tau_{oy}$ , коефіцієнт передачі  $k_{oy}$  та постійна часу об'єкта  $T_{oy}$ .

Для визначення передатної функції теплиці для каналу керування температурним режимом був використаний графічний метод. Для цього розгінна характеристика була пронормована за виразом

$$h(t_i) = \frac{\theta_B(t_i) - \theta_B(0)}{\theta_B(t_{\max}) - \theta_B(0)} = \frac{\theta_B(t_i) - 180}{191 - 180} \quad (2.13)$$

де  $\theta_B(t_i)$  – проміжне значення параметра в  $i$ -й момент часу  $t_i$ ;  $\theta_B(0)$  – початкове значення параметра;  $\theta_B(t_{\max})$  – кінцеве значення параметра в усталеному режимі;  $h(t_i)$  – значення нормованої кривої розгону в  $i$ -й момент часу.

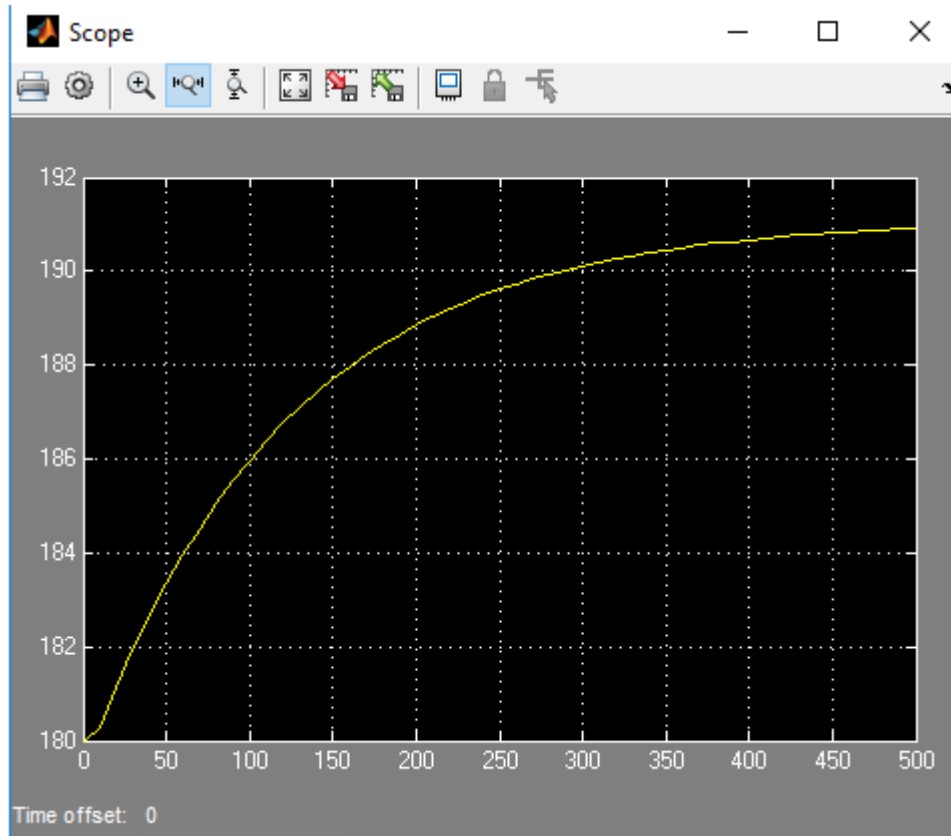


Рис. 2.5. Розгінна характеристика котлоагрегату для каналу керування температурою пари на виході котлоагрегату

Коефіцієнт передачі об'єкта розраховується як відношення різниці температури пари на виході з котлоагрегату і температури води на вході в котлоагрегат після економайзера  $\Delta t$  (регульований параметр) до витрат природного газу на нагрівання води до пароподібного стану  $\Delta G_g$  (параметр керування)

$$k = \frac{\Delta t}{\Delta G_g}. \quad (2.14)$$

За виразом (2.14), враховуючи технічні характеристики котлоагрегату (таблиця 1.1), отримаємо, що  $k = (190-50)/210 = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{м}^3/\text{кг})$ .

Чисельне значення постійної часу  $T_{ov}$  та часу запізнення  $\tau_{ov}$  об'єкта знаходять за допомогою дотичної, яку проводять до точки перегину розгінної характеристики (рис. 2.6). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

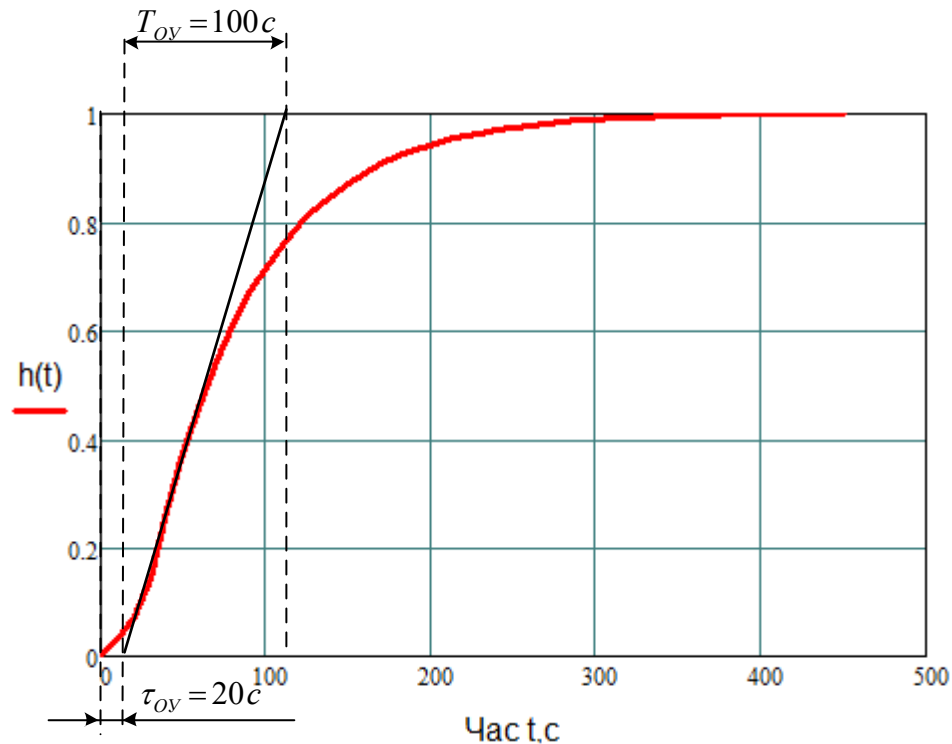


Рис. 2.6. Нормована розгінна характеристика котлоагрегату

Передатна функція котлоагрегату для каналу керування температурою пари на виході котлоагрегату має вигляд

$$W_{ov}(s) = \frac{0,67 \cdot e^{-20 \cdot s}}{100 \cdot s + 1} \quad (2.15)$$

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

#### 3.1. Функціональна схема автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом

Функціональна схема автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом зображена на рис. 3.1. Як буде далі показано, у системі керування використовується програмований логічний контролер (ПЛК) Simatic S7-300 фірми Siemens (згідно із завданням на магістерську роботу), який виконує функції керування основними контурами, позначеними для зручності сприйняття окремими регуляторами (UIRC (4-1), UIRC (4-2), PIC (3-3) та PIC (2-4)).

Вона складається з таких основних контурів керування:

1. **Контур керування живленням котлоагрегату.** Робота контуру основана на рівні води у верхньому барабані та тиску перегрітої пари на виході котлоагрегату, тобто на рівні споживання пари споживачем. Рівень води в барабані котлоагрегату вимірюється датчиками LE (1-1) (верхній рівень) та LE (2-1) (нижній рівень), вихідний сигнал яких подається на ПЛК (його частина UIRC (4-1)). Вимір тиску перегрітої пари на виході з котлоагрегату у магістраль для корекції здійснюється за допомогою датчика тиску PE (3-1). Вихідний сигнал ПЛК подається через комутуючу апаратуру NS (6-1) із можливістю ручного керування HS (5-1) на електромагнітний клапан подачі живильної води на котлоагрегат.

2. **Контур керування тепловим навантаженням котлоагрегату**, який працює по температурі перегрітої пари на виході з котлоагрегату, по тиску пари в барабані котла із корекцією по витраті газу на котел. Температура пари вимірюється датчиком температури TE (1-2), тиск пари у барабані котлоагрегату вимірюється датчиком тиску PE (2-2), а витрати природного газу вимірюються витратоміром FE (3-2), вихідні сигнали яких надходять до ПЛК (його частина UIRC (4-2)). Вихідний сигнал ПЛК подається через комутуючу апаратуру NS (6-2) із можливістю ручного керування HS (5-2) на сервопривод регулюючого клапану, який змінює подачу природного газу як палива в котлоагрегат.

3. **Контур керування співвідношенням "газ/повітря"** працює по тиску повітря на пальник. Тиск природного газу вимірюється датчиком тиску PE (1-3), тиск повітря, відповідно, датчиком PE (2-3). Вихідні сигнали цих датчиків передаються на ПЛК (його частина PIC (3-3)). Контролер формує керуючий сигнал для перетворювача частоти SIC (4-3), який плавно змінює частоту обертання валу електродвигуна приводу дутьового вентилятора, і відповідно тиск повітря на пальник.

4. **Контур керування розрідженням у топці котлоагрегату**. Розрідження вимірюється датчиком тиску (тягиапороміром) PE (1-4), вихідний сигнал якого подається на ПЛК (його частина PIC (2-4)). Контролер формує керуючий сигнал для перетворювача частоти SIC (3-4), який плавно змінює частоту обертання валу електродвигуна приводу димососа, і відповідно розрідження у топці котлоагрегату.

Для обліку матеріальних ресурсів схемою передбачене встановлення витратомірів живильної води котлоагрегату FE (1-5) та природнього газу FE (1-6).

Контури керування пальником і продувкою котла на даній схемі не показані.

### 3.2. Вибір алгоритму керування

Для визначення алгоритму керування визначимо динамічні властивості об'єкта та показники якості, які повинні бути забезпечені по технологічним вимогам.

Алгоритм керування вибирають за величиною відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$  [11]:

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 0,2$ , перевагу віддають позиційному (релейному)

алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

- якщо  $0,2 < \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 1,0$ , перевагу віддають неперервному або

цифровому алгоритму керування (П-, ПП- або ППД-алгоритм керування)

- якщо  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} > 1,0$ , вибирають спеціальний цифровий регулятор з

екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Крім того, для обґрунтування алгоритму керування і вибору регулятора, який реалізує такий алгоритм, необхідно знати не тільки властивості об'єкта та вимоги до технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Промислові регулятори реалізують алгоритм керування з певною похибкою, що обов'язково повинно враховуватись при виборі усіх технічних засобів, що входять до складу системи автоматичного керування.

В даному випадку за отриманою передатною функцією (2.15)

$$\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} = \frac{20}{100} = 0,2.$$

За вказаною методикою необхідно обрати неперервний алгоритм керування. Крім того, необхідно врахувати особливості роботи пальника і топки котлоагрегату: запуск пальника займає певний час, і при використанні позиційного алгоритму керування можуть виникнути значні коливання температури пари, коливання тиску в барабані котла, і неможливо буде швидко реагувати на різкі зміни витрат пари споживачем. Це вказує на те, що топка повинна працювати неперервно, і алгоритм керування виконавчим механізмом повинен бути неперервним.

Методика вибору найкращого алгоритму керування для певного об'єкта полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання.

Для статичних об'єктів:

$$R_d = \frac{y_1}{K_{OY} \cdot y_{МАКС}}, \quad (3.1)$$

де  $K_{OY}$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$y_{МАКС}$  – макс. допустиме збурення по навантаженню, в % ходу РО;

$y_1$  – максимальне динамічне відхилення, %.

Проведемо розрахунки за умов наступних значень показників якості:

- максимальне динамічне відхилення  $y_1 = 1,5\%$ ;
- статична похибка  $\Delta y = 2,0^\circ\text{C}$ ;
- допустимий час регулювання  $t_p = 500$  с;
- перерегулювання за збуренням  $\sigma = 0,2$ ;
- допустиме можливе значення збурення за навантаженням (у %

переміщення регульовального органу)  $y_{МАКС} = 20\%$ .

За вихідними значеннями величина динамічного коефіцієнту

$$R_d = \frac{1,5}{0,67 \cdot 20} = 0,12.$$

Вибираємо для даного об'єкта перехідний процес із 20% перерегулюванням.

За графічними залежностями [11] (Додаток А1), визначаємо алгоритм керування – це ІІІ-алгоритм.

Перевіримо, чи забезпечуватиметься при цьому необхідний час регулювання за виразом

$$t = \psi \cdot \tau, \quad (3.2)$$

де  $\psi$  - відносний час регулювання, для статичного об'єкту із ПІ-алгоритмом керування  $\psi = 12$  (Додаток А2).

Тоді  $t_{P,II} = \psi \cdot \tau = 12 \cdot 20 = 240$ , видно, що  $240 < 500$ , тобто необхідний час регулювання забезпечується.

Перевіримо на виникнення при цьому статичної похибки.

За графічними залежностями [11], визначаємо

$$\frac{\Delta y}{k_{OY} \cdot y_{МАКС}} = 0,14, \quad \Delta y = k_{OY} \cdot y_{МАКС} \cdot 0,14 = 0,67 \cdot 20 \cdot 0,14 = 1,876^\circ C. \quad (3.3)$$

Умова  $1,876^\circ C < 2,0^\circ C$  виконується, тобто ПІ-алгоритм керування задовольняє технологічні вимоги до процесу керування температурою перегрітої пари в котлоагрегаті.

### 3.3. Реалізація алгоритму керування

Згідно із функціональною схемою автоматизації (рис. 3.1), система керування котлоагрегатом складається з програмованого логічного контролера (ПЛК), який виконує функції керування різними контурами в залежності від інформації від різноманітних датчиків технологічного процесу виробництва пари, різних виконавчих механізмів, а також електрообладнання для керування цими виконавчими механізмами.

Детальний вибір електрообладнання для пуску та захисту виконавчих механізмів, комутації кіл керування, ручного керування та світлової сигналізації розглядається у розділі 5 магістерської роботи, а вибір програмованого логічного контролера, датчика температури та виконавчого механізму (регулюючого клапану) викладений у подальшому матеріалі.

### 3.3.1. Вибір програмованого логічного контролера

Для отримання інформації про параметри технологічного процесу виробництва пари в барабанному котлоагрегаті та керування технологічним обладнанням згідно із завданням на виконання магістерської роботи обраний програмований логічний контролер Siemens Simatic S7-300 з центральним процесором CPU 313C №6ES7 332-5HD01-0AB0 (рис. 3.2, а).

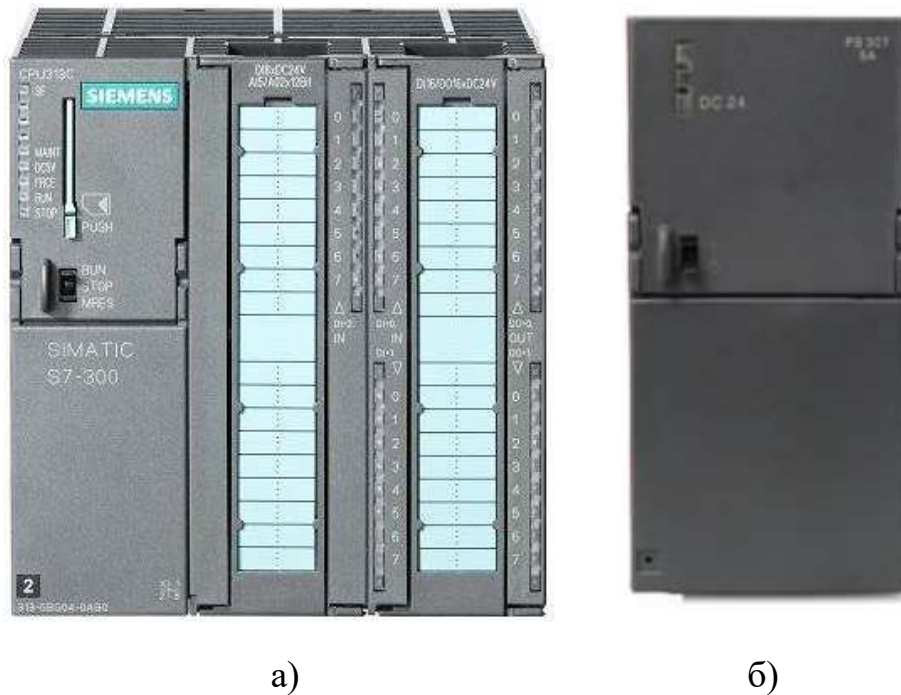


Рис. 3.2. Загальний вигляд програмованого контролера Siemens Simatic S7-300 з центральним процесором CPU 313C №6ES7 332-5HD01-0AB0 (а) та стабілізованого джерела живлення модульного типу PS307 5A (б)

Для живлення програмованого контролера необхідно встановити додатковий блок живлення на 24 В. Обираємо модульний блок живлення PS307 на 5А (рис. 3.2, б).

Контролер Siemens Simatic S7-300 – це універсальний модульний програмований контролер для вирішення задач автоматичного керування низького та середнього ступеня складності. Ефективному використанню контролерів сприяє наявність широкої гама центральних процесорів, модулів

вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів, функціональних і комутаційних модулів, модулів блоків живлення та інтерфейсних модулів [25].

***Області використання контролерів Siemens Simatic S7-300:***

- автоматизація систем автоматичного регулювання та позиціонування;
- автоматизовані вимірювальні установки;
- в автомобільній промисловості та станкобудуванні;
- автоматизація текстильних і пакувальних машин;
- автоматизація машинобудувального обладнання;
- автоматизація обладнання для виробництва технічних засобів управління та електротехнічної апаратури;
- для керування конвеєрами;
- в переробній промисловості;
- у системах управління громадським транспортом;
- у системах матеріально-технічного забезпечення.

***Конструкція контролерів Siemens Simatic S7-300.***

Контролери Siemens Simatic S7-300 мають модульну конструкцію, що дозволяє використовувати у своєму складі наступні пристрої.

*Модуль центрального процесора (CPU)* – виконання програм користувача та керування усіма вузлами контролера.

*Модуль блоку живлення (PS)* забезпечує живлення контролера від мережі змінного струму напругою 120/230 В або від джерела постійного струму напругою 24/48/60/110 В.

*Сигнальні модулі (SM)* забезпечують ввід-виведення дискретних і аналогових сигналів із різними електричними та часовими параметрами.

*Комунікаційні процесори (CP)* забезпечують підключення контролера до мереж PROFIBUS, PROFINET, Industrial Ethernet, AS-Interface, організації зв'язку через Internet або PtP (point to point) інтерфейс.

*Функціональні модулі (FM)* здатні самостійно вирішувати задачі автоматичного регулювання, позиціонування, зважування, швидкісної

обробки сигналів і т.п., оснащені вбудованим мікропроцесором і здатні виконувати покладені на них функції навіть у випадку зупинки центрального процесора програмованого контролера.

*Інтерфейсні модулі (ІМ)* забезпечують можливість підключення до базового блоку (CPU) однієї або декількох стійок розширення вводу-виведення.

*Модулі спеціального призначення:* імітаційний SM 374 – для формування вхідних та відображення вихідних дискретних сигналів на етапі налагодження прикладних програм і для перевірки працездатності контролера при експлуатації; DM 370 для резервування місця під сигнальний модуль із ще невизначеними параметрами.

Контролери Siemens Simatic S7-300 дозволяють використовувати у своєму складі до 32 сигнальних і функціональних модулів, а також комунікаційних процесорів, розподілених по 4 монтажним стійкам. Усі модулі працюють із природним охолодженням. Програмовані контролери не підтримують функцію "гарячої" заміни модулів.

#### ***Система вводу-виведення даних.***

Система вводу-виведення програмованого контролера Simatic S7-300 може містити у своєму складі дві частини: систему локального і систему розподіленого вводу-виведення. Система локального вводу-виведення утворюється модулями, що встановлюються безпосередньо у монтажні стійки контролера. Система розподіленого вводу-виведення складається зі станції розподіленого вводу-виведення та приладів польового рівня, що підключаються до контролера через мережі PROFINET IO, PROFIBUS DP и AS-Interface.

#### **Система локального вводу-виведення:**

- в залежності від типу CPU система може містити до 8 або до 32 сигнальних, функціональних та комутаційних модулів;
- усі модулі встановлюються у монтажні стійки контролера, функції яких виконують профільні шини S7-300;

- до складу системи можуть входити один базовий блок із центральним процесором і до трьох стійок розширення, до складу яких можуть входити до 8 модулів;
- інтерфейсні модулі забезпечують з'єднання стійок між собою;
- відстань між стійками може досягати до 10 м (при використанні інтерфейсних модулів IM360 та IM361).

Система розподіленого вводу-виведення. Для реалізації широких комунікаційних можливостей контролери S7-300 оснащуються:

- комунікаційними процесорами (CP) для підключення до мереж PROFIBUS, PROFINET/Industrial Ethernet та AS-Interface, а також до Internet і для організації послідовних каналів зв'язку RS-232, TTY, RS-422/RS-485 через PtP-інтерфейс;
- MPI-інтерфейсом, вбудованим у кожний центральний процесор, для зв'язку з програматорами, персональними та промисловими комп'ютерами, пристроями людино-машинного інтерфейсу та іншими системами;
- додатковими вбудованими у центральний процесор інтерфейсами PtP, PROFIBUS DP або Industrial Ethernet.

#### ***Можливості контролерів Simatic S7-300.***

- Функції, що підтримуються контролерами, істотно спрощують процеси розробки і відлагодження прикладних програм, діагностики та пошуку несправностей та при експлуатації готової системи автоматизації.
- Висока швидкодія та підтримка математичних операцій для ефективної обробки даних.
- Автоматичний обмін даними між операційною системою контролера та приладами, система людино-машинного інтерфейсу із використанням загальної бази проекту.
- Неперервний моніторинг системи для виявлення помилок та відмов за допомогою діагн. функцій, вбудованих в операційну систему CPU.

Окрім ПЛК Siemens Simatic S7-300, для створення системи керування котлоагрегатом також необхідно використати наступне обладнання:

- блок живлення: PS 405/407/6ES7407-0KA02-0AA0 вихід 24В/10А;
- комунікаційний модуль IM153-1 6ES7153-1AA03-0XB0 (рис. 3.3) , для підключення модулів UC0 S7-300 через інтерфейс PROFIBUS-DP.
- карта пам'яті: S7-300/карта пам'яті/FLASH-EPROM/ 6ES7952-1KM00-0AA0, 4МБайт для S7-300/400.

Для вводу 7 аналогових сигналів будемо використовувати 1 модуль: на 8-м входів: SIMATIC S7-300, SM 331, модуль вводу аналогових сигналів (6ES7331-7KF02-0AB0) 8 входів  $\pm 5\text{В}/\pm 10\text{В}/1\dots 5\text{В}/\pm 20\text{ма}/0(4)\dots 20\text{ма}$ , 16 біт.

Для виводу 4-х аналогових сигналів виберемо модуль SIMATIC S7-300, SM 332, модуль виводу аналогових сигналів: гальванічне розділення зовнішніх та внутрішніх ланцюгів, 4 виходи U/I; (6ES7332-5HD01-0AB0).

Для підключення вхідних-вихідних дискретних сигналів з урахуванням використання в схемах проміжних реле (24В) вибираємо модуль: 6ES7 323-1BH01-0AA0 SIMATIC S7-300, SM 323, модуль вводу-виводу дискретних сигналів: гальванічне розділення зовнішніх та внутрішніх ланцюгів, 8 входів 24В та 8 виходів 24В/0,5А, сумарний вихідний струм 4А.

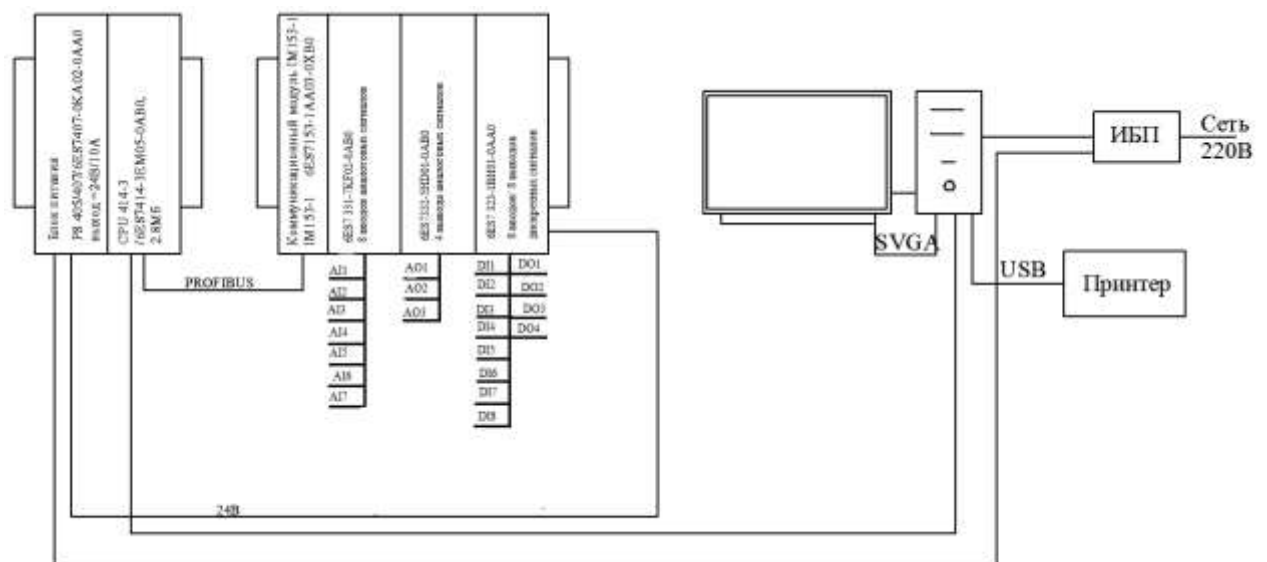


Рис. 3.3. Структурна схема системи керування на базі SIMATIC S7-300/400

### 3.3.2. Обґрунтування вибору датчика температури

Вибір датчика температури перегрітої пари на виході котлоагрегату для системи керування проводимо за методикою [11].

Так, за технічними характеристиками котлоагрегату Е-2,5-0,9 ГМ робоча температура насиченої пари на виході з котлоагрегату повинна складати 190°C (таблиця 1.1, розділ 1).

Для того, щоб датчик у процесі вимірювання температури на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання, його постійна часу  $T_{CE}$  повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта  $T_{OY}$ .

Постійна часу котлоагрегату для каналу керування  $T_{OY} = 100$ с. З огляду на сказане, постійна часу датчика повинна бути не більше 10 с.



Рис. 3.4. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом  
Siemens Simatic S7-300

Враховуючи вимоги за діапазоном вимірювання та інерційністю, а також особливості підключення датчиків температури до програмованих логічних контролерів Siemens Simatic S7-300, для вимірювання температури пари на виході котлоагрегату обраний термоперетворювач опору

загальнопромислового виконання Siemens Sitrans TS500-3G (рис. 3.4), технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.1.

Датчик Siemens Sitrans TS500-3G широко використовується у хімічній, нафтохімічній промисловості, в енергетиці, у системах водопідготовки та водовідведення.

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом Siemens Sitrans TS500-3G призначені для неперервного перетворювання температури різних середовищ у пропорційний струмовий сигнал 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в головку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 4-20 мА та термозонду.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики термоперетворювача Siemens Sitrans TS500-3G [26]

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур, °С	-30...+400
Показник теплової інерції, с	7
Клас допуску за ДСТУ 6651	А,В,С
Номінальна статична характеристика (НСХ)	Pt100
Клас точності	0,25%, (Pt100)
Кількість чутливих елементів, шт.	1
Схема внутрішніх з'єднань провідників	двохпровідна, трьохпровідна, чотирьохпровідна
Матеріал захисної арматури	сталь 12х1810Т
Ступінь захисту	IP54, IP67

Вимірюваний параметр – температура – лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який, в свою чергу, перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий вихідний сигнал.

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою, передатна

функція якого має вигляд  $W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}$ .

Коефіцієнт передачі  $k_{CE}$  (чутливість), визначається за формулою

$$k_{CE} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{400 - (-30)} = 0,037 \text{ mA}/^{\circ}\text{C} \quad (3.4)$$

де  $\Delta T$  – різниця значень вимірюваних датчиком температур,  $^{\circ}\text{C}$  (таблиця 3.1);

$\Delta I$  – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА;

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає 7 с (таблиця 3.1), передатна функція датчика Siemens Sitrans TS500-3G

$$W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} = \frac{0,037}{7 \cdot s + 1} \quad (3.5)$$

### 3.3.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму САК температурою пари на виході котлоагрегату

Регулюючим органом і виконавчим механізмом САК температурою пари на виході котлоагрегату є відповідно регулюючий клапан зміни подачі газу і сервопривод, який обертає цей клапан.

Регулюючий орган – один із самих відповідальних елементів САК (від його працездатності багато в чому залежать надійність системи в цілому і надійність регулювання), безпосередньо діючих на об'єкт управління.

Вихідними даними для вибору регулюючого органу (РО) є:

$\gamma = 1 \text{ г/см}^3$  – об'ємна маса газоподібного палива;

$\nu = 0,2$  – в'язкість палива;

$Q_{\max} = 100 \text{ м}^3/\text{год.}$ ,  $Q_{\min} = 20 \text{ м}^3/\text{год.}$  – максимальна та мінімальна об'ємна витрати палива;

$P_1 = 15 \text{ кг/см}^2$  – абсолютний тиск в системі постачання палива до РО;

$\Delta P_c = 10 \text{ кг/см}^2$  – перепад тиску в системі;

$\Delta P_{L \max} = 4 \text{ кг/см}^2$  – максимальний перепад тиску в лінії.

Під час вибору регулюючих органів є певна послідовність розрахунків:

1. Обчислюють максимальну пропускну здатність регулюючого органу та його умовний діаметр.
2. Визначають робочий відрізок витратної характеристики.
3. Знаходять теоретичну витратну характеристику (для клапанів).
4. Визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пари знаходять максимальний та мінімальний перепади тиску).

Обчислюємо максимальну пропускну здатність РО:

$$K_{\gamma \max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\min}}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{л \max}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{10-4}} = 41 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (3.6)$$

Регулювальний орган вибирають за умови, що

$$K_{\gamma} \succ 1,2 \cdot K_{\gamma \max} \quad (3.7)$$

Тоді  $K_{\gamma} \geq 1,2 \cdot K_{\gamma \max} = 1,2 \cdot 41 = 49,2 \text{ м}^3/\text{год.}$

Таблиця 3.2.

Формули для розрахунку пропускну здатності [11]

Вид гідравлічного опору	Перепад тиску	Витрата		
		рідини Q	газу G	пари G
ВП	$\Delta P < P_1/2$	$K_{\gamma} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P \cdot P_2 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\Delta P}}$
	$\Delta P \geq P_1/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma} = \frac{G}{22,4} \cdot \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$
Лінія	$\Delta P_{л} < P_2/2$	$K_{\gamma л} = Q \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{л}}}$	$K_{\gamma л} = \frac{G}{514} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\Delta P_{л} \cdot P_3 \cdot \gamma_n}}$	$K_{\gamma л} = \frac{G}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{V_3}{\Delta P_{л}}}$
	$\Delta P_{л} \geq P_2/2$		$K_{\gamma} = \frac{G}{257 \cdot P_2} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{\gamma_n}}$	$K_{\gamma л} = \frac{G}{2,4} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_2}}$

За довідниковими даними [11] вибираємо регулювальний клапан з умовним діаметром  $D_y = 50 \text{ мм}$  і пропускну здатністю  $K_{\gamma \text{ РО}} = 50 \text{ м}^3/\text{год.}$

В якості регулюючого елемента в клапані, зазвичай, застосовується або шток спеціальної конструкції, який може рухатися у вертикальному напрямку, або куля чи заслінка яка може повертатися навколо осі. При цьому регулюючий елемент не здійснює повне перекриття клапана, а перерозподіляє потоки рідин, тим самим виробляючи їх змішування.

Поправки на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$z = 420 \cdot \frac{Q_{\max}}{\nu \cdot \sqrt{K_{\gamma \max}}} = 420 \cdot \frac{100}{0,2 \cdot \sqrt{41}} = 32813 > 1000. \quad (3.8)$$

Знаходимо робочу ділянку витратної характеристики вибраного регулюючого органу. Для цього скористуємось виразом з таблиці 3.4:

$$K_{\gamma,л} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{л \max}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.9)$$

Визначаємо відношення перепаду тиску на РО при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = \frac{K_{\gamma \text{РО}}}{K_{\gamma,л}} = \frac{50}{50} = 1. \quad (3.10)$$

Уточнюємо перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{\text{ВП}} = \frac{\Delta P_{\text{С}}}{1+n^2} = \frac{10}{1+1^2} = 5 \text{ кгс/см}^2. \quad (3.11)$$

Визначаємо витрату рідини через виконавчий пристрій в разі перепаду тиску на ньому:

$$Q_{\text{ВП}} = K_{\gamma \text{РО}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ВП}}}{\gamma}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{5}{1}} = 112 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.12)$$

Знаходимо відносну максимальну та мінімальну витрату рідини:

$$\mu_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{ВП}}} = \frac{100}{112} = 0,89; \quad \mu_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{ВП}}} = \frac{20}{158} = 0,18. \quad (3.13)$$

За графіком (додаток Б1) вибираємо витратну характеристику ВМ, згідно якої відносний хід затвора регулювального органу (плунжера):

$$l_{\min}=0,12; \quad l_{\max}=0,8.$$

При цьому відношення перепаду тиску на РО до перепаду тиску в системі змінюється від  $\beta_{\max}=0,95$  до  $\beta_{\min}=0,68$  (додаток Б2), що відповідає наступним перепадам:

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_c}; \beta_{\min} = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P_c}. \quad (3.14)$$

Потім розраховуємо значення:

$$\Delta P_{\max} = \beta_{\max} \cdot \Delta P_c = 0,95 \cdot 10 = 9,5 \text{ кг/см}^2; \quad (3.15)$$

$$\Delta P_{\min} = \beta_{\min} \cdot \Delta P_c = 0,68 \cdot 10 = 6,8 \text{ кг/см}^2. \quad (3.16)$$

Таким чином, після розрахунку необхідного регулюючого органу, отримуємо дані для вибору виконавчого механізму.

**Вибір виконавчого механізму САК температурою пари на виході котлоагрегату.** Виконавчим механізмом (ВМ) називається пристрій автоматики, який діє безпосередньо або через погоджуючі елементи на регулюючий орган об'єкта управління. ВМ, як частина системи автоматичного керування, призначений для відпрацювання управляючого сигналу, який формується управляючими елементами автоматики таким чином, щоб відхилення регулюючої величини від заданого значення становило якнайменше значення. Виконавчі механізми, які з'єднані безпосередньо з регулюючими органами, переміщують їх відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує алгоритм керування.

До ВМ пред'являють ряд вимог:

- здатність розвивати необхідне переставне зусилля або момент, достатні для перестановки регулюючого органу об'єкта,
- забезпечити перестановку регулюючого органу на потрібну величину,
- забезпечити потрібну швидкість і прискорення переміщення регулюючого органу,
- мати високі техніко-економічні показники (надійність, ціна та ін.).

ВМ обираються залежно від величини обертового моменту необхідного для переміщення регулюючого органу [11]:

$$M_3 = k \cdot (M_p + M_m), \quad (3.17)$$

де  $M_p$  – реактивний момент:

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^3 = 0.07 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^3 \approx 0.83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = 0.785 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^2 \cdot r_m \cdot \lambda = 0.785 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \approx 0.28 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_3 = 2 \cdot (0.83 + 0.28) = 2.22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент обертання валу обраного виконавчого механізму повинен бути більшим за момент, необхідний для обертання заслінки:  $M_H > M_3$ .

В якості електроприводу, яким комплектується регулюючий клапан, виступає сервопривод, побудований на електродвигуні невеликої потужності і системі передач.

Для приводу клапана обраний сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TPC (рис. 3.5), що за технічними характеристиками задовольняє зазначені умови.

Передатна функція виконавчого механізму (сервоприводу) є інтегруючою ланкою

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{s}, \quad (3.18)$$

де  $k_{BM}$  - коефіцієнт передачі виконавчого механізму, град./с.;

$$k_{BM} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (3.19)$$

$\Delta t$  - проміжок часу, с;

$\Delta\varphi_{OB}$  - кут повороту вихідного валу за проміжок часу  $\Delta t$ , град.

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики сервоприводу BELIMO LM24A-SZ-TPC [27]

Тип	Максимальний момент навантаження, Н·м	Час повного ходу, сек/90°	Температура навколишнього середовища, °С	Ступінь захисту	Маса, кг
LM24A	10	58	0...+60	IP65	3,5



Рис. 3.5. Виконавчий механізм - сервопривод BELIMO LM24A-SZ-TRC

Напруга живлення 24 В.

$$k_{BM} = \frac{90}{58} = 1,56 \frac{\text{град}}{\text{сек}}$$

$$W_{BM}(s) = \frac{1,56}{s}$$

Оскільки конструктивно у сервоприводі реалізований зворотний зв'язок за положенням (реостатний датчик положення), то остаточна передатна функція виконавчого механізму визначається як

$$W_{BM}(s) = \frac{W_{CEEP}(s)}{1 + W_{CEEP}(s)} = \frac{\frac{1,56}{s}}{1 + \frac{1,56}{s}} = \frac{1,56}{s + 1,56} = \frac{1}{\frac{1}{1,56} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,64 \cdot s + 1}$$

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.

Цифрові системи керування передбачають перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють аналогово-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. У таких перетворювачах здійснюється квантування як за часом так і за рівнем.

#### 4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального періоду квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає завантаження мікроЕОМ масивами інформації. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування  $T_k$ , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова, для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати  $2\omega_c$ , де  $\omega_c$  – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $\omega_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом  $T_k = \pi/\omega_c$ .

При подальших розрахунках нехтуємо передатною функцією виконавчого механізму внаслідок його малої інерційності.

Визначення передатної функції неперервної частини розімкнутої системи

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \cdot \frac{k_{OY}}{T_{OY} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{k_{CE} \cdot k_{OY} \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot s^2 + (T_{CE} + T_{OY}) \cdot s + 1} \quad (4.1)$$

$$W_{PO3}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{W_{PO3}^{HЧ}(s)}{1 + W_{PO3}^{HЧ}(s)} \quad (4.2)$$

$$W_{3AM}^{HЧ}(s) = \frac{0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}{(700 \cdot s^2 + 107 \cdot s + 1) + 0,024 \cdot e^{-20 \cdot s}}.$$

У результаті розв'язання рівняння

$$\frac{k_{CE} \cdot k_{OY}}{\sqrt{(-T_{CE} \cdot T_{OY} \cdot \omega^2 + 1 + k_{CE} k_{OY})^2 + (T_{CE} \cdot T_{OY})^2 \cdot \omega^2}} = 0,01 \cdot A(\omega = 0). \quad (4.3)$$

отримаємо в кінцевому рахунку час квантування.

Скориставшись математичним пакетом Mathcad, отримаємо значення частоти (рис. 4.1) та періоду квантування.



## 4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування

Аналогічно з неперервними системами, в цифрових системах можна реалізувати ПІ-алгоритм керування (рис 4.2).

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів  $K_p, K_i$ .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю  $K_v$  неперервної частини, визначається за виразом

$$K_i = \frac{K_v}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)} \quad (4.5)$$

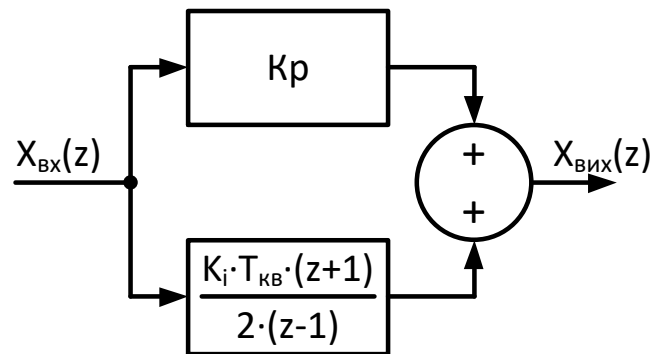


Рис. 4.2. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора:  
 $K_p, K_i$  – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора,  $T_{кв}$  – період квантування

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Визначення добротності за швидкістю

$T_o, c$	$K_v$
~1	3...10
~10	0,3...1
~100	0,01...0,04
~1000	0,004...0,012

Згідно з таблицею  $K_v = 0,025$ , оскільки  $T_{oy} = 100$  с.

Для визначення передатної функції  $W_{н.ч.}(z)$  застосовуємо пакет імітаційного моделювання MATLAB (Лістинг 4.1), використовуючи операції завдання передатної функції неперервної системи  $w=tf([K_o],[T_b \cdot T_o \ T_b + T_o \ 1])$  та Z-перетворення неперервної передатної функції на дискретну  $Wz=c2d(w,T_k)$ , де  $w$  – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції,  $T_k$  – період квантування.

```
>> Wou=tf([0.67],[100 1],'OutputDelay',20)

Transfer function:
      0.67
exp(-20*s) * ----
      100 s + 1

>> Wce=tf([0.037],[7 1])

Transfer function:
      0.037
-----
      7 s + 1

>> W=Wou*Wce

Transfer function:
      0.02479
exp(-20*s) * ----
      700 s^2 + 107 s + 1

>> Wz=c2d(W,8.468)

Transfer function:
0.0002933 z^2 + 0.03046 z + 0.008044
-----
      z^3 - 0.8239 z^2 + 0.04038 z

Sampling time: 8.468
```

Лістинг 4.1. Z-перетворення неперервної частини розімкненої САК у  
MATLAB

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу  $CE$ , оскільки ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини:

```

>> Wou=tf([0.67],[100 1])

Transfer function:
    0.67
-----
 100 s + 1

>> Wouz=c2d(Wou,8.468)

Transfer function:
    0.0544
-----
z - 0.9188

Sampling time: 8.468

```

Лістинг 4.2. Поліус Z-перетворення неперервної частини,  
що компенсується регулятором у MATLAB

Тоді

$$K_i := \frac{0.025}{\left( \frac{0.0002933 \cdot 1^2 + 0.03046 \cdot 1 + 0.008044}{1^3 - 0.8239 \cdot 1^2 + 0.04038 \cdot 1} \right)} = 0.179$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати поліус Z-перетворення неперервної частини системи.

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{PI}}(z) &= \frac{K_i \times T z + 1}{2} \frac{1}{z - 1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z - 2} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z - 1)} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

```

Kp := 1

Given

(Ki*Ts - 2*Kp) / (Ki*Ts + 2*Kp) = -0.7716

Find(Kp) = 16.357

```

Лістинг 4.3. Знаходження параметра  $K_p$  цифрового ПІ-регулятора  
у пакеті Mathcad

Для дослідження показників якості роботи цифрової системи використана модель у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink (рис. 4.3) та отримуємо перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором (рис. 4.4).

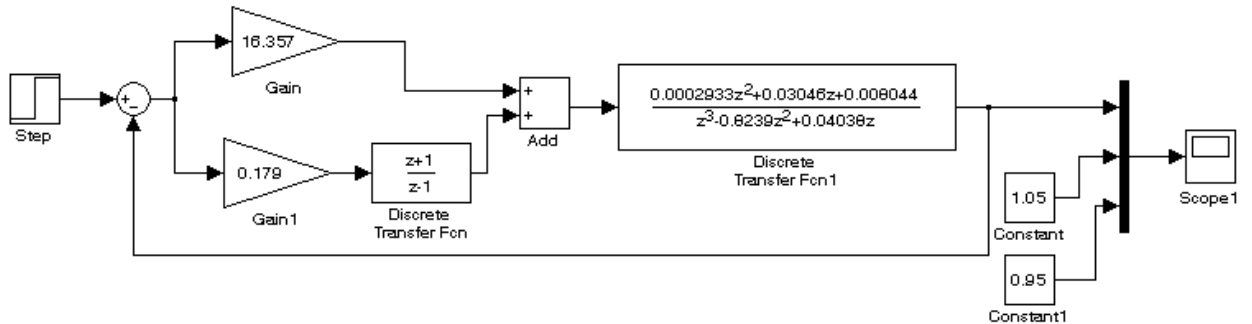


Рис. 4.3. Структурно-алгоритмічна схема цифрової системи керування температурою пари у пакеті імітаційного моделювання MATLAB/Simulink

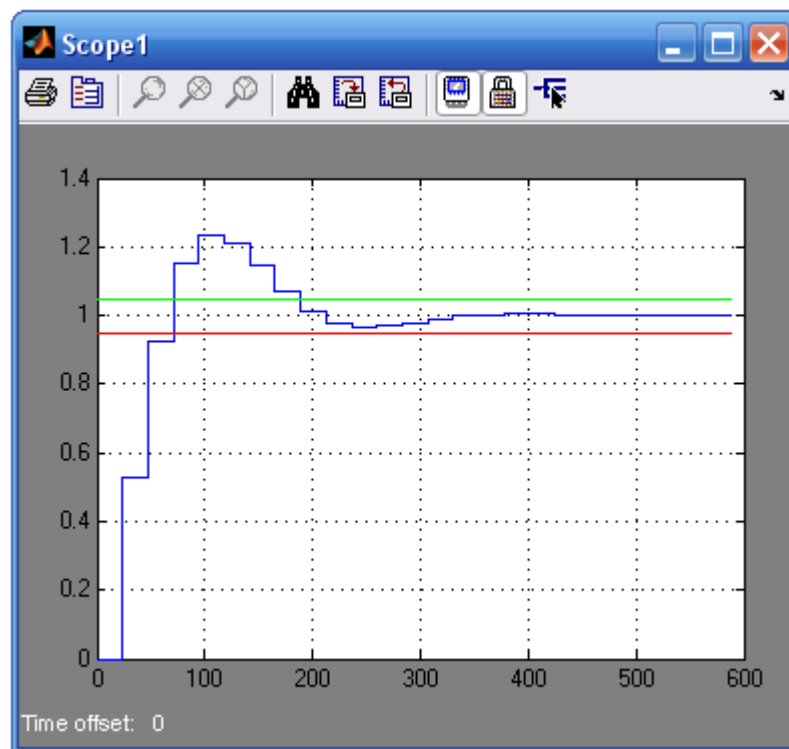


Рис. 4.4. Перехідний процес цифрової САК температурою пари на виході котлоагрегату

За характером перехідного процесу видно, що система є стійкою із наступними показниками якості роботи:

- час регулювання  $t_p = 177$  с;
- перерегулювання  $\sigma = 22\%$ ;
- коливальність  $n=1$ ;
- відсутня статична похибка.

Отримані показники задовольняють технологічні вимоги до процесу керування температурою насиченої пари на виході котлоагрегату.

## РОЗДІЛ 5

### СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

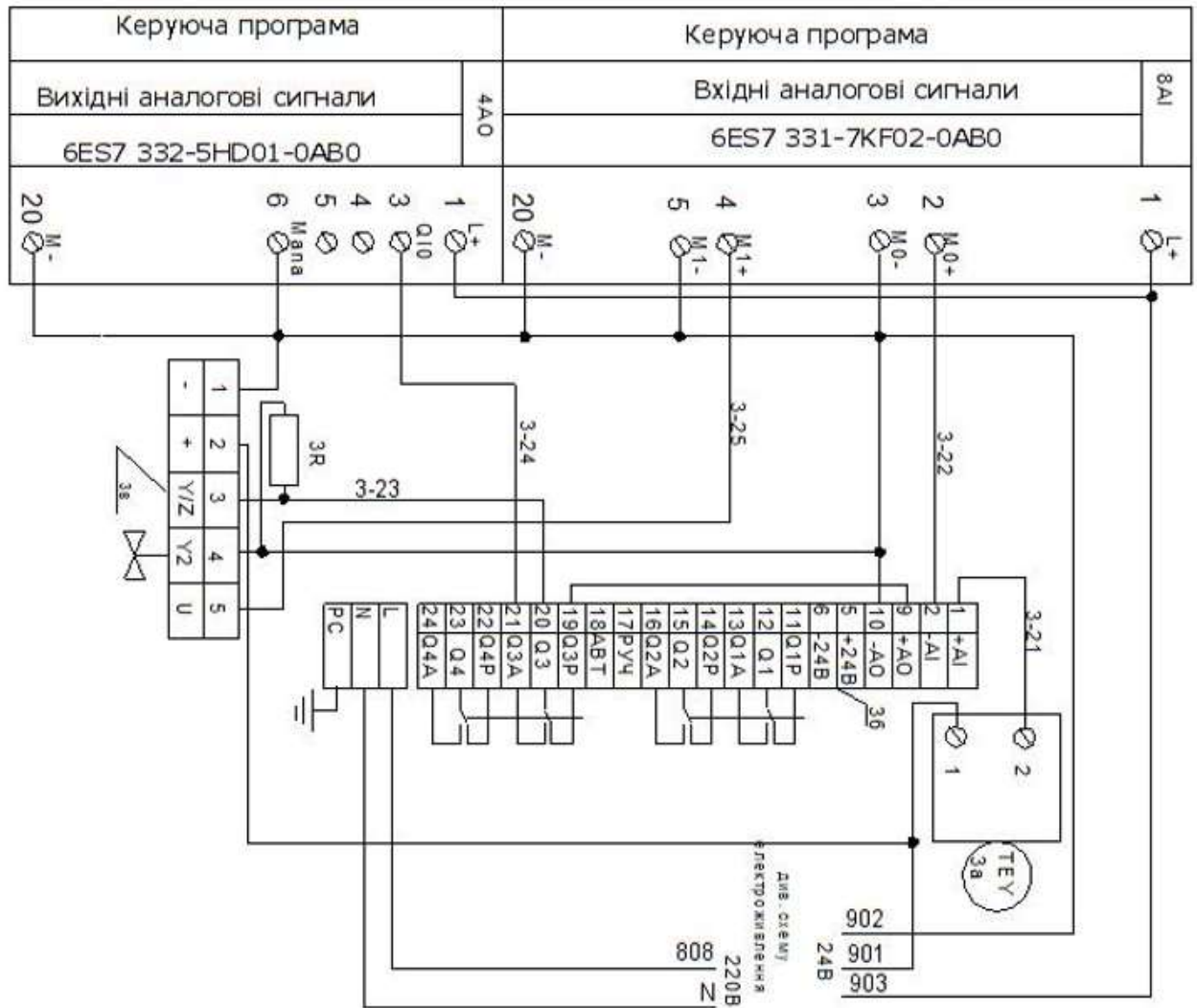
#### 5.1. Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ

Схема електрична принципова системи автоматичного керування паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ зображена на рис. 5.1 – 5.5, а також додатках В.1 та В.2. Вона розбита для зручності на схеми керування технологічним обладнанням за основними контурами керування.

Розглянемо частину принципової схеми керування (рис. 5.1) температурою в топці котлоагрегату. На схемі показане підключення аналогового сигналу датчика температури Siemens Sitrans TS500-3G (датчика За на схемі). При реалізації введення аналогового сигналу використаний принцип струмової петлі, тобто "+" від датчика За (провід 3-21) підключений до клеми "1" (+AI) БРУ-7 для відображення поточного значення на цифровому міліамперметрі, який вбудований в БРУ, із клеми 2 (-AI) проводом 3-22 сигнал подається на аналоговий вхід (M0+) модуля SM331, а замикається петля з'єднанням аналогового виходу модуля SM332 з "-" джерела живлення проводом 902.

Вихідний аналоговий сигнал подається від клем QI0+ та man-a- модуля SM332 проводами 7-24 через контакти "21", "20" поступає на дрот 3-23 (в автоматичному режимі) та по ньому на клему 3 (Y/Z) і 902 («-») на клему 1 («-») виконавчого механізму BELIMO LM24A-SZ-TPC, що забезпечує управління ВМ 7в, аналогічно в дистанційному режимі аналоговий сигнал подається від ручного задавача БРУ-7 від кл.9 через контакти, що переключають (кл.15 та 14), при цьому кл. 10 з'єднана з загальним «-» схеми (дрот 902). Для живлення ВМ на його клему 2«+» підключений дрот 901. Для перетворення сигналу, що управляє 4-20 мА, який виходить з МПК та БРУ, у

сигнал 0-10В, який ВМ приймає як вхідний (управляючий) використаний опір 3R (500 Ом).



Клапан регулюючий з ВМ Belimo LV24A-SZ-TPC		Блок ручного управління БРУ-7 (с КБЗ -24 - 19)				Датчик температури 4...20мА
Управління	Положення ВМ	Формування сигналу руч-авт	Вибір режиму	Формування завдання	Візуальний контроль	Контроль температури в топці
Стабілізація температури в топці						

Рис. 5.1. Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (керування температурою в топці)

Схема електрична принципова системи керування розрідженням в топці котлоагрегату зображена на рис. 5.2. Система керування дутьовим вентилятором із частотним перетворювачем побудована аналогічно.

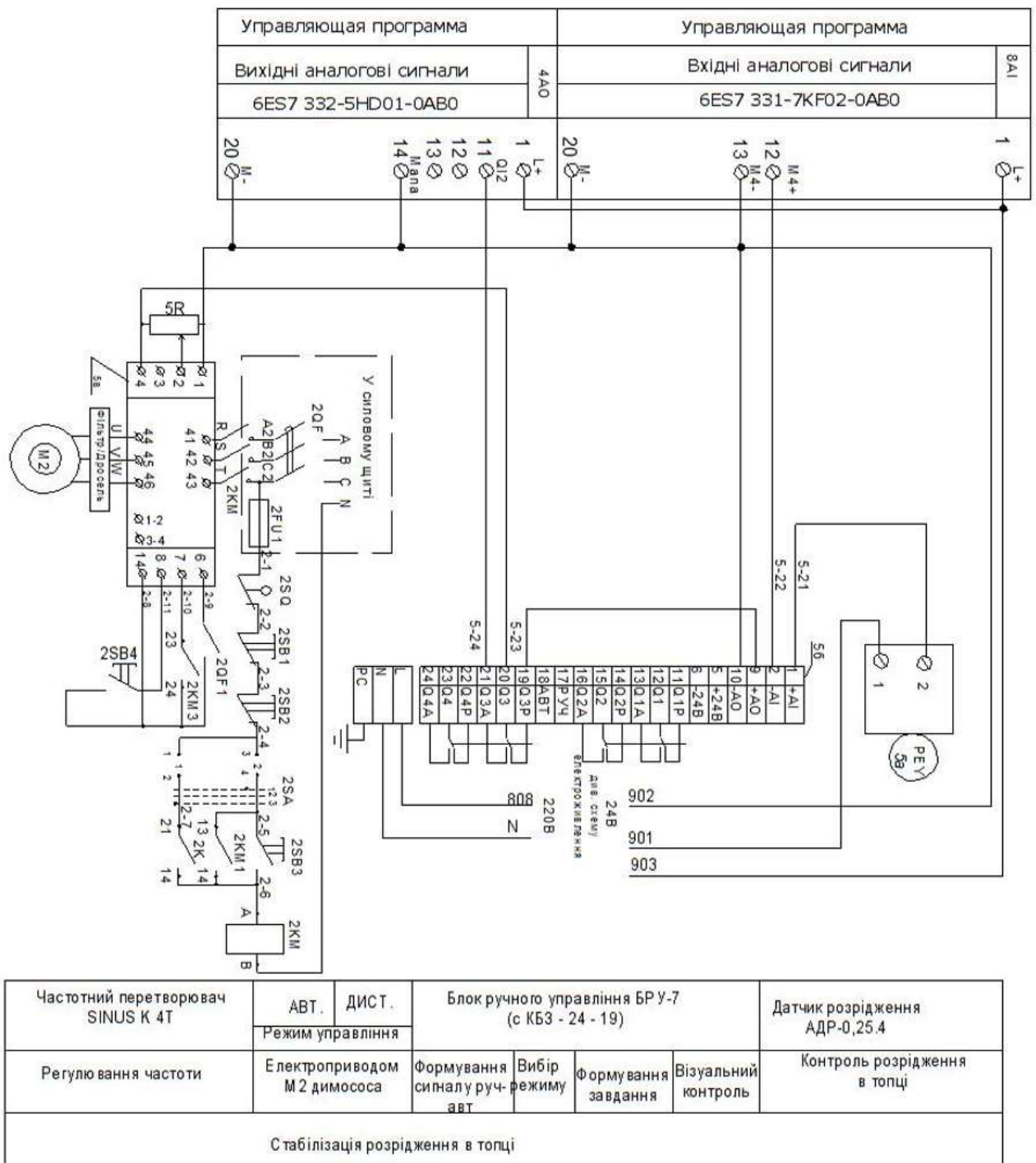


Рис. 5.2. Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (керування розрідженнями в топці)

Схема електрична принципова системи керування рівнем води у верхньому барабані котлоагрегату зображена на рис. 5.3.

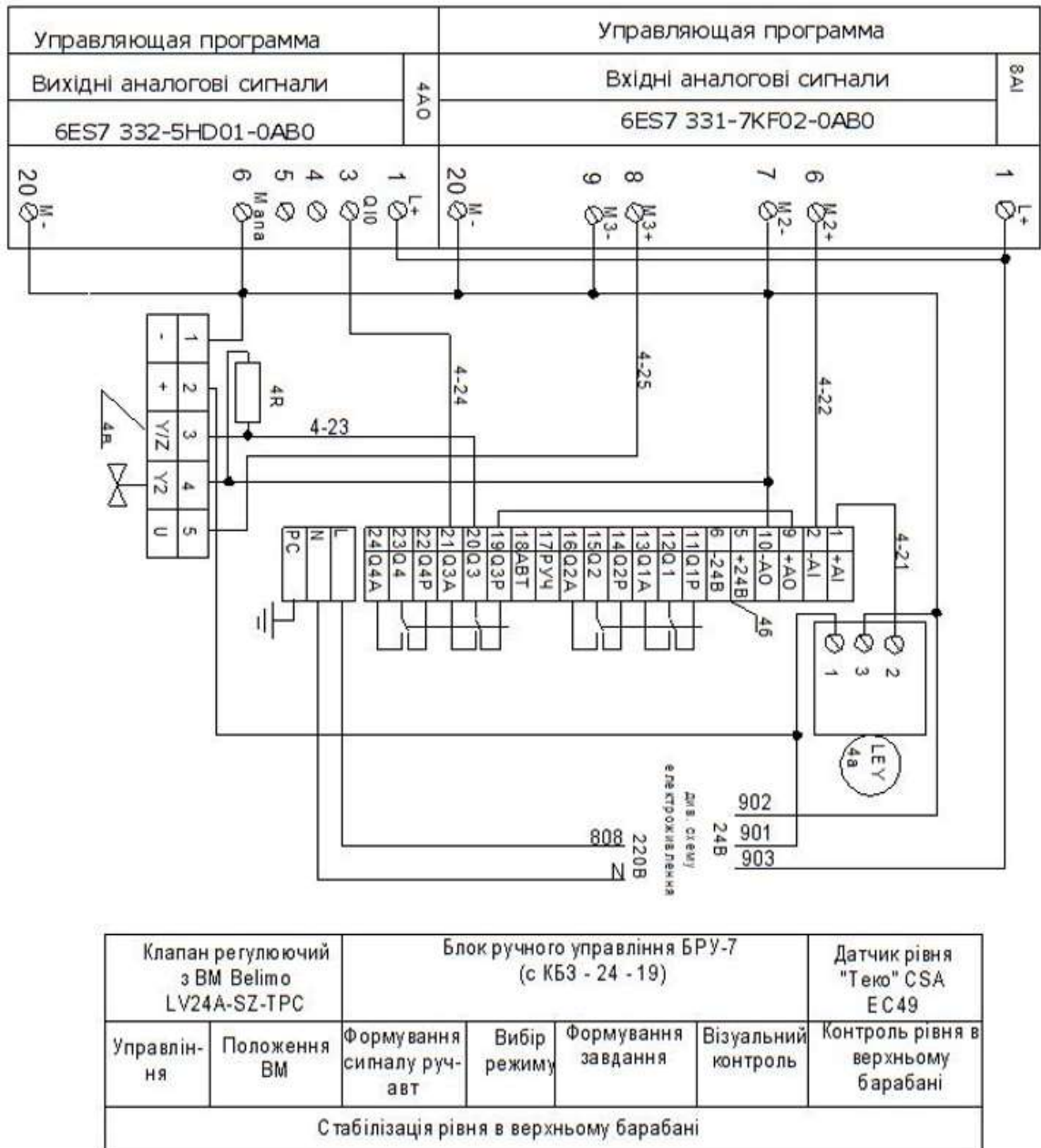


Рис. 5.3. Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (керування рівнем води у верхньому барабані котла)

Як було зазначено при описі функціональної схеми автоматизації системи керування (п.п. 3.1), для обліку матеріальних ресурсів в системі також передбачене встановлення двох витратомірів – живильної води котлоагрегату та природнього газу. На рис. 5.4 зображена схема електрична принципова підключення зазначених витратомірів до системи керування.

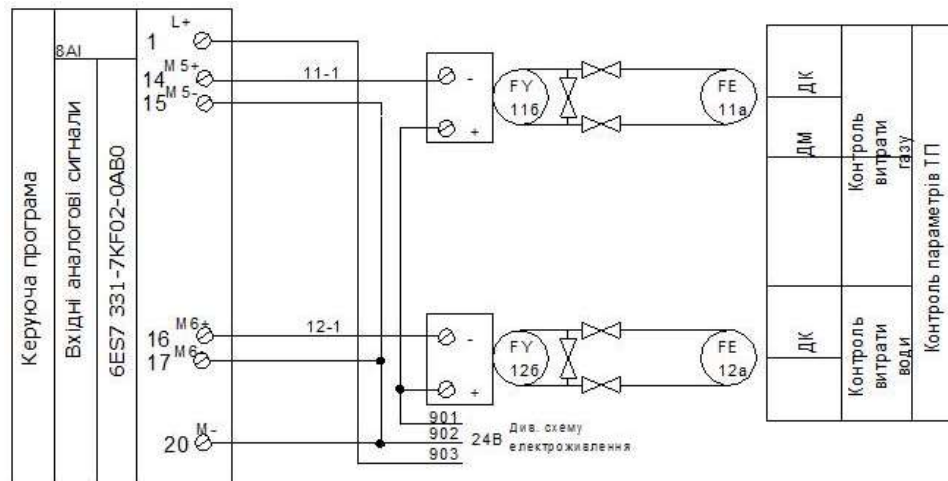


Рис. 5.4. Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (підключення витратомірів живильної води та природнього газу)

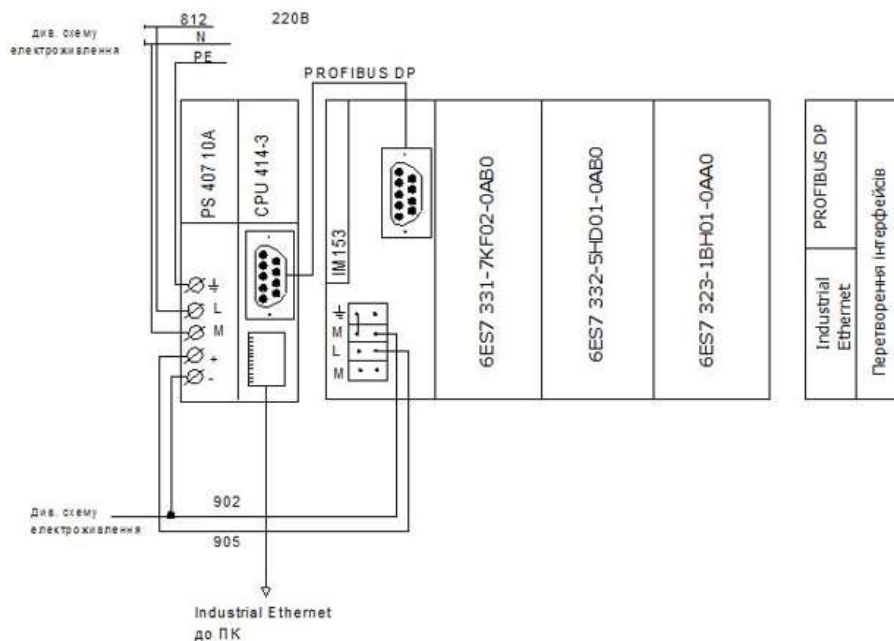


Рис. 5.5. Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (підключення живлення ПЛК та периферійних модулів)

Схема електрична принципова живлення ПЛК та периферійних модулів зображена на рис. 5.5. Схеми електричні принципові системи керування запалюванням полум'я у пальнику, а також ручного керування та світлової сигналізації в системі керування котлоагрегатом наведені в додатках В1 та В2.

## 5.2. Вибір апаратури захисту та керування

За електричною принциповою схемою системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ, для керування та захисту використовується наступне обладнання:

- для пуску, зупинки та захисту електродвигунів приводу дутьового вентилятора і димососа (**М1** та **М2**) від струмів короткого замикання та перевантажень використовуються автоматичні вимикачі **QF1-QF2** із комбінованими (електромагнітним та тепловим) розчіплювачами та електромагнітні пускачі **KM1-KM2**, проміжні реле напруги **KL1-KL2** (відповідна нумерація за принциповою схемою);
- для захисту кола керування від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач **QF3**.

Технічні характеристики електродвигунів приводу дутьового вентилятора і димососу наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Технічні характеристики асинхронного трифазного електродвигуна  
АИР100L6У3 приводу дутьового вентилятора і димососу

Характеристика електродвигуна	Марка електродвигуна
	АИР100L6У3 (М1 – М2)
Потужність, кВт	2,2
Напруга живлення, В	3ф,220/380,50Гц
Номінальний струм, А	5,6
Частота обертання поля статора, об/хв.	1000
Частота обертання валу, об./хв.	935
cosφ	0,76
ККД, %	79,0
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,0
Відношення моментів $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,1
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	6,5
Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	0,02
Режим роботи	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54
Вага, кг	36,3

Крім зазначеного обладнання, у колі керування встановлені плавкі запобіжники, кнопкові пости керування, кнопки керування, лампи світлової сигналізації.

### 5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів

Вибираючи автоматичний вимикач для захисту електродвигуна, слід дотримуватися таких умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі електричної мережі або перевищувати її:

$$U_{ав} \geq U_m ; \quad (5.1)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його:

$$I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв} ; \quad (5.2)$$

- номінальний струм теплового й електромагнітного розчіплювачів має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його з подальшим регулюванням струму неспрацювання теплового розчіплювача на номінальний струм електродвигуна:

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ел.дв} ; \quad (5.3)$$

- струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити не менш як 1,5...1,6 від пускового струму електродвигуна:

$$I_{від.розч.} \geq (1,5...1,6) I_{пус.} ; \quad (5.4)$$

За вказаними умовами для відповідних електродвигунів були вибрані наступні автоматичні вимикачі (табл. 5.2).

## Вибір автоматичних вимикачів

Електродвигун	Автоматичний вимикач, виконання умов
<b>АИР100L6У3 (М1 – М2)</b> Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6\text{А}$ Пусковий струм $I_{\text{пуск}} = 6,5 \cdot 5,6 = 36,4\text{А}$ $1,6 \cdot I_{\text{пуск}} = 58,24\text{А}$	<b>GV2ME10</b> (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690\text{В}, U_{ав} \geq U_m; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{ном.ав} = 6,3\text{А}; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 6,3\text{А} > 5,6\text{А}$ $I_{ном.розч} = 78\text{А}, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 78\text{А} > 5,6\text{А}$ $I_{від.розч} \geq (1,5...1,6) I_{пус.}, 78\text{А} > 58,24\text{А}$ Регулювання захисту теплових розчіплювачів 4...6,3А

При виборі автоматичного вимикача для захисту ПЛК та кола керування, необхідно дотримуватись наступних умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її

$$U_{н.ав} \geq U_{ж}; \quad (5.5)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача повинен дорівнювати або перевищувати робочий струм ПЛК та кола керування

$$I_{н.ав} > I_{к.кер}, \quad (5.6)$$

- номінальний струм електромагнітного розчіплювача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм ПЛК та кола керування

$$I_{н.розч} > I_{к.кер}; \quad (5.7)$$

- струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити не менше 1,5...1,6 робочого струму ПЛК та кола керування

$$I_{відс.розч} > (1,5...1,6) \cdot I_{к.кер}. \quad (5.8)$$

За принциповою схемою бачимо, що автоматичний вимикач QF3 захищає програмно-логічний контролер Siemens Simatic S7-300 (споживана потужність 12 Вт або 18 ВА в залежності від виконання), блоки розширення аналогових ввідів та виводів (споживана потужність 6 ВА кожного), проміжні

реле напруги (як буде показано далі, це реле напруги проміжні MY4-NS 24V DC із напругою живлення 24В постійного струму та споживаною потужністю 0,9Вт, тобто струмом споживання  $0,9/24 = 0,0375$  А, із загальним струмом споживання  $4 \cdot 0,0375 = 0,15$ А), електромагнітні пускачі KM1-KM2 (LC1D09M7 – струм споживання 0,1А, із загальним струмом споживання  $6 \cdot 0,1 = 0,6$ А). Тому для захисту кола керування вибраний автоматичний вимикач **İK60N 4C 2P** – автоматичний вимикач двохполюсний із номінальним струмом 4А.

### 5.2.2. Вибір електромагнітних пускачів

Електромагнітні пускачі вибирають за наступними умовами:

- номінальна напруга електромагнітного пускача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її

$$U_{H.EП} \geq U_{Ж}; \quad (5.9)$$

- номінальний струм комутації силових контактів електромагнітного пускача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм груп електродвигунів

$$I_{H.EП} \geq I_{H}; \quad (5.10)$$

- номінальна напруга живлення втягувальної котушки електромагнітного пускача повинна дорівнювати напрузі кола керування

$$U_{H.KOT} \geq U_{KEP}. \quad (5.11)$$

- за струмом теплового реле та за струмом неспрацювання теплового реле (при відповідній комплектації).

Крім того, слід враховувати необхідність наявності допоміжних контактів магнітного пускача в колі керування.

За вказаними умовами для відповідних електродвигунів були вибрані наступні електромагнітні пускачі (табл. 5.3).

## Вибір електромагнітних пускачів

Електродвигун	Електромагнітний пускач
<b>АИР100Л6У3 (М1 – М2)</b> Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6\text{А}$	<b>LC1D09M7</b> $U_{H.EП} \leq 690\text{В}, 25\dots 400\text{Гц}, 300\text{В пост.стр.}$ $U_{H.EП} \geq U_{ж}; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{H.EП} = 9\text{А}; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 9\text{А} > 5,6\text{А}$ $U_{H.КОТ} \geq U_{КЕР}; 690 > 220\text{ В}$

## 5.2.3. Вибір проміжних реле

Проміжні реле для кола управління вибирають

- за напругою кола керування:

$$U_{H.РЕЛЕ} \geq U_{K.УПР}; \quad (5.12)$$

- максимальною комутаційною здатністю допоміжних контактів (струм кола управління повинен дорівнювати або бути меншим за номінальний струм реле):

$$I_{H.РЕЛЕ} \geq I_{K.УПР}; \quad (5.13)$$

- за кількістю та призначенням допоміжних контактів (нормально розімкнені, нормально замкнені, перемикаючі).

За вказаними умовами та згідно з технічними характеристиками вибрані проміжні реле напруги **MY4-NS 24V DC** із напругою живлення 24В постійного струму, номінальною напругою комутації кола керування 220В, номінальним струмом комутації кола керування 5А, споживаною потужністю 0,9Вт, струмом споживання  $0,9/24 = 0,0375\text{ А}$ .

Після вибору кнопочових постів, кнопок керування та сигнальних ламп, відомість електроприладів системи автоматичного керування паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ матиме наступний вигляд (табл. 5.4).

## Відомість електроприладів САК паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ

Познач.	Назва	Кільк.	Примітки
M1-M2	Електродвигун асинхронний трифазний АИР100L6У3	2	2,2 кВт
QF1-QF2	Вимикач автоматичний GV2ME10	2	3п
QF3	Вимикач автоматичний iK60N 4C 2P	1	2п
D1	Модульний програмований логічний контролер Siemens Simatic S7-300	1	
D2	Модуль розширення аналогових вводів Siemens 6ES7331-7KF02-0AB0	1	
D3	Модуль розширення аналогових виводів Siemens 6ES7332-5HD01-0AB0	1	
D4	Мережевий шлюз Siemens IM153-1 6ES7153-1AA03-0XB0	1	
D5	Датчик температури Siemens Sitrans TS500-3G	1	
U1-U2	Частотний перетворювач Siemens Sinus K 4T	2	
D6	Датчик рівня у верхньому барабані ТЕКО CSA-EC49	1	
D7	Датчик розрідження АДР-0,25А	1	
D8, D9	Регулюючий клапан із сервоприводом BELIMO LM24A-SZ-TPC	2	
D10, D11, D12	Блок ручного керування БРУ7 (з КБЗ-24-19)	3	
KM1-2	Пускач електромагнітний LC1D09M7	6	1NC+1NO
KL1-4	Реле напруги проміжне MY4-NS 24V DC	4	
SB1	Кнопковий пост "Старт-Стоп" ZB5 AW833743	1	NO, NC
SB2-4	Кнопка без фіксації "Старт" ZB5 A333	3	NO
HL1-7	Лампа сигнальна A22-RLF-RT 220V	7	червона
HL8-13	Лампа сигнальна AD22-22DS 220V	6	зелена
HL14-15	Лампа сигнальна AD22-22DS 24V	2	
R1-6	Резистор 4кОм	6	

### 5.3. Вибір проводів та кабелів

Переріз струмопровідної жили проводу, шнура або кабелю вибирають, виходячи з умов гранично допустимого його нагрівання та достатньої механічної міцності. Під час визначення кількості проводів, які прокладають в одній трубі (або жил багатожильного провідника), нульовий провід чотирипровідної системи трифазного струму (або заземлюючу жилу) не враховують.

Площу поперечного перерізу жил проводів, шнурів і кабелів вибирають за тривало допустимим струмом

$$I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (5.14)$$

де  $I_{\text{розр}}$  - розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Для відгалужень до окремих електроспоживачів за максимальні тривалі робочі струми беруть їх номінальні струми.

Для трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором тривало допустимий струм визначається за формулою

$$I_{\text{розр.дв}} = \frac{10^3 P_{\text{н.дв}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}. \quad (5.15)$$

Визначимо тривало допустимі струми для асинхронних трифазних електродвигунів:

$$\text{АИР100Л6У3 (М1-2)} \quad I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 2,2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,79 \cdot 0,76} = 5,57 \text{ А.}$$

Враховуючи умову (5.14) та відповідні розраховані значення тривало допустимих струмів, для підключення електродвигунів із відповідними апаратами для пуску і захисту вибрані такі кабелі (таблиця 5.5).

## Вибір кабелів живлення електродвигунів

Електродвигун	Кабель	Найбільший тривало допустимий струм навантаження, А
АИР100L6У3 (М1-М2) $I_{розр.дв} = 5,57 \text{ А}$ .	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм <sup>2</sup> ), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19

Для живлення кола керування вибираємо провід ПВ1х0,5 – провід з мідною жилою перерізом 0,5 мм<sup>2</sup> в полівінілхлоридній оболонці, тривало допустимий струм якого дорівнює 11 А.

Для підключення датчиків показників параметрів технологічного процесу в котлоагрегаті Е-2,5-0,9 ГМ використовується провід МГТФЕ 3х0,12 із фторопластовою ізоляцією, екранований.

#### 5.4. Вибір щита керування

Згідно з нормативними документами щити і пульти розраховано на розміщення їх у закритих приміщеннях із температурою навколишнього середовища від -30 до +50°С за відносної вологості не більше як 80%. Промисловість випускає також щити та пульти спеціального призначення, які розраховані на більш високі або низькі температури, підвищену вологість, наявність агресивного середовища тощо.

Шафові щити використовують:

- у виробничих приміщеннях, що характеризуються запиленістю, великою вологістю та можливістю механічного пошкодження апаратури й внутрішньощитових проводів;

- для розміщення допоміжної апаратури (реле, джерел живлення) всередині щита;
- для захисту обслуговуючого персоналу від дотиків до відкритих струмоведучих частин апаратури та затискачів.

Враховуючи габаритні розміри пристроїв системи керування, а також ту обставину, що частотні перетворювачі потребують певного повітряного простору для внутрішнього вентилятора охолодження, вибираємо бокс монтажний Бм-80+П (650x800x260).

Схеми електричні з'єднань, підключень, зовнішній вигляд щита керування САК паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ наведені в додатках Г1-Г3.

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПАРОВИМ КОТЛОАГРЕГАТОМ

#### 6.1. Програмне конфігурування обладнання

При візуалізації системи керування використовують наступні підходи: створення SCADA-system; використання контролера з панеллю оператора; використання контролера з дисплеєм.

Вибір технічних засобів для забезпечення візуалізації залежить від кількості інформації та величини об'єкта керування. У разі масштабних об'єктів використовують SCADA-системи.

SCADA – це програмний комплекс для візуалізації та диспетчеризації технологічних процесів. SCADA-система дає наочне уявлення процесу і надає графічний інтерфейс оператору для контролю і керування.

Враховуючи, що САК паровим котлоагрегатом реалізована на базі комплексу технічних засобів SIEMENS, візуалізація інтерфейсу оператора проводиться у середовищі SIEMENS SIMATIC Process Control System 7 (PCS7) відповідно до функціональної схеми автоматизації системи керування котлоагрегатом.

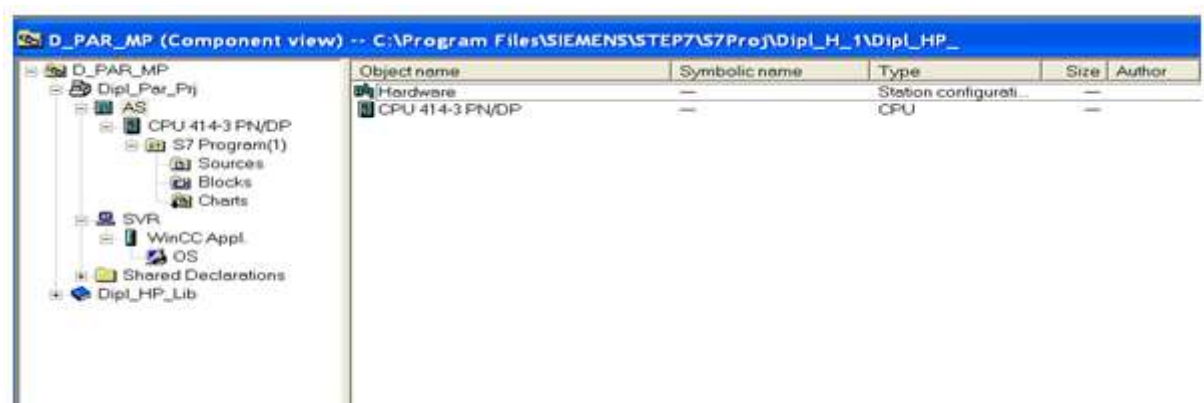


Рис. 6.1 Загальний вигляд вікна проекту

На початковому етапі у зазначеному середовищі за допомогою Simatic Manager створюємо вікно проєкту, що складається зі станції автоматизації на базі програмно-логічного контролера Simatic S7-300 та станції оператора на базі Simatic PC Station (рис. 6.1).

Наступним кроком за допомогою Hardware Config розбудовуємо програмне конфігурування системи керування з її складових: контролера, модулів, зв'язків взаємодії між ними на основі мережі Profibus DP. При цьому створюється віртуальна DIN-рейка, на якій розміщується ПЛК Simatic S7-300 та блок живлення. Один з портів ПЛК Simatic S7-300 налаштовується на режим роботи "master" (тобто "головний", "що веде") у мережі Profibus DP, після чого задаються адреса ПЛК у даній частині мережі, швидкість обміну даними між контролером та іншими складовими системи керування та інші параметри. Після завершення процесу конфігурування у програмному вікні з'явиться віртуальна шина мережі Profibus DP, яка підключена до визначеного порту ПЛК. Фрагменти процедури конфігурування зображені на рис. 6.2, 6.3.

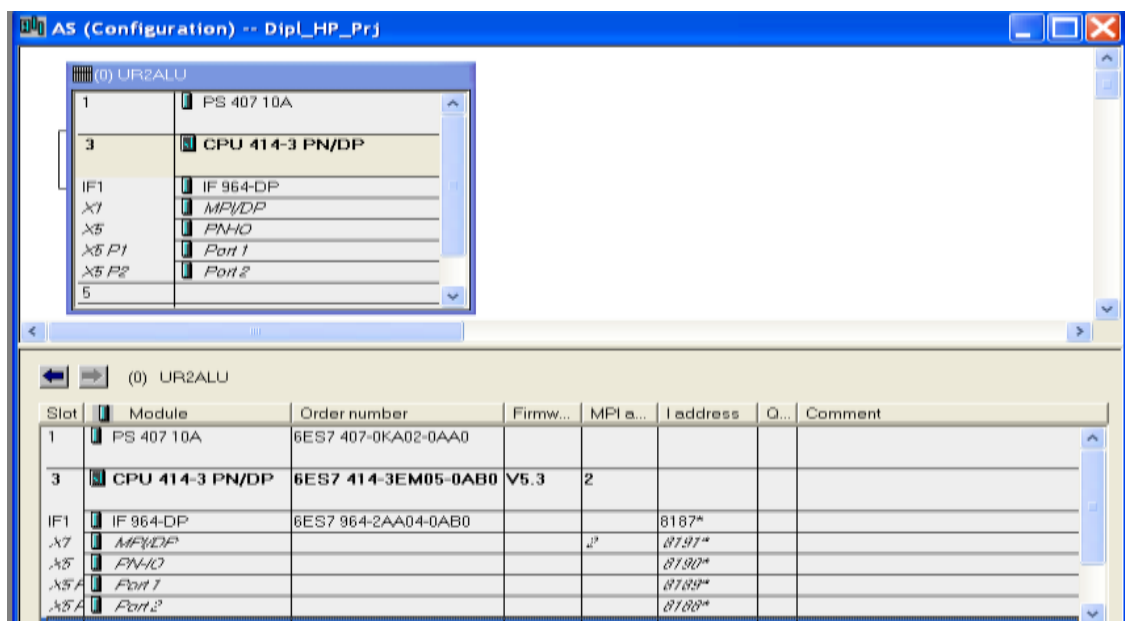


Рис. 6.2. Вікно конфігурування програмно-логічного контролера

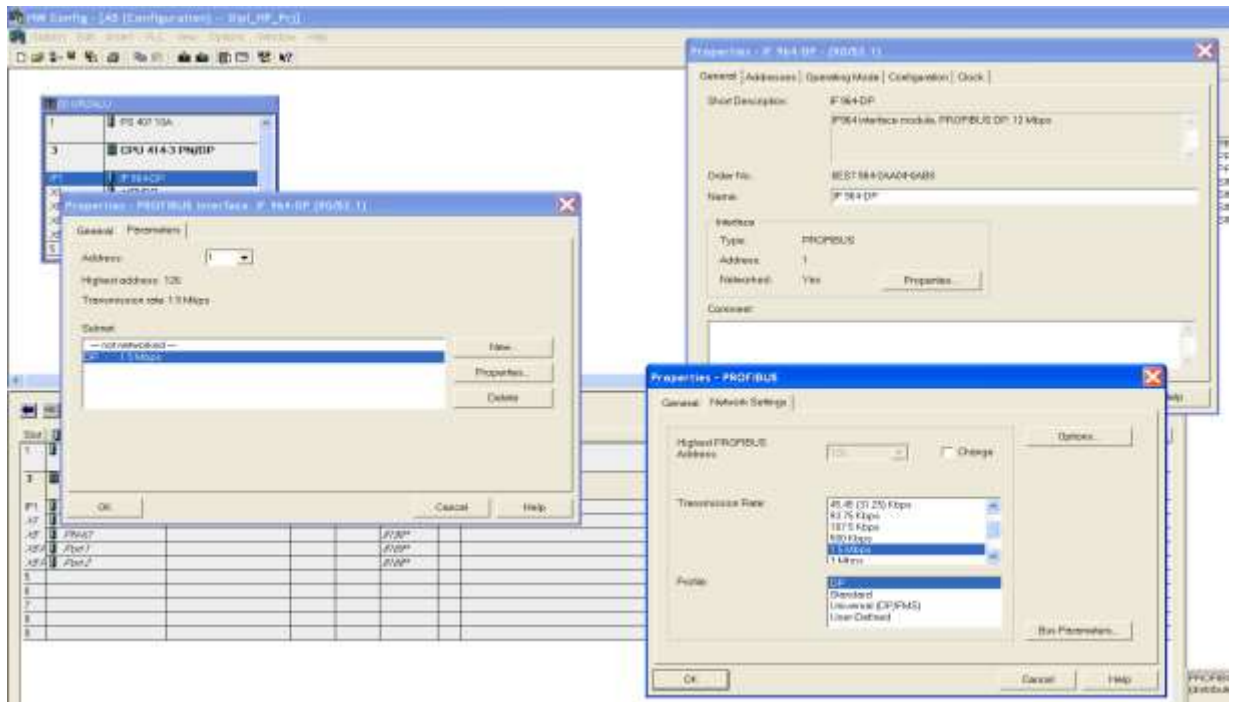


Рис. 6.3. Фрагмент конфігурування одного з портів ПЛК для роботи у мережі PROFIBUS-DP

Для підключення до контролеру через мережу PROFIBUS-DP модулів серії Simatic S7-300 обираємо інтерфейсний модуль IM 153-1 серії PROFIBUS-DP/ET 200M. Розташовуємо його на шині і підключаємо до існуючої мережі PROFIBUS-DP (рис. 6.4).

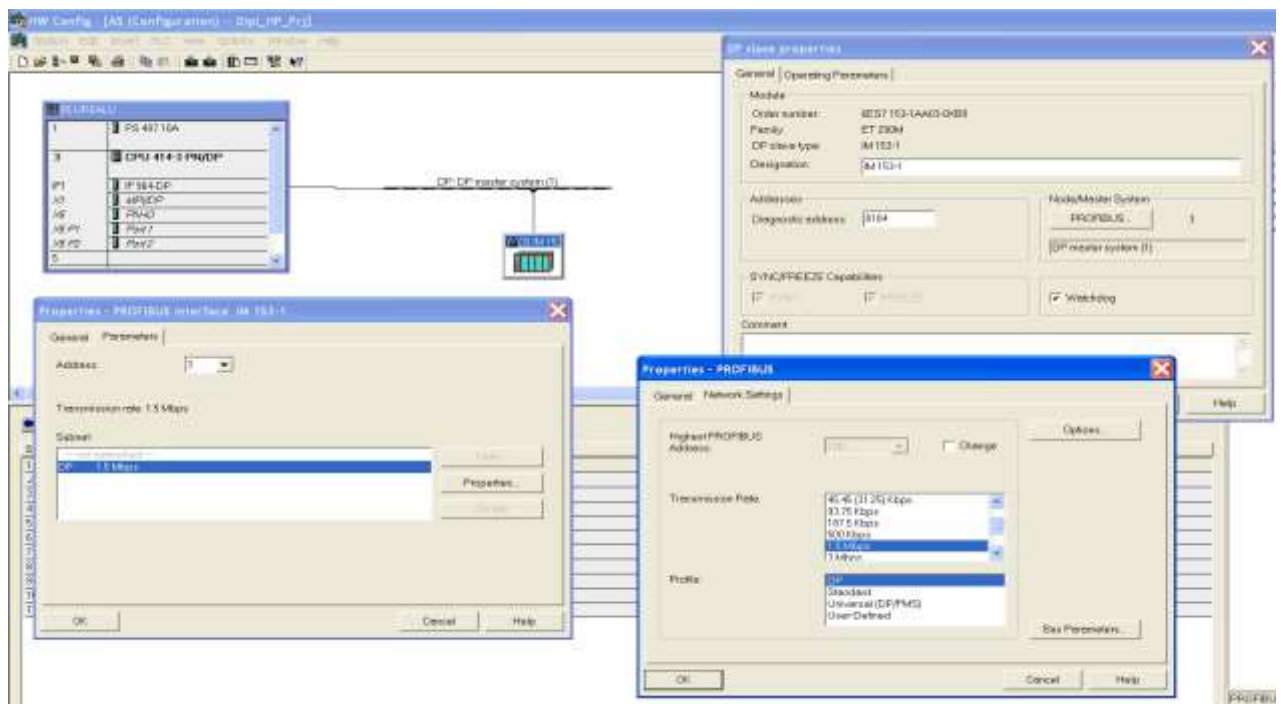


Рис. 6.4. Конфігурування інтерфейсного модулю зв'язку

Обрані модулі вводу/виводу сигналів конфігуруємо та задаємо символічні імена каналам вводу/виводу (рис. 6.5).

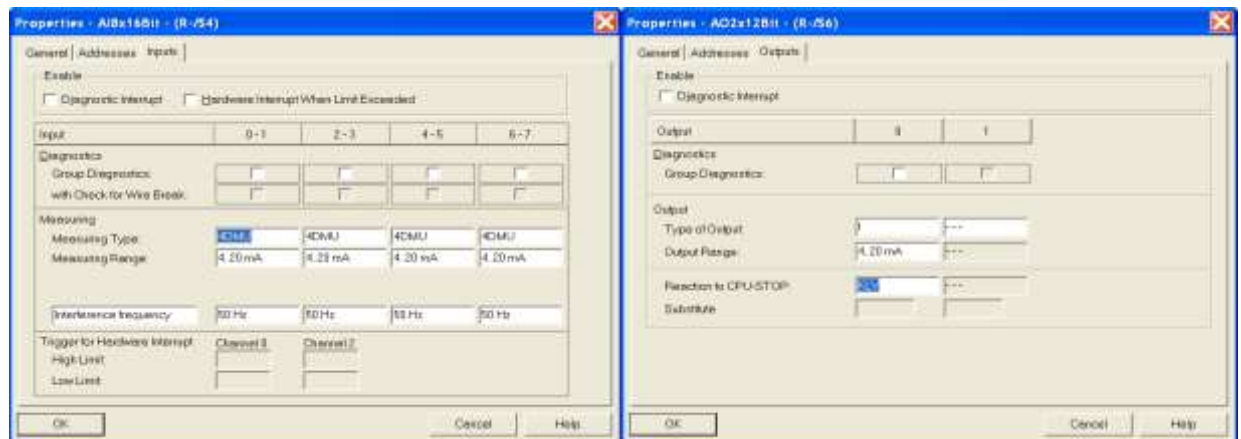


Рис. 6.5. Загальний вид вікна конфігурування модулів аналогового вводу та виводу

Обрані модулі вводу/виводу не передбачають підключення дискретних сигналів додаткової конфігурації.

Зв'язок станції оператора із ПЛК Simatic S7-300 реалізується на основі мережевого протоколу MPI, яка може бути використана також для режиму емуляції контролера для тестування програмного забезпечення.

## 6.2. Розробка програмного забезпечення контролера

В загальному випадку, програмування у середовищі SIEMENS SIMATIC PCS7 здійснюється для структури всього підприємства. У даному випадку розглядаємо тільки котлоагрегат без прив'язки до місця його встановлення, тому ієрархія структури складається із загальної ділянки "Plant" та папок із підпрограмами керування технологічним обладнанням за окремими контурами, а також файлами "Help" допомоги для оператора. Загальна структура проєкту в режимі перегляду "Plant View" зображена на рис. 6.6.

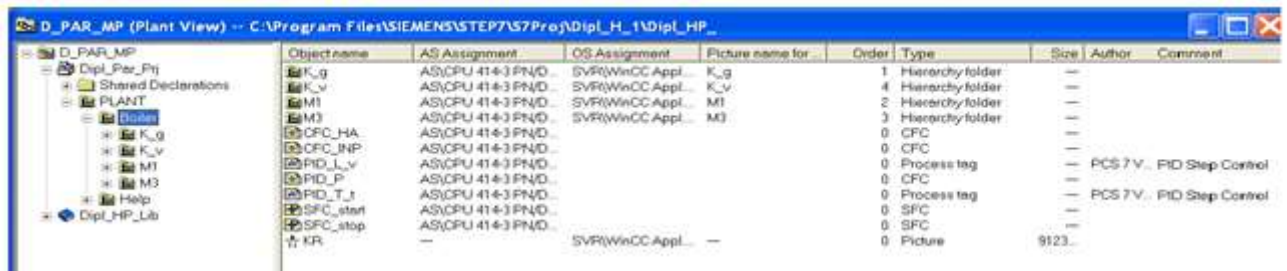


Рис. 6.6. Загальна структура проекту у режимі "Plant View"

Програмна реалізація алгоритмів керування виконавчими механізмами системи керування паровим котлоагрегатом за відповідними контурами керування реалізована за допомогою графічного інтерфейсу CFC.

Розробка CFC-програми здійснюється у вигляді технологічного завдання, яке складається із необхідного набору пов'язаних між собою блоків (зокрема, блоків керування електромагнітними або регульовальними клапанами, електродвигунами, блоків вимірювання та сигналізації, математичні блоки). У CFC-редакторі входи і виходи зв'язуються безпосередньо і забезпечують постійний обмін значеннями параметрів.

Розроблена програма реалізації системи керування котлоагрегатом мовою CFC складається з підпрограм реалізації алгоритмів керування регульовальними клапанами, електродвигунами дутьового та димососного вентиляторів, пальником топки; алгоритмів вимірювання технологічних параметрів (витрат, тиску, температури, рівня); алгоритмів запуску, зупинки та блокування обладнання котлоагрегату (Додаток Д1-Д7). Для реалізації алгоритмів використовуються стандартні бібліотеки алгоритмів, що входять до складу пакету SIEMENS SIMATIC PCS7.

Після створення CFC-програми здійснюється розробка SFC-схем.

SFC (Sequential Function Chart – послідовна функціональна схема) – схема послідовного керування. Вона складається із фрагментів із покроковим виконанням програми із передачею керування від одного стану до іншого при виконанні певних умов. При використанні схеми покрокового керування CFC-програми працюють залежно від зміни стану сигналів у SFC-схемах. Іншими

словами, SFC-схеми здійснюють контроль певних технологічних параметрів і формують керуючі сигнали для блоків SFC-програм.

SFC-схеми пуску і зупинки котлоагрегату, інтегровані з розробленими вище SFC-підпрограмами, із прикладом конфігураційних вікон кроків керування та умов переходу між кроками керування наведені в додатках Д8, Д9.

На цьому етапі процес розробки програмного забезпечення програмно-логічного контролера вважається завершеним.

Наступним кроком є компіляція програми із пошуком і видаленням помилок із наступною розробкою екранної візуалізації SCADA-системи за допомогою редактора WinCC. Тут за допомогою "Graphic Designer" із використанням різноманітних інструментів створюємо мнемосхему котлоагрегату: розташовуємо технологічне обладнання із піктограмами блоків. Це реалізується за допомогою бібліотеки "Siemens HMI Symbol Library", яка вміщує широкую номенклатуру обладнання різних галузей промислового і сільськогосподарського виробництва.

Після програмного конфігурування обладнання та зв'язків комунікації між станцією АСУТП оператора, контролером і технологічним обладнанням у середовищі PCS7, розробки програмного забезпечення контролера та станції оператора проведено тестування роботи системи керування котлоагрегатом у режимі емуляції (вікно допомоги оператора зображене на рис. 6.7, головне вікно мнемосхеми – на рис. 6.8), яке підтвердило коректну роботу розробленої системи.

## РОЗДІЛ 7

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Автоматизація технологічних процесів має забезпечувати збільшення виробництва продукції, підвищення продуктивності праці (зменшення витрат праці), зменшення енергоємності та собівартості продукції, терміну окупності капітальних витрат.

Узагальнюючим показником ефективності капітальних вкладень в розвиток автоматизації є зведені розрахункові витрати, які враховують річні експлуатаційні витрати і частку капіталовкладень, що припадає на один рік.

Зведені витрати визначають за виразом:

$$B_{зв} = C + E_H \cdot K, \quad (7.1)$$

де:  $B_{зв}$  – зведені витрати, грн./рік;

$C$  – річні експлуатаційні витрати, грн./рік;

$K$  – капітальні витрати, грн.;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, приймають  $E_H = 0,15$ .

До складу експлуатаційних витрат входять:

- витрати на оплату праці персоналу ( $C_3$ );
- утримання основних засобів виробництва ( $C_v$ );
- оплата електроенергії ( $C_E$ );
- інші прямі витрати ( $C_I$ ).

Витрати на оплату праці персоналу з експлуатації систем автоматизації визначають виходячи з витрат праці і годинних ставок з урахуванням різних додаткових нарахувань та доплат ( $C_3 = 30$  грн./год. з 01.09.2020 р.).

Витрати на утримання основних засобів виробництва  $C_v$  складаються з відрахувань на амортизацію  $C_A$  (визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають  $C_A = 14,2\%$ ) та

відрахувань на поточний ремонт  $C_{\text{ПР}}$  (також визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають  $C_{\text{ПР}} = 18\%$ ).

Витрати на електроенергію визначаються за споживаною потужністю приладів і тарифами на електроенергію для виробничих цілей (приймається у розмірі 2,40 грн./кВт·год. за цінами 2022 року):

$$C_E = P_{\text{СП}} \cdot \Gamma \cdot 2,40, \quad (7.2)$$

де  $P_{\text{СП}}$  – потужність споживачів електроенергії;

$\Gamma$  – кількість годин роботи споживачів на рік.

Інші прямі витрати приймають рівними 1% від загальної суми експлуатаційних витрат:

$$C_I = 0,01 \cdot (C_3 + C_A + C_{\text{ПР}} + C_E). \quad (7.3)$$

При визначенні капітальних вкладень необхідно враховувати:

- вартість технічних засобів автоматизації ( $K_3$ );
- торгівельно-транспортні та складські витрати ( $K_{\text{ТТ}}$ );
- витрати на монтаж технічних засобів ( $K_M$ );
- витрати на електропроводки ( $K_{\text{ПР}}$ );
- інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації ( $K_I$ ).

Торгівельно-транспортні та складські витрати зазвичай приймаються рівними 11% від вартості технічних засобів:

$$K_{\text{ТТ}} = 0,11 \cdot K_3. \quad (7.4)$$

При визначенні витрат на монтажні роботи приблизно вважають, що вони складають 15...20% від вартості технічних засобів. Для розрахунку приймемо значення 17%:

$$K_M = 0,17 \cdot K_3. \quad (7.5)$$

Витрати на електропроводки складаються з вартості кабелів (проводів) та вартості їх прокладання.

Інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації, приймаються у розмірі 2% від вартості технічних засобів автоматизації:

$$K_I = 0,02 \cdot K_3. \quad (7.6)$$

Загальна вартість технічних засобів автоматизації складає

$$K_3 = K_{TZA} + K_{II}, \quad (7.7)$$

$K_{TZA}$  – вартість технічних засобів автоматики у складі САК, грн.;

$K_{II}$  – вартість плат та провідників, грн.

Вартість технічних засобів автоматизації визначається з кошторису системи керування (КТЗ фірми SIEMENS серії SIMATIC S7-300) (додаток Е1), а загальна вартість технічних засобів із урахуванням пуско-захисної апаратури зазначена у таблиці 7.1.

Зведені витрати становитимуть

$$B_{ЗВ} = C + E_H \cdot K \quad (7.8)$$

Чистий прибуток, років, можна визначити за виразом

$$Ч = \Delta C_3 + \Delta C_E, \quad (7.9)$$

де  $\Delta C_3$  – прибуток за рахунок економії заробітної плати, грн.;

$\Delta C_E$  – прибуток за рахунок економії електричної енергії, грн.

Термін окупності установки складатиме

$$T_{ОКУП} = K / Ч \quad (7.10)$$

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

$$E = 1 / T_{ОКУП} \quad (7.11)$$

Для розрахунків використаємо наведену вище методику, формули заносимо у табличний редактор EXCEL (таблиця 7.1).

Аналізуючи отримані дані, бачимо, що прибуток складає 85233,6 грн., а через 1,8 роки САК паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ повністю окупається і вже працюватиме на чистий прибуток. Тому робимо висновок, що установка економічно ефективна і використовувати її доцільно.

Розрахункова таблиця для знаходження терміну окупності  
від впровадження САК паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ із  
використанням комплексу технічних засобів Siemens

	Розрахункові значення	Од.	Відповідний коефіцієнт	Значення
1	Загальна вартість технічних засобів автоматизації			641485.9
2	Торгівельно-транспортні витрати		0.11	70563.45
3	Витрати на монтаж технічних засобів		0.17	109052.6
4	Витрати на прокладення проводок	150	17.67	2650.5
5	Інші капітальні витрати 2%		0.02	12829.72
6	Капітальні витрати			836582.2
7	Відрахування на амортизацію		0.15	125487.3
8	Витрати на поточний ремонт		0.18	150584.8
9	Витрати на енергоресурси		1.3	2733.12
	потужність автоматизації	1.46		
	кількість годин роботи	1440		
10	Витрати на оплату праці персоналу			86400
	кількість персоналу	2		
	ставка оператора	30		
11	Річні експлуатаційні витрати			365205.2
12	Зведені витрати		0.15	490692.6
13	Чистий прибуток			85233.6
	прибуток за рахунок зменшення персоналу			84153.6
	прибуток за рахунок зменшення браку			1080
	економія за рахунок підвищення якості	0.01%		
14	Термін окупності САК			1.815169

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської роботи згідно із завданням було вдосконалено систему автоматичного керування паровим котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ із використанням комплексу технічних засобів Siemens.

В результаті дослідження визначені вимоги до формування системи керування, розроблено функціональну схему автоматизації системи керування паровим котлоагрегатом, обґрунтований вибір алгоритму керування об'єктом, розроблено імітаційну модель та досліджено вплив збурень, створено операторський інтерфейс SCADA-системи контролю та керування у середовищі SIEMENS SIMATIC Process Control System 7 (PCS7).

Перевірка якості функціонування САК виявила, що система є стійкою, час регулювання складає 177 с, перерегулювання 22%, відсутні статична похибка.

Для реалізації системи керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9ГМ обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматики з використанням модульного програмованого логічного контролера SIEMENS серії SIMATIC S7-300, розроблені електричні схеми: принципова, з'єднань, підключень, та необхідне програмне забезпечення.

Економічні розрахунки обґрунтували доцільність впровадження розробленої системи керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ, строк окупності складає 1,8 року.

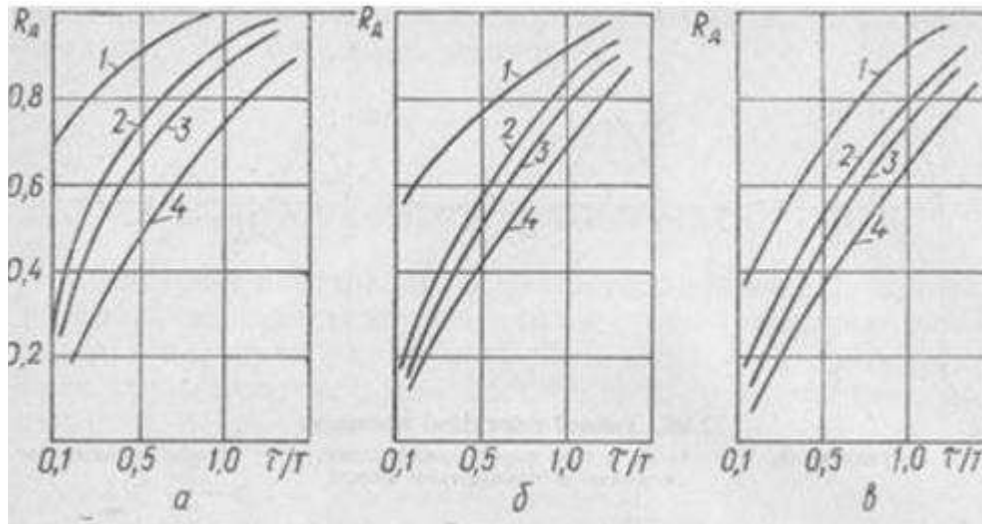
## ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизація теплоенергетичних установок: навч. посібник / Ю. М. Голдобін, Е. Ю. Павлюк. – Харків : НТУ ХПІ, 2017. – 186 с.
2. Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 367с.
3. Варфоломеев Ю. М. Опалення і теплові мережі / Ю. М. Варфоломеев, О. Я. Кокорін. К: В-во "Інфра", 2010. – 480 с.
4. Герман-Галкін С.Г. Matlab&Simulink. Проектування мехатронних систем на ПК. – В-во "КОРОНА", 2008. – 368 с.
5. Деєв Л.В., Балахнічев Н.А. Котельні установки та їх обслуговування. Практичний посібник для ПТУ. – К.: Вища школа, 1990. – 239 с., іл.
6. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О. Основи теплотехніки і гідравліки: Навчальний посібник / За ред. Б.Х. Драганова. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 495с.
7. Імітаційне моделювання виробничих систем / Під ред. А.А. Вавілова. – К.: Вища школа; Veb Verlag Technik, 1993.
8. Ключев А. С. Налагодження систем автоматичного регулювання барабанних парових котлів / А. С. Ключев, А. Г. Лебедєв, С. И. Новіков. К: Энергоатом, 1985. - 280 с.
9. Любарєць О.П. Проектування систем водяного опалення / О.П. Любарєць, О.М. Зайцев, В.О. Любарєць. - Відень-Київ-Сімферопіль, 2010. – 201 с.
10. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Лукач В.С. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. – К.: Вища школа, 1999. – 201 с.
11. Проектування систем автоматизації [Текст]: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.
12. Налагодження засобів автоматизації та автоматичних систем регулювання // А.С. Ключев. – К: Энергоатом, 1989 – 365с.
13. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1) / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2012. – 540 с.
14. Основи енерго-технології виробництва / В.А. Маляренко, Н.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Б. АНИПКО. Підручник – Харків: НТУ ХПІ, 2002. – 436с.
15. Петросян А.А., Давидов В.О. Автоматизована система управління технологічними процесами живлення парового котла ГМ-50. Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2018. Том 29 (68) Ч.1 №4. С.208-214.
16. Плетньов Г.П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у теплоенергетиці: підручник для студентів ВНЗ / Г.П. Плетньов – Харків: НТУ ХПІ, 2007. – 352 с.
17. Решетюк В.М., Мірошник В.О. Типові технологічні процеси і об'єкти виробництв. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2008. – 462 с.

18. Соколов Б.А. Будова і експлуатація обладнання газомазутних котелень / Б.А. Соколов. К: В-во "Академія", 2007. – 302 с.
19. Справочник по теплоснабженню сільського господарства / Л.С. Герасимович, А.Г. Цубанов, Б.Х. Драганов, А.Л. Синяков и др. – Мн.: Ураджай, 1993. – 368 с.
20. Стефани Е.П., Панько М.А., Пікіна Г.А. Збірник задач з основ автоматичного регулювання теплоенергетичних процесів. – Навч. посібник для ВНЗ. – Київ: Енергія, 1993. – 336 с.
21. Столяр О.М. Алгоритми регулювання параметрів технологічного процесу в енергетичних установках / Столяр О.М. // Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2016. – Тернопіль: ТНЕУ, 2016. – С. 51-52.
22. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. Підручник./ Г.Б. Варламов, Г.М. Любчик, В.А. Маляренко. – Київ.: «Політехніка», 2003. – 232 с.
23. Електротехнічний довідник / Алієв І.І., - К.: В-во "РадіоСофт", 2006. – 384 с.
24. Парові котлоагрегати ЕнергоМетМаш. Електронний ресурс. Режим доступу <https://mzko.ua/ua/obladnannya/parovi-kotli.html>
25. Модульний програмований контролер Siemens Simatic S7-300. Електронний ресурс. Режим доступу <https://gms-instruments.com/product/siemens-simatic-s7-300/>
26. Сенсори температури Siemens Simatic S7-300. Електронний ресурс. Режим доступу <https://gms-instruments.com/product/sitrans-ts500-temperature-sensor/>
27. Запірна та регулююча апаратура Belimo. Електронний ресурс. Режим доступу <http://belimo.com.ua/product-category/zaporno-reguliruyushhaya-armatura-s-elektroprivodami/>

## ДОДАТОК А1

Залежність динамічного коефіцієнта регулювання  
від динамічних властивостей об'єкту управління



1 – П-алгоритм керування; 2 – І-алгоритм керування; 3 – ІІ-алгоритм;  
4 – ІІД-алгоритм керування.

а – для типового аперіодичного перехідного процесу; б – для коефіцієнта передачі об'єкта типового перехідного процесу з 20%-вим перерегулюванням; в – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості

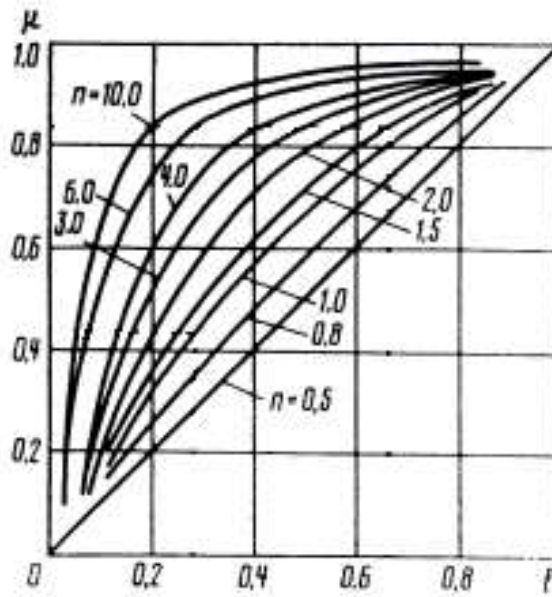
## ДОДАТОК А2

Визначення відносного часу регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		аперіодичний	із 20% перерегулюванням	із мінімальним інтегральним критерієм
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	-
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно-інтегрально-диференційний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

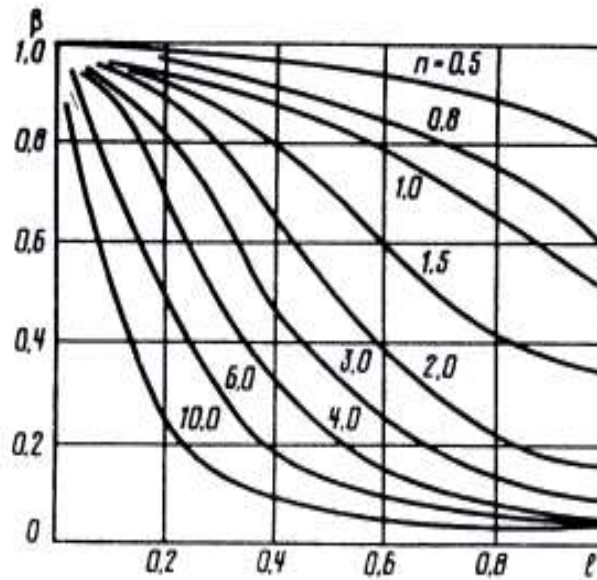
## ДОДАТОК Б1

Робочі витратні характеристики для регулювальних клапанів



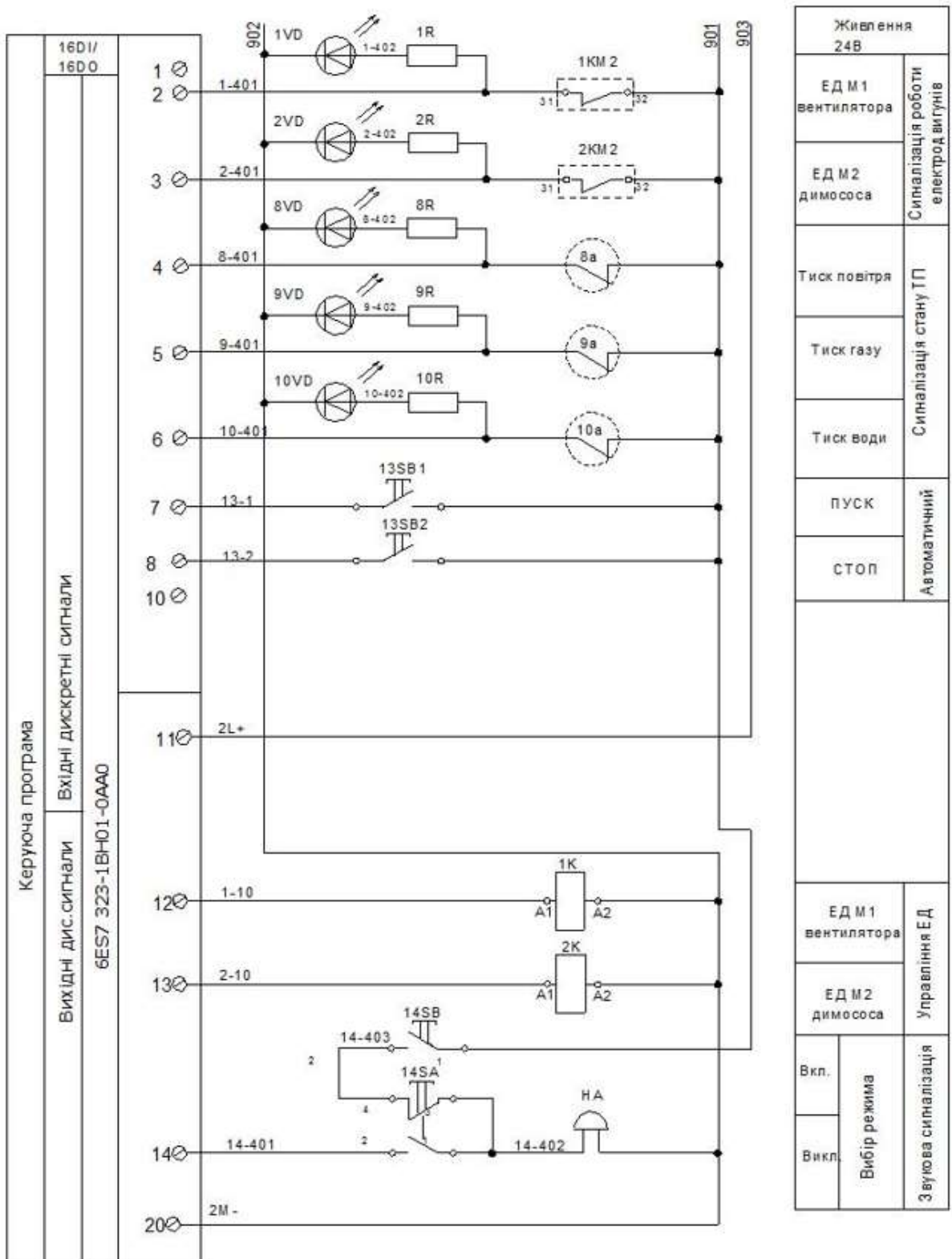
## ДОДАТОК Б2

Зміни перепадів тисків на ВМ для регулювальних клапанів



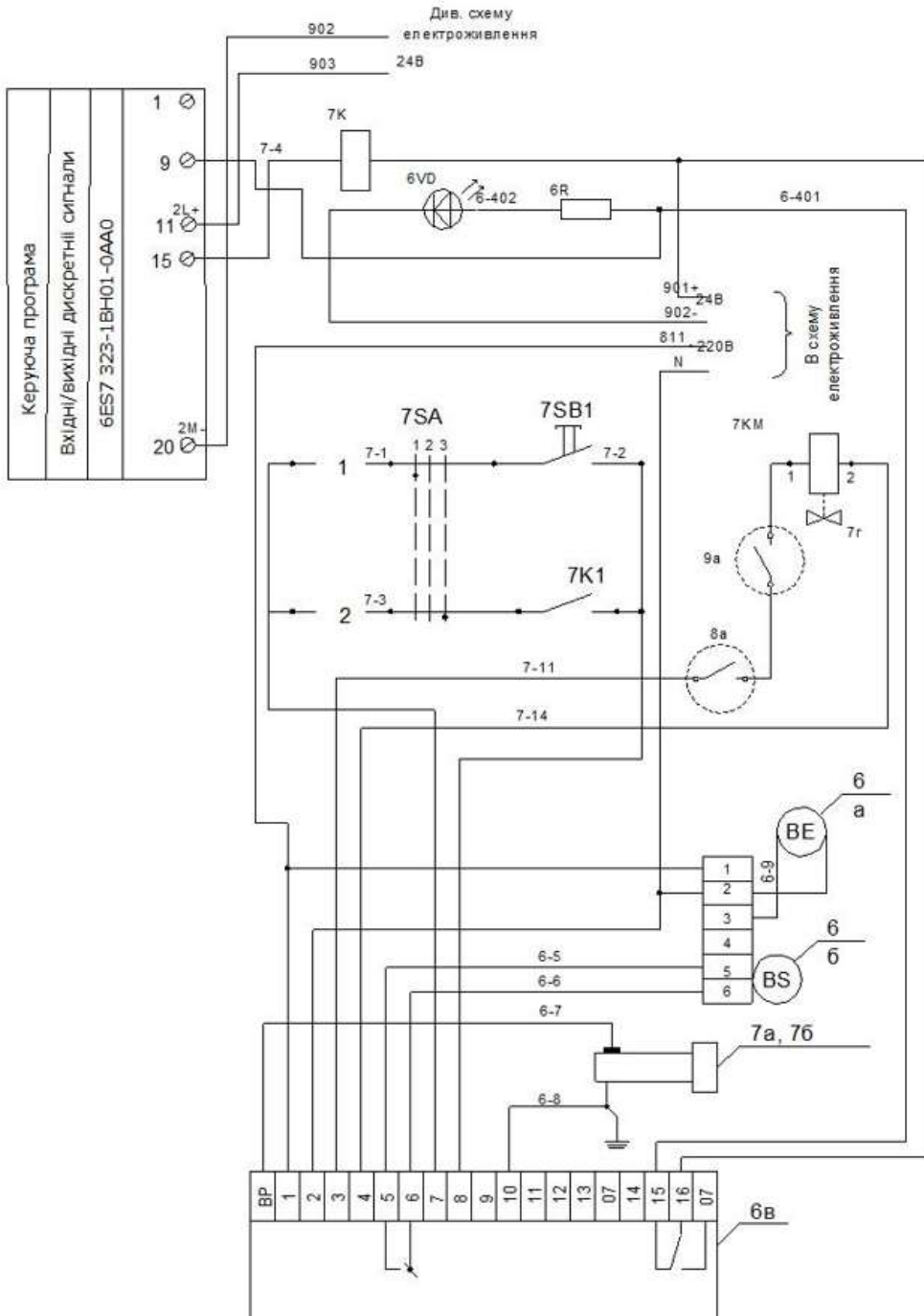
### ДОДАТОК В1

Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (ручне керування, світлова та звукова сигналізація)



### ДОДАТОК В2

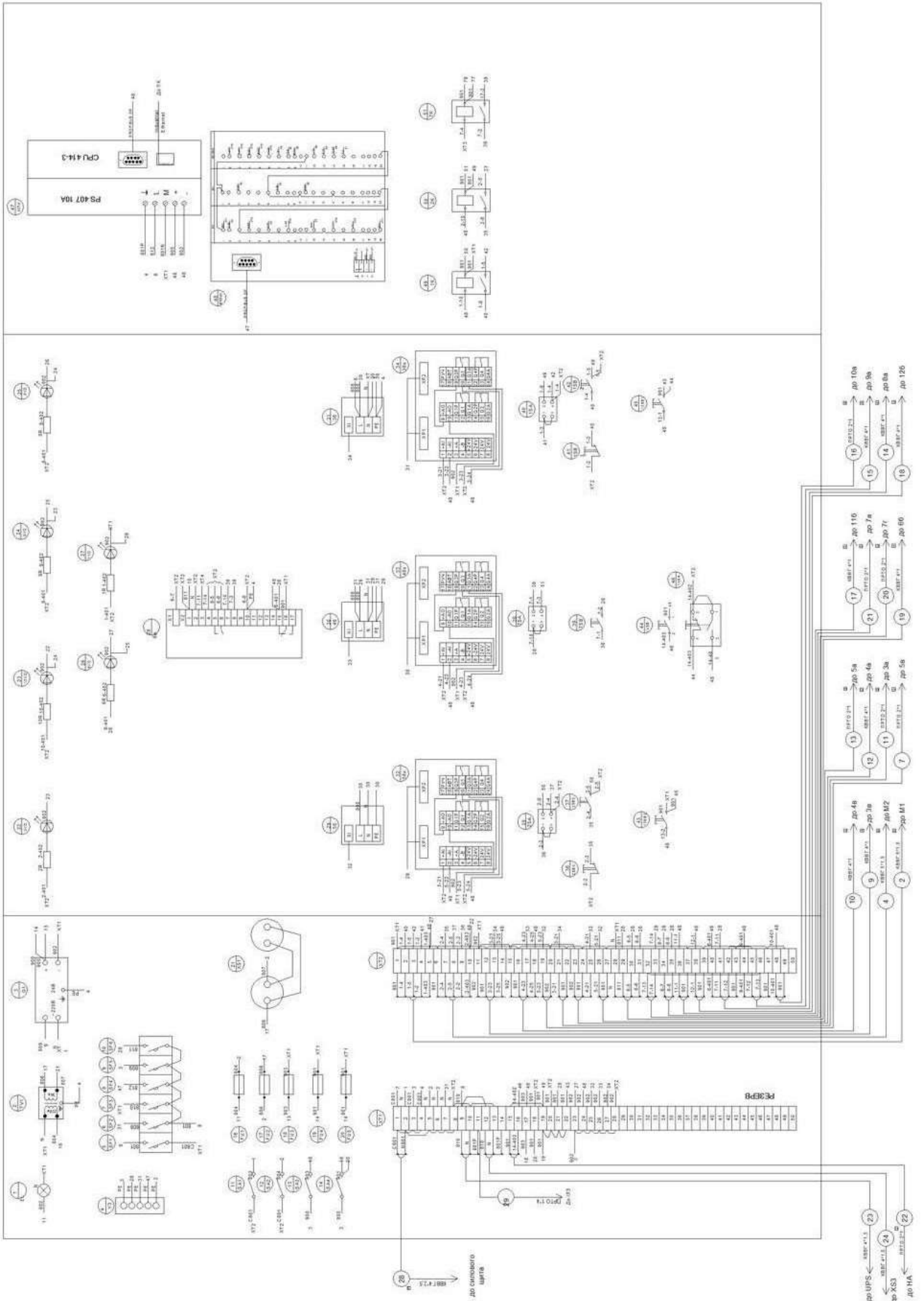
Фрагмент схеми електричної принципової системи автоматичного керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ (керування запалюванням)



БЗК-01	Комплект ЗЗУ ОМС	ЗМВ-01-Ф(Д)	Горілка	СЛ-90-1/220В	Датчик-реле контролю полум'я	Авт.	Розпал	Дист.	Розпал	Класиф. ЗМКЗ-6-6-220	МПК	Немає файла	Авт. розпал
Контроль полум'я та розпалу													

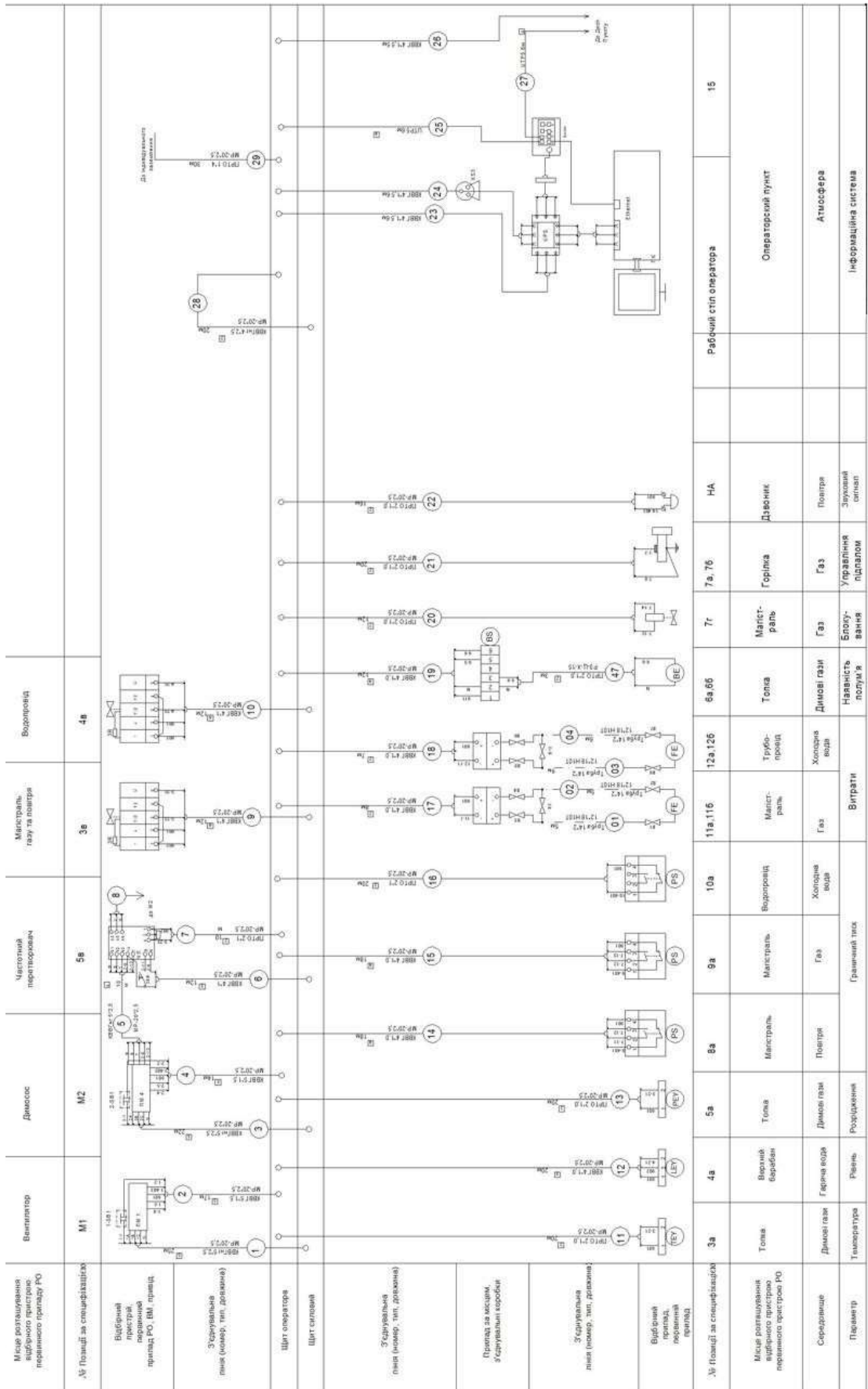
# ДОДАТОК Г1

## Схема електрична з'єднань системи керування котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ



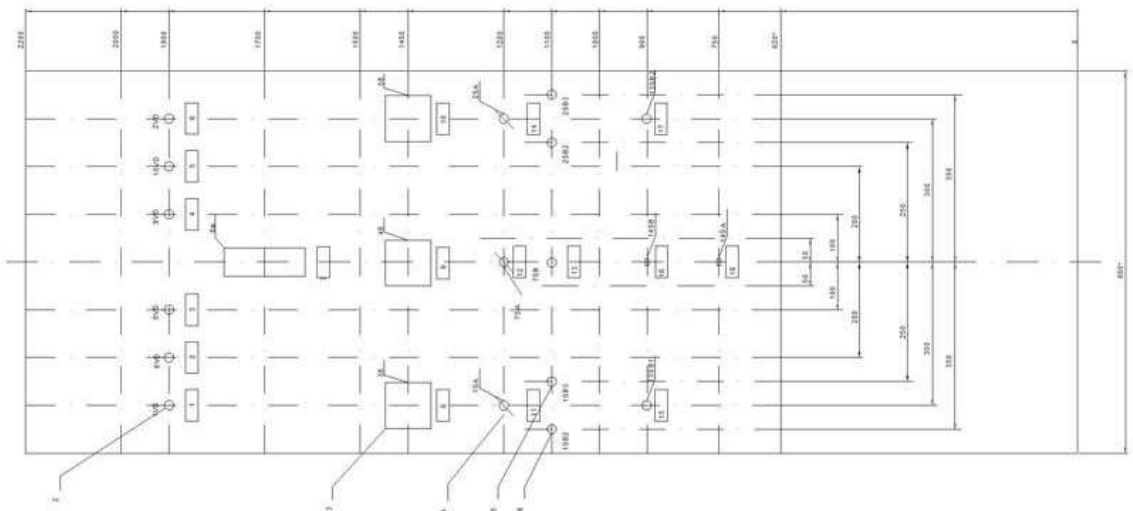
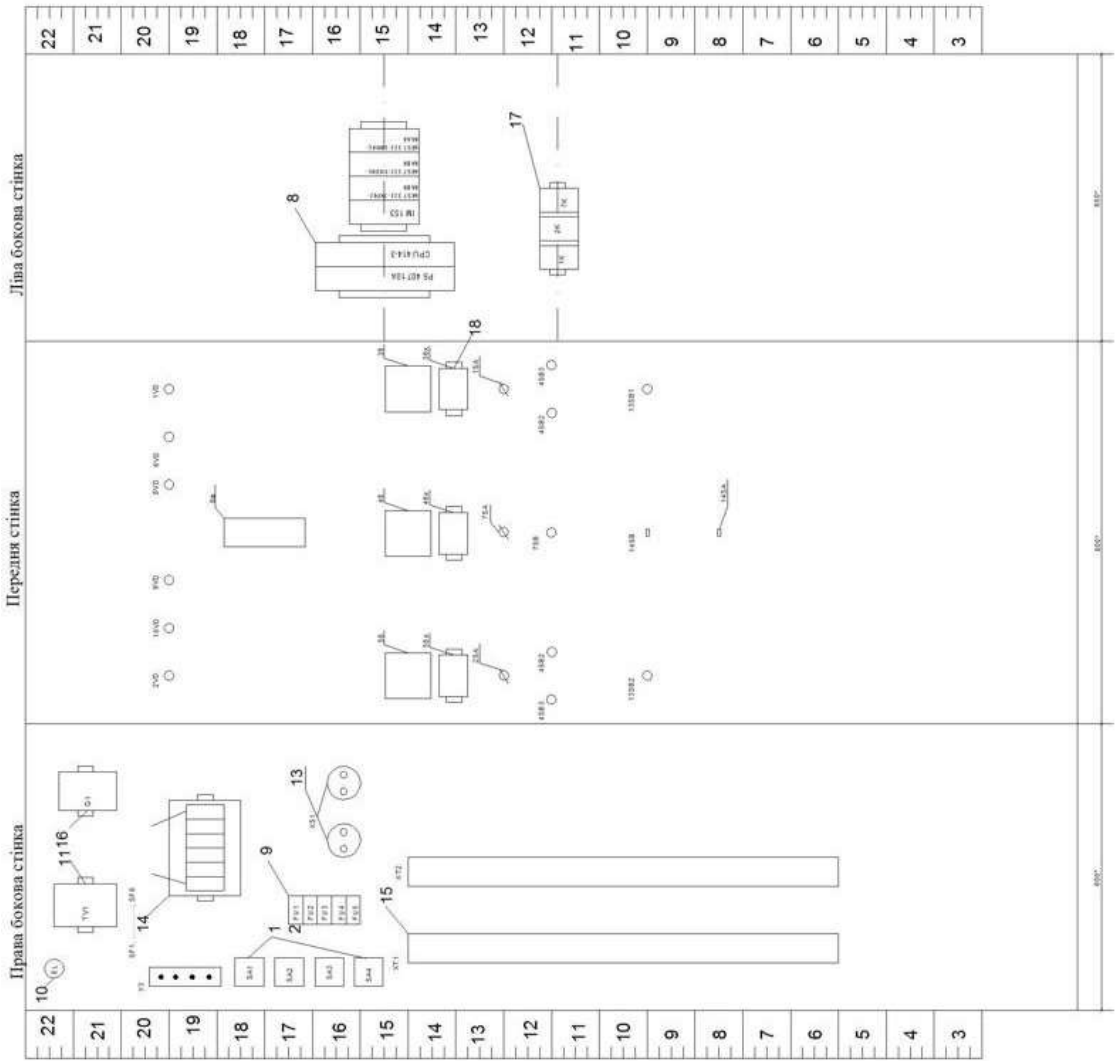
## ДОДАТОК Г2

### Схема електрична підключень САК котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ



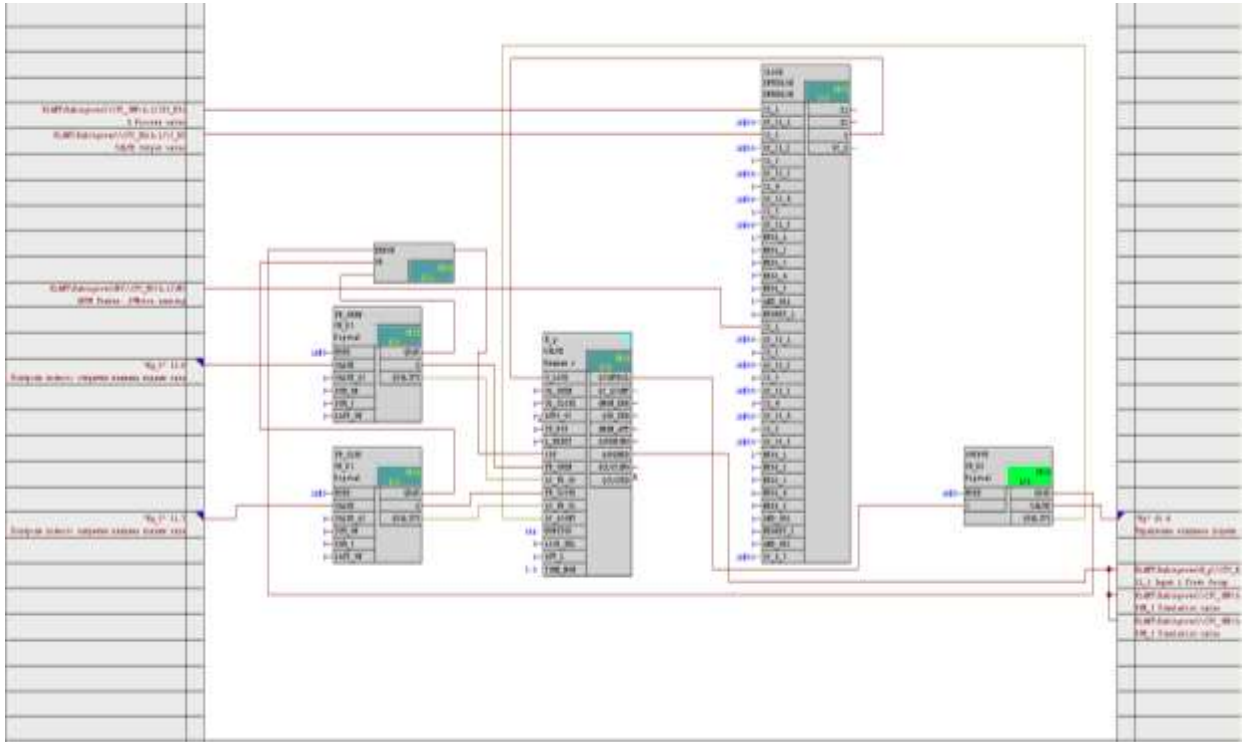
## ДОДАТОК ГЗ

### Щит керування САК котлоагрегатом Е-2,5-0,9 ГМ



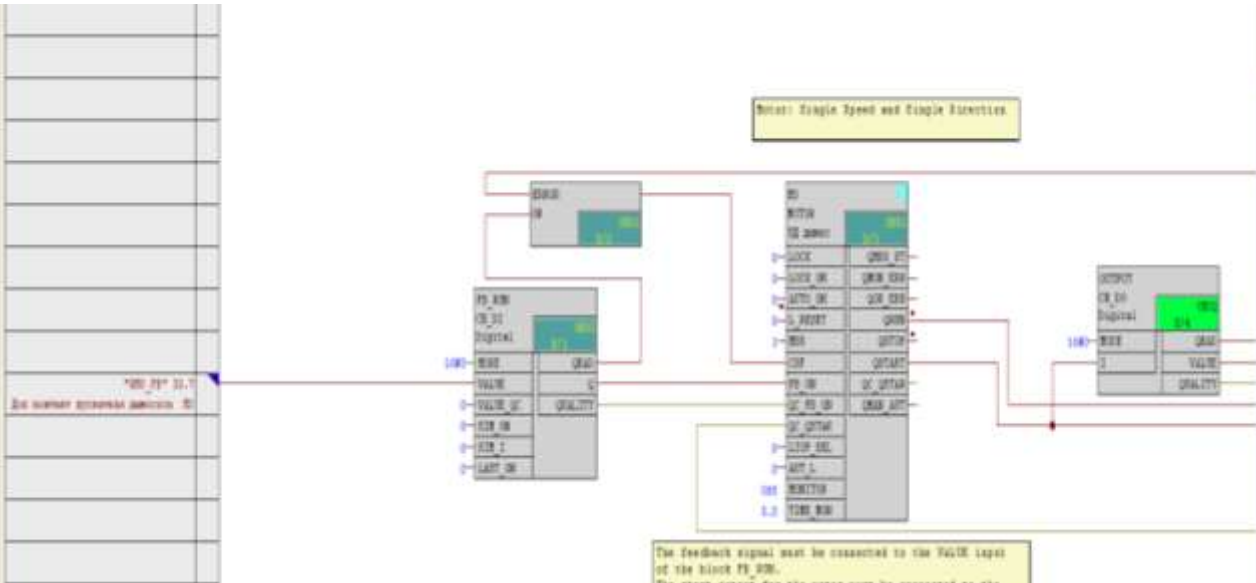
### ДОДАТОК Д1

#### CFC-підпрограма керування клапаном подачі газу



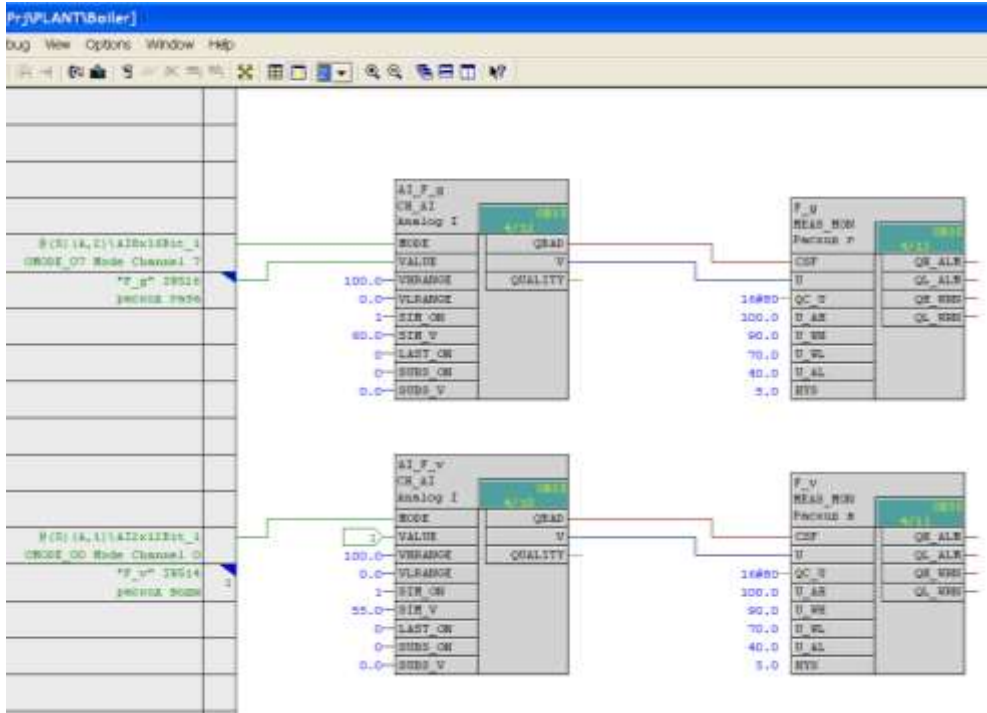
### ДОДАТОК Д2

#### Фрагмент CFC-підпрограми керування електродвигуном приводу вентилятора димососу



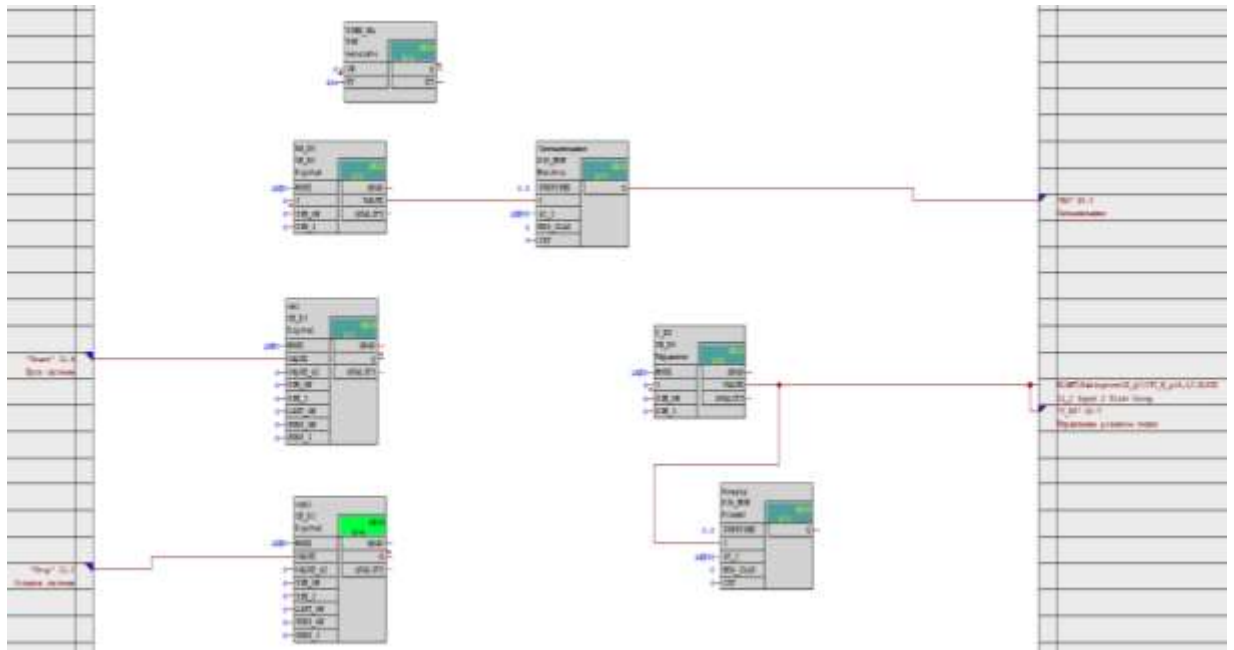
### ДОДАТОК ДЗ

Фрагмент СFC-підпрограми вимірювання витрат газу та пари



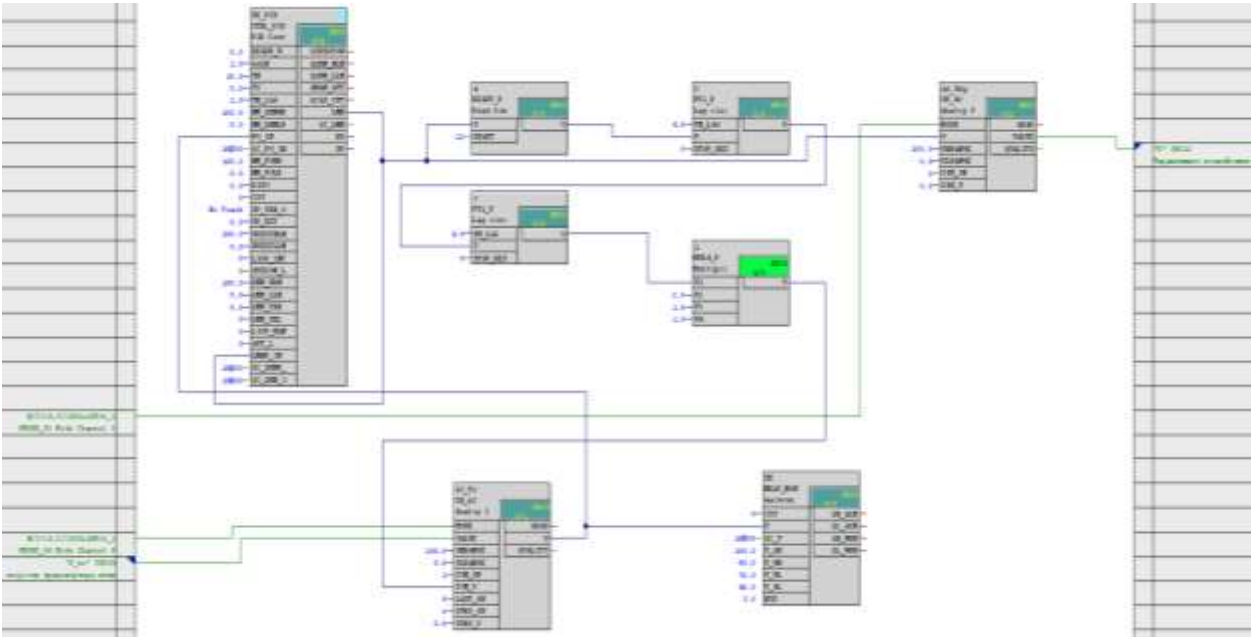
### ДОДАТОК Д4

СFC-підпрограма пуску і зупинки котлоагрегату



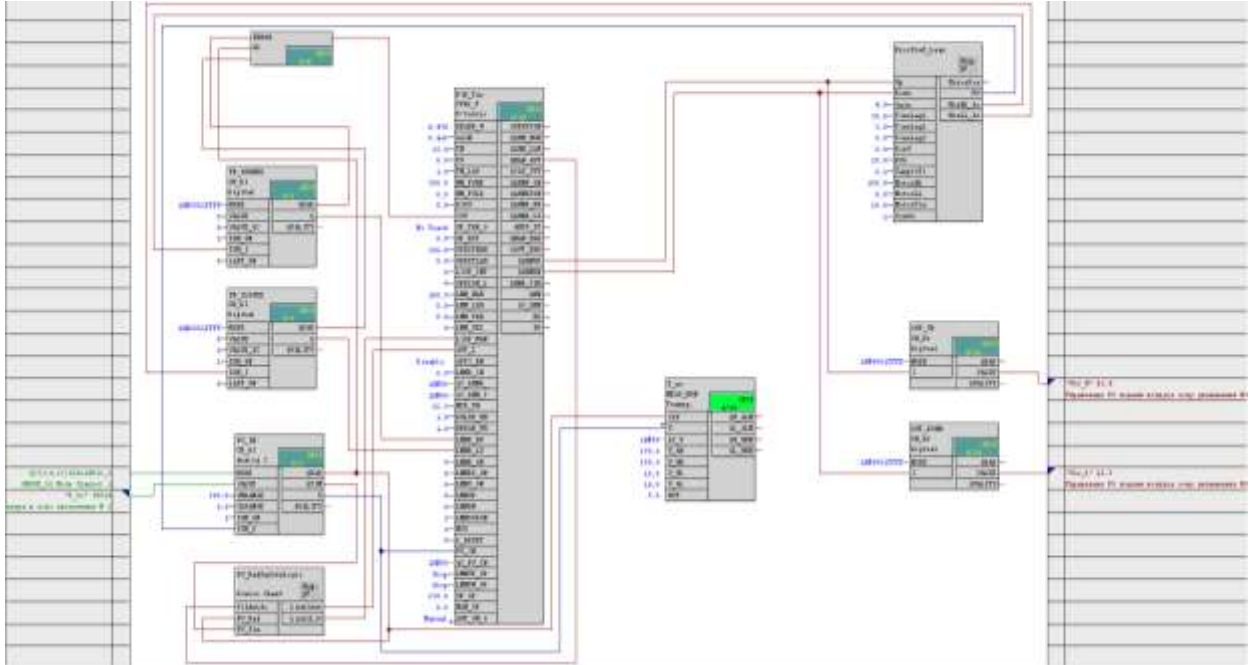
### ДОДАТОК Д5

СFC-підпрограма САК розрідженням у топці котлоагрегату



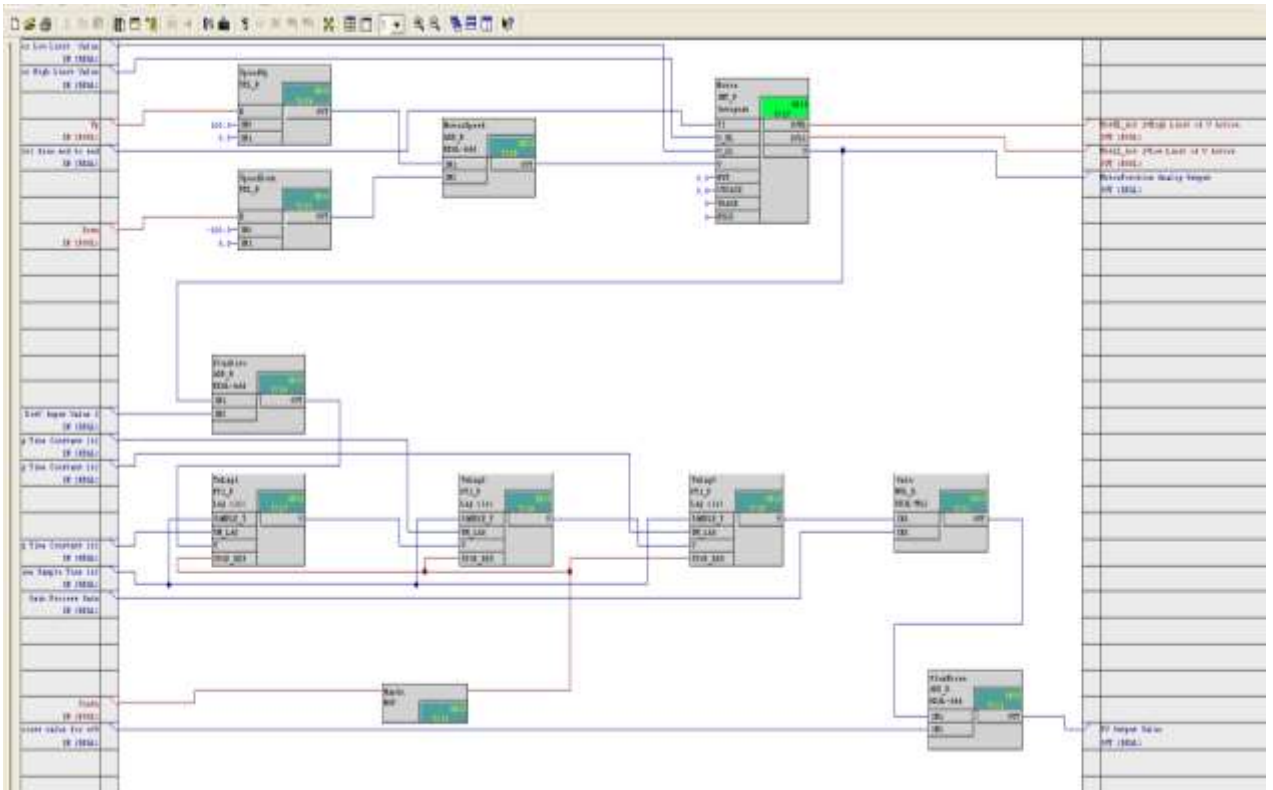
### ДОДАТОК Д6

СFC-підпрограма САК рівня в барабані котла



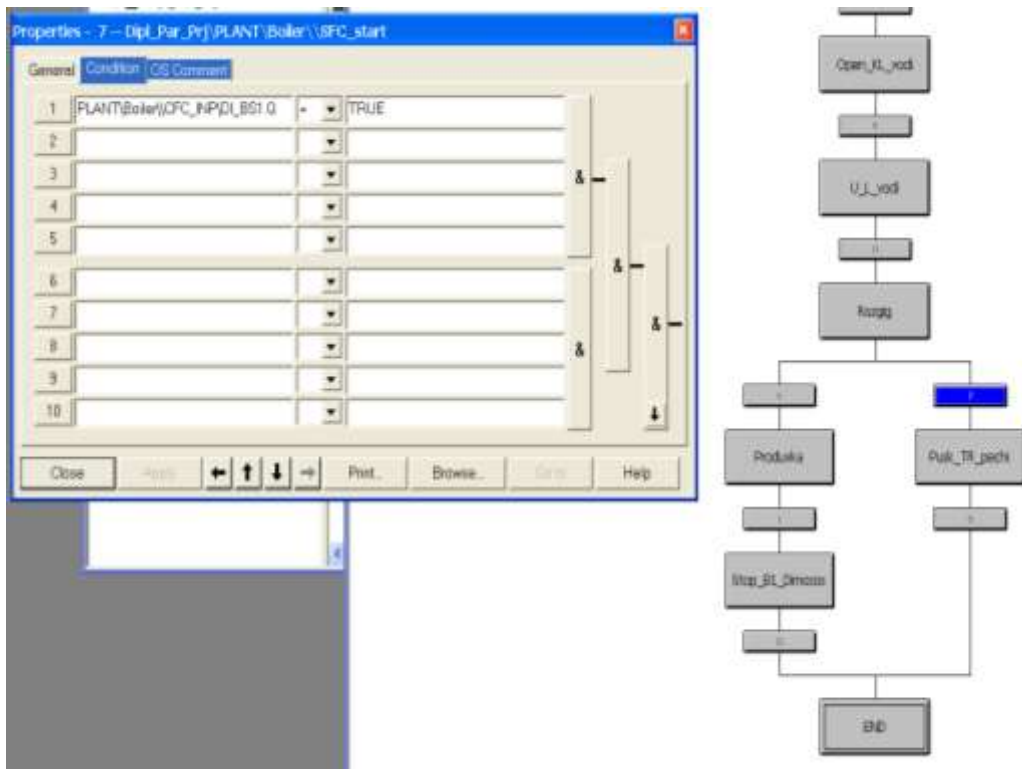
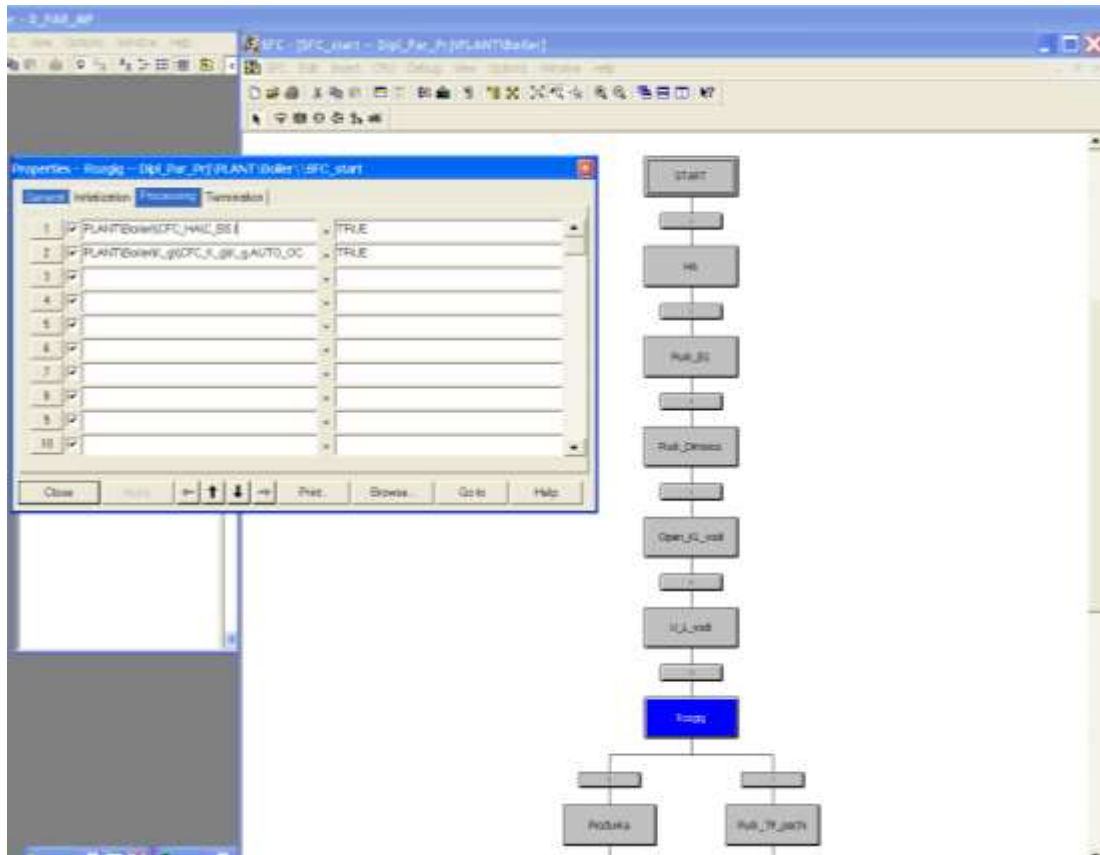
## ДОДАТОК Д7

Фрагмент CFC-програми реалізації внутрішньої структури  
об'єкта керування



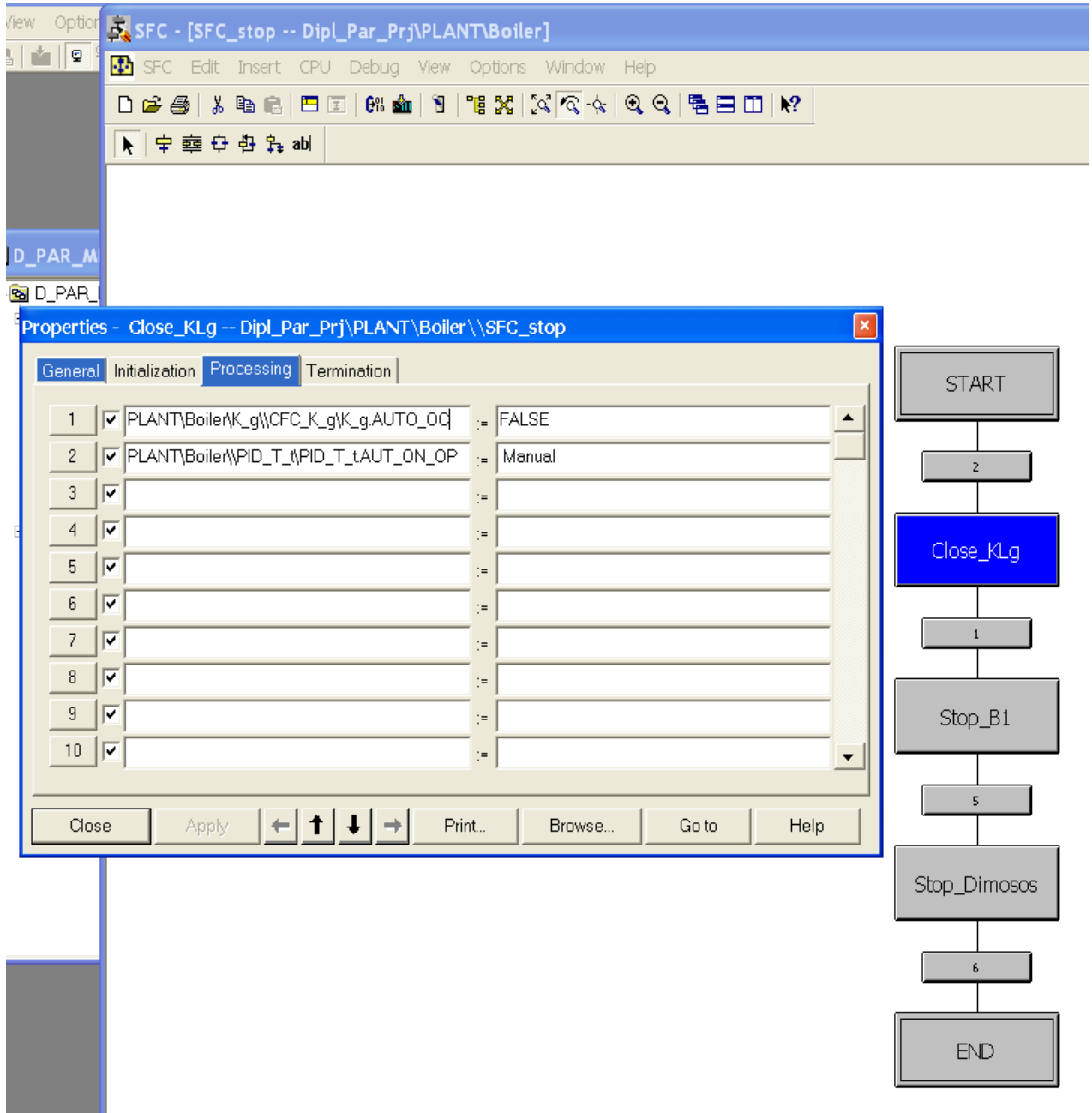
ДОДАТОК Д8

SFC-схема реалізації алгоритму пуску котлоагрегату



### ДОДАТОК Д9

### SFC-схема реалізації алгоритму зупинки котлоагрегату



## ДОДАТОК Е1

## Кошторис КТЗ фірми SIEMENS серії SIMATIC S7-300

Назва	Тип, марка	Кількість	Ціна за одиницю євро (з НДС)	Ціна за од., грн.	Сума, грн.
Контролер мікро-процесорний програмований (з інтерфейсами MPI, PROFIBUS-DP, PN)	CPU 414-3 /6ES7414-3EM05-0AB0, 2.8Мб	1	3211,18	75821,1	75821,1
Мікрокарта пам'яті	S7-400/карта пам'яті /FLASH-EPROM/ 6ES7952-1KM00-0AA0, 4МБайт для S7-400	1	341,3	8059,23	8059,23
Комунікаційний модуль IM153-1	IM153-1 6ES7153-1AA03-0XB0	1	118	2786,17	2786,17
Блок живлення 220/24 В	PS 405/407/6ES7407-0KA02-0AA0 вихід =24В/10А ;	1	341,64	8066,7	8066,7
Модуль вводу-виводу дискретних сигналів	6ES7 323-1BH01-0AA0, SM 323, 8 ВХОДІВ =24В И 8ВИХ. =24В/0.5А, сум. вихідний струм 4а	1	205,11	7007	7007
Модуль аналогового вводу	SM 331 (6ES7331-7KF02-0AB0) 8 ВХОДІВ	1	284,61	6720,1	6720,1
Модуль аналогового виводу	SM 332 (6ES7332-5HD01-0AB0) 4 ВИХОДІВ	1	472,23	14772	14772

ПК	Intel Core i5 3450 (3.1 ГГц) / RAM 4 ГБ / HDD 1 ТБ / NVIDIA GeForce GT630, 2 ГБ / LAN / DVD +/- RW / кард-рідер / Windows XP / клавіатура + мишка	1		5998,2	5998,2
ДБЖ	<u>Back-UPS</u> <u>800VA</u>	1		1204,19	1204,19
З'ЄДНУВАЧІ МОДУЛЬНІ, Фронтальні для сигнальних модулів клем з контактами- защіпками	SIMATIC S7- 300, 20-полюсний 6ES7392-1BJ00- 0AA0	1	11,55	272,83	272,83
	SIMATIC S7- 300, 40-полюсний 6ES7392- 1BM01-0AA0	3	18,28	431,74	1295,22
SCADA	WINCC(ЛИЦЕН V6 Run-Time 28 змінних 6AV6 381- BC06-0EX0	1	1057,5	24969,27	24969,27
Кабельна продукція					1750
Загальна вартість					158722