МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В. ДАЛЯ

Кафедра комп’ютерно-інтегрованих систем управління

Факультет інформаційних технологій та електроніки

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до бакалаврської дипломної роботи

освітній ступінь: бакалавр

спеціальність: 151 - автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему:

«Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі»

Виконав: здобувач вищої освіти

групи АТП-21д  Резнік О.С.

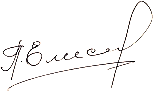
(підпис)

Керівник роботи Лорія М.Г.

(підпис)

Завідувач кафедри Лорія М.Г.

(підпис)

Рецензент  Єлісєєв П.Й.

(підпис)

Київ 2025

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут (факультет): інформаційних технологій та електроніки\_

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_комп’ютерно-інтегрованих систем управління \_\_\_\_\_

(повна назва кафедри)

Освітній ступінь: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_бакалавр\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(бакалавр, магістр)

Спеціальність: \_\_\_\_\_\_\_\_151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології\_\_\_

(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(назва спеціалізації)

|  |
| --- |
| **ЗАТВЕРДЖУЮ**  **Завідувач кафедри КІСУ**  \_\_\_ М.Г. Лорія  “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2025року |

**З А В Д А Н Н Я**

**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

**Резніку Олександру Сергійовичу**

(прізвище, ім’я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Керівник роботи: **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** д.т.н., професор Лорія М.Г.\_**\_\_\_\_**\_**\_\_\_\_\_\_\_\_**\_\_\_\_,

(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджений наказом університету від “19” травня 2025 року №86/17.02\_

**2. Строк подання роботи здобувачем:** 16 червня 2025 року

**3. Вихідні дані до роботи:**

3.1. Технологічний регламент установки на біопаливі

3.2. Інструкція оператора автоматизованої системи управління та контролю.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**

4.1. Вступ

4.2 Аналіз сучасного стану автоматизації економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.3 Технологічна схема енергетичної установки та місце економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі у процесі

4.4 Принцип дії та технічні характеристики економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.5 Огляд сучасних підходів до автоматизації аналогічних економайзерів у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.6 Вимоги до системи автоматичного управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.7 Функціональна схема системи автоматизації економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.8 Інформаційно-логічна схема системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.9 Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.10 Вибір типу системи управління: АСР чи АСК

4.11 Розробка структурної схеми системи автоматизації

4.12 Математичне моделювання процесу керування економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.13 Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB / Simulink (або аналогічному)

4.14 Розрахунок частотних характеристик та перехідних процесів автоматичної системи регулювання

4.15 Розробка алгоритму роботи комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

4.16 Впровадження в SCADA-середовище

4.17 Ефективність функціонування системи та перспективи її застосування

4.18 Порівняльний аналіз характеристик до та після автоматизації

4.19 Технічні переваги впровадженої системи

4.20 Перспективи модернізації та масштабування системи

**5. Перелік графічного матеріалу** (з точним зазначенням обов’язкових креслень):

5.1. Функціональна схеми автоматизації системи управління економайзером.

5.2. Математичні моделі економайзера.

5.3. Структурна схема.

5.4. Графіки перехідних процесів та частотних характеристик системи автоматичного регулювання.

**6. Дата видачі завдання:** 8 травня 2025 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва етапів виконання кваліфікаційної випускної роботи | Строк виконання етапів | Примітка |
| 1 | Аналіз сучасних принципів технологічного процесу та особливостей котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки. | 15.05.25 |  |
| 2. | Аналіз сучасного стану технологічного процесу та особливостей котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки | 20.05.25 |  |
| 3. | Розробка функціональної схеми системи автоматизації котлом-утилізатором | 25.05.25 |  |
| 4. | Синтез одноконтурної системи автоматичного регулювання. | 04.06.25 |  |
| 5. | Теоретичні дослідження системи автоматичного регулювання. | 09.06.25 |  |
| 6. | Математичне моделювання процесу керування котлом-утилізатором | 10.06.25 |  |
| 7. | Оформлення пояснювальної записки бакалаврської дипломної роботи та підготовка презентації. | 12.06.25 |  |

**Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_\_****\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Резнік О.С.

( підпис ) (ініціали і прізвище)

**Керівник дипломного проєкту \_\_\_\_\_\_\_****\_\_\_\_\_\_** Лорія М.Г.

(підпис ) (ініціали і прізвище)

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка ‒ 79 стр., 14 рисунків, 6 таблиць, 26 джерел.

ЕКОНОМАЙЗЕР, БІОПАЛИВО, ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЯ, ТЕПЛООБМІННИК, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПЛК, SCADA, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ПЕРЕДАТНА ФУНКЦІЯ, СТРУКТУРНА СХЕМА, МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB, СТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АСК, HMI, МАСШТАБУВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ІНДУСТРІЯ 4.0.

Об'єктом дослідження є процес теплообміну в економайзері у складі теплогенераційної установки на біопаливі.

Метою бакалаврської дипломної роботи є розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером, яка забезпечує автоматичне регулювання температури теплоносія та підвищення енергоефективності обладнання.

Метод дослідження – теоретичний, з використанням математичного моделювання та програмного середовища matlab/simulink.

У ході роботи проведено аналіз технологічного процесу, обґрунтовано вибір системи управління типу аск, виконано моделювання динаміки об'єкта та розрахунок під-регулятора методом максимальних швидкостей. Розроблено алгоритм функціонування системи, реалізовано функціональну та інформаційно-логічну схеми, виконано впровадження в scada-середовище з оцінкою ефективності та перспектив масштабування.

Зміст

[РЕФЕРАТ 4](#_Toc201324488)

[ВСТУП 7](#_Toc201324489)

[1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕКОНОМАЙЗЕРА У СКЛАДІ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА БІОПАЛИВІ 9](#_Toc201324490)

[1.1. Технологічна схема енергетичної установки та місце економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі у процесі 9](#_Toc201324491)

[1.2. Принцип дії та технічні характеристики економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі 10](#_Toc201324492)

[1.3. Огляд сучасних підходів до автоматизації аналогічних економайзерів у складі теплогенераційної установки на біопаливі 12](#_Toc201324493)

[1.4. Вимоги до системи автоматичного управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі 16](#_Toc201324494)

[1.5. Функціональна схема системи автоматизації економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі 18](#_Toc201324495)

[1.6. Інформаційно-логічна схема системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі 24](#_Toc201324496)

[Висновки до розділу 1 28](#_Toc201324497)

[2. РОЗРОБКА КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОНОМАЙЗЕРА У СКЛАДІ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА БІОПАЛИВІ 31](#_Toc201324498)

[2.1. Вибір типу системи управління: АСР чи АСК 31](#_Toc201324499)

[2.2. Розробка структурної схеми системи автоматизації 32](#_Toc201324500)

[2.3. Математичне моделювання процесу керування економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі 37](#_Toc201324501)

[2.4. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB / Simulink (або аналогічному) 49](#_Toc201324502)

[2.5 Розрахунок частотних характеристик та перехідних процесів автоматичної системи регулювання 53](#_Toc201324503)

[2.6 Розробка алгоритму роботи комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі 59](#_Toc201324504)

[2.7. Впровадження в SCADA-середовище (за наявності) 61](#_Toc201324505)

[Висновки до розділу 2 64](#_Toc201324506)

[3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ 65](#_Toc201324507)

[3.1. Порівняльний аналіз характеристик до та після автоматизації 65](#_Toc201324508)

[3.2. Технічні переваги впровадженої системи 66](#_Toc201324509)

[3.3. Перспективи модернізації та масштабування системи 73](#_Toc201324510)

[3.4. Висновки до розділу 3 74](#_Toc201324511)

[ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК 76](#_Toc201324512)

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 81](#_Toc201324513)

# 

# ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики вимагає впровадження енергоефективних технологій, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів у цій галузі є застосування біопалива в теплогенераційних установках. Перехід на біопаливо дозволяє не лише зменшити залежність від традиційних видів палива, а й істотно скоротити шкідливі викиди в навколишнє середовище.

Однією з ключових задач підвищення енергоефективності таких установок є оптимізація використання тепла димових газів. Для цього в конструкцію теплогенераційних систем включають економайзери — теплообмінники, що використовують залишкову теплоту димових газів для попереднього нагрівання теплоносія. Проте ефективність роботи економайзера значною мірою залежить від якості його управління, особливо в умовах змінних режимів роботи системи.

Розвиток комп’ютерно-інтегрованих технологій створює нові можливості для автоматизації управління процесами в теплогенераційних установках. Впровадження комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером дозволяє підвищити точність регулювання параметрів теплообміну, зменшити теплові втрати, стабілізувати роботу обладнання та підвищити загальну ефективність установки.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності розробки сучасної, надійної та ефективної системи автоматичного управління економайзером на основі комп’ютерно-інтегрованих технологій для теплогенераційної установки, що працює на біопаливі. Така система має враховувати специфіку роботи обладнання, змінні технологічні режими та забезпечувати високий рівень енергоефективності.

Метою дипломної роботи є розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі, яка забезпечить ефективну переробку залишкового тепла та оптимізацію процесів теплообміну.

У рамках роботи передбачається:

* аналіз існуючих технічних рішень у сфері автоматизації економайзерів;
* моделювання процесу теплообміну в економайзері;
* розробка структури комп’ютерно-інтегрованої системи управління;
* вибір програмно-апаратного забезпечення;
* розробка алгоритму роботи системи та її імітаційне моделювання.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в проєктування і модернізацію теплогенераційних установок, що працюють на біопаливі, з метою підвищення їх енергоефективності та екологічності.

# АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕКОНОМАЙЗЕРА У СКЛАДІ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА БІОПАЛИВІ

Успішне функціонування теплогенераційної установки на біопаливі залежить від злагодженої роботи всіх її основних компонентів, серед яких важливе місце займає система утилізації тепла. Особливої уваги вимагає економайзер — теплообмінник, призначений для використання залишкової теплоти димових газів, що утворюються під час згоряння палива. Ефективне включення економайзера у загальний технологічний процес забезпечує не лише підвищення енергоефективності установки, але й сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та викидів у довкілля. Для розуміння принципів його роботи необхідно розглянути місце економайзера в структурі енергетичного комплексу. Нижче наведено узагальнену технологічну схему теплогенераційної установки на біопаливі з урахуванням функціональної ролі економайзера у загальному циклі перетворення енергії.

# 1.1. Технологічна схема енергетичної установки та місце економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі у процесі

Сучасні теплогенераційні установки на біопаливі розробляються з урахуванням необхідності максимально ефективного використання теплоти, яка утворюється внаслідок згоряння органічної маси. Основною метою таких установок є забезпечення теплопостачання споживачів (опалення, гаряче водопостачання, технологічне тепло) з одночасним зниженням енергетичних витрат і негативного впливу на довкілля. [1], [7]

Типова теплова схема установки включає такі основні компоненти: приймально-подаючий механізм біопалива, топку або пальниковий вузол, теплообмінник котла, економайзер, димосос, систему очищення димових газів та комин. Біопаливо (деревна тріска, пелети, агровідходи) подається з бункера через шнековий або ланцюговий транспортер до топки, де відбувається процес згоряння з виділенням тепла. Теплоносій (вода або водяна пара) нагрівається в основному теплообміннику, після чого проходить через економайзер, де додатково підігрівається за рахунок тепла димових газів, які залишають топковий простір.

Економайзер розташовується на виході димових газів із котла перед димососом. Він є трубчастим або оребреним теплообмінником, через який протікає вода або зворотній теплоносій. Його функція полягає в утилізації залишкової теплоти відпрацьованих газів з метою підвищення загального ККД установки та зниження температури викидів у атмосферу. В сучасних установках на біопаливі температура димових газів після камери згоряння може досягати 800–1000 °C, а після економайзера знижуватись до 120–180 °C. [6]

Включення економайзера у технологічну схему дозволяє підвищити ефективність використання палива, скоротити експлуатаційні витрати, зменшити навантаження на основний котел і продовжити термін його служби. Крім того, за допомогою економайзера досягається стабілізація теплового режиму в зворотному контурі, що особливо актуально при змінному тепловому навантаженні.

Таким чином, економайзер є ключовою ланкою технологічного процесу, що поєднує процеси утилізації тепла, стабілізації теплового режиму та підвищення енергоефективності установки в цілому. Автоматизація його роботи — важлива складова загальної системи керування теплогенераційною установкою на біопаливі.

# 1.2. Принцип дії та технічні характеристики економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Економайзер у теплогенераційній установці на біопаливі виконує функцію утилізації залишкової теплоти, яка зберігається у димових газах після основного теплообмінного процесу в котлі. Його принцип дії ґрунтується на використанні температурної різниці між відпрацьованими газами та зворотним теплоносієм для передачі теплоти через теплообмінні поверхні, з метою попереднього нагріву води перед подачею в основний котел або теплоакумулятор.

У загальному випадку економайзер являє собою секцію трубчастого теплообмінника, розташовану у газоході після котла, через яку протікає вода, що підлягає нагріву. Димові гази, проходячи крізь труби або оребрені канали економайзера, передають частину своєї енергії теплоносію. У результаті — вода підвищує свою температуру до рівня, близького до температури в котлі, а димові гази охолоджуються до допустимого значення перед викидом у димову трубу. [11]

Найбільш поширеними є конвективні водогрійні економайзери, конструкція яких базується на пучку сталевих труб із внутрішнім потоком води та зовнішнім омиванням гарячими газами. Для підвищення теплопередачі труби можуть мати оребрення або турбулятори, що сприяє зниженню товщини прикордонного шару. Матеріал виконання труб повинен витримувати температури до 400 °C і бути стійким до хімічної корозії, спричиненої кислотами, які утворюються внаслідок конденсації пари.

Основні технічні характеристики економайзера включають: [25]

* Теплова потужність — залежить від площі теплообмінних поверхонь, температури димових газів та витрати води. У промислових установках на біопаливі цей показник може становити від 50 кВт до кількох МВт.
* Температурний перепад димових газів — від 250–450 °C (вхід) до 120–180 °C (вихід).
* Температура води на вході — 50–70 °C, на виході — до 90–110 °C.
* Площа теплообміну — визначається за розрахунком теплового балансу й складає від 5 до 40 м² у залежності від розмірів установки.
* Пропускна здатність — визначається витратою води (у межах 1–30 м³/год) і витратою димових газів (до 15 000 м³/год).
* Коефіцієнт тепловіддачі — зазвичай знаходиться в межах 20–50 Вт/(м²·К) залежно від чистоти поверхні та швидкості потоків. [1], [6], [7]

У зв’язку з тим, що біопаливо має підвищену вологість та зольність, економайзери в таких установках проєктуються з урахуванням можливого накопичення золи та сажі. Це вимагає впровадження періодичних або безперервних систем очищення, включаючи механічні скребки, імпульсні продувки стисненим повітрям, а також обслуговувані люки для ручного чищення.

У процесі проєктування економайзерів важливу роль відіграє аналіз ризику утворення кислотної корозії, що виникає при зниженні температури нижче точки роси. Щоб уникнути цього явища, система керування повинна обмежувати температуру води на вході, забезпечувати підтримку надлишку повітря в зоні горіння та контролювати вміст кисню у димових газах.

Таким чином, технічні характеристики економайзера та його принцип дії тісно пов’язані з режимом роботи всієї теплогенераційної установки. Ефективність утилізації теплоти димових газів, зменшення витрат палива, стабільність теплового режиму й загальна енергоефективність значною мірою залежать від правильної конструкції економайзера, вибору матеріалів, параметрів потоку та відповідної системи автоматичного керування.

# 1.3. Огляд сучасних підходів до автоматизації аналогічних економайзерів у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Автоматизація економайзерів у сучасних теплогенераційних установках на біопаливі є обов’язковим елементом забезпечення стабільної, ефективної й безпечної роботи системи в умовах змінних режимів горіння та теплового навантаження. Використання біопалива, яке має мінливу теплотворну здатність, підвищену вологість і значну зольність, висуває до систем автоматизації особливі вимоги — передусім до точності, швидкодії, адаптивності та функцій самодіагностики. У відповідь на ці вимоги в промисловій практиці реалізуються різні підходи, які можна класифікувати за рівнем складності, ступенем інтеграції, а також за типом алгоритмічного забезпечення.

Класичні ПІД-системи

Найбільш розповсюдженим підходом є впровадження ПІД-регуляторів для стабілізації температури теплоносія або димових газів. Контролер регулює положення заслінки або швидкість циркуляційного насоса, підтримуючи температуру на виході з економайзера в заданих межах. Такий підхід є достатньо ефективним у простих системах з відносно стабільним тепловим режимом.

Проте у випадку роботи на біопаливі цей метод демонструє обмежену ефективність через високий ступінь флуктуацій температури газів та інерційність процесу. Зафіксовані коефіцієнти ПІД-регулювання не можуть швидко адаптуватися до змінних умов горіння, що призводить до нестабільного режиму, перерегулювань або запізнілої реакції.

Серед ключових підходів до автоматизації економайзерів у складі теплогенераційних установок на біопаливі одне з центральних місць займає вибір алгоритму регулювання температури теплоносія. Найчастіше в промислових умовах застосовуються П, ПІ або ПІД-регулятори. У контексті невеликих установок з відносно передбачуваними навантаженнями та стабільною якістю палива допускається використання П-регулятора, проте для більшості сучасних біоенергетичних систем, які характеризуються високою нестабільністю теплового режиму, ефективнішим є ПІ-регулятор. [2], [3], [4]

Пропорційний (П) регулятор формує керуючий вплив, пропорційний лише поточному відхиленню від заданого значення. Такий підхід дозволяє швидко реагувати на зміну температури, однак не гарантує повного усунення відхилення (стала похибка), оскільки керуюча дія зникає, коли система наближається до уставки. Для економайзера це означає, що температура теплоносія може стабілізуватись на рівні, що не відповідає точно заданому значенню, особливо при динамічній зміні навантаження чи параметрів біопалива.

На відміну від цього, пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор поєднує дві складові — пропорційну та інтегральну. Інтегральна частина забезпечує накопичення помилки в часі, що дозволяє усунути сталу похибку, притаманну П-регулятору. У випадку економайзера це означає, що ПІ-регулятор забезпечить не лише швидке, але й точне регулювання температури на виході, що критично важливо для запобігання перегріву, утворення конденсату або неефективного теплообміну. [10, 20]

Інтегровані модульні рішення

На сучасному етапі значного поширення набули модульні рішення, що постачаються виробниками котельного обладнання або систем автоматизації. Наприклад, модулі Hargassner, Viessmann Vitotronic, Bosch MEC Optimize містять у собі інтегровані функції регулювання, діагностики, автоматичного очищення та ведення архівів. Такі системи забезпечують взаємодію економайзера з пальником, насосною групою, буферними ємностями та центральним тепловим пунктом, що дозволяє досягати комплексної оптимізації теплоспоживання. [17]

Ці модулі часто підтримують роботу з цифровими датчиками (Modbus RTU, 4–20 мА), мають готові алгоритми регулювання й аварійного захисту, а також можливість підключення до SCADA або хмарних платформ. Основна перевага — швидке впровадження, але недоліком є обмежена гнучкість для нетипових сценаріїв або специфічних режимів експлуатації. [5], [10]

Інтелектуальні системи з адаптацією

Новітнім напрямом є розробка інтелектуальних систем керування, що застосовують адаптивні, предиктивні або самообучні алгоритми. Ці системи працюють на основі моделі об’єкта (теплообмінника), використовують попередній аналіз динаміки змін температур, оцінюють ефективність теплообміну, тренди накопичення золи або зниження ККД, а також автоматично коригують уставки регуляторів.

Застосування предиктивного керування (Model Predictive Control) дозволяє враховувати запізнювання в реакції теплообмінника, прогнозувати температуру теплоносія на виході та оптимізувати режим роботи заслінок і насосів. У поєднанні з віртуальними сенсорами (soft sensors), які оцінюють ступінь забруднення або ефективність теплообміну, така система значно підвищує точність і надійність роботи економайзера.

Хмарні та віддалені системи моніторингу

У контексті цифровізації виробництва та розповсюдження технологій Інтернету речей (IoT), дедалі актуальнішими стають системи із віддаленим моніторингом і керуванням. Дані з контролерів економайзера передаються в хмарні сервіси (ABB Ability, Siemens MindSphere, WAGO Cloud), де виконуються аналітика, побудова звітів, виявлення відхилень, а також формуються рекомендації для обслуговування. [5], [10]

Встановлення таких систем дозволяє відмовитись від локального обслуговування, здійснювати контроль за кількома об’єктами одночасно, прогнозувати несправності та вести облік експлуатаційних характеристик теплообмінника.

# 1.4. Вимоги до системи автоматичного управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Система автоматичного управління (САУ) економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі повинна забезпечувати ефективне, безпечне та енергоощадне функціонування обладнання в умовах змінних режимів роботи та властивостей палива. Вимоги до такої системи охоплюють технологічні, функціональні, технічні та експлуатаційні аспекти, які детально розглядаються нижче.

**1.4.1. Технологічні вимоги**

Стабілізація температури теплоносія: САУ повинна підтримувати температуру води на виході з економайзера в межах оптимальних значень, наприклад, 90–110 °C, з допустимими відхиленнями не більше ±5%. Це забезпечує ефективну передачу тепла та запобігає перегріву або недостатньому нагріву теплоносія.

Контроль температури димових газів: необхідно забезпечити охолодження димових газів до температури, що не перевищує 150–180 °C, для максимального використання залишкового тепла та зниження втрат енергії.

Запобігання конденсації: САУ повинна запобігати зниженню температури поверхонь теплообміну нижче точки роси, щоб уникнути конденсації кислотних сполук, які можуть спричинити корозію обладнання.

Адаптація до змін властивостей палива: враховуючи варіативність вологості та зольності біопалива, система повинна адаптувати режими роботи до змінних умов горіння, забезпечуючи стабільність процесу.

**1.4.2. Функціональні вимоги**

Автоматичне регулювання: САУ повинна автоматично регулювати параметри роботи економайзера, зокрема, витрату води та повітря, положення заслінок, швидкість обертання вентиляторів тощо, для підтримки оптимальних умов теплообміну.

Моніторинг та діагностика: система повинна здійснювати безперервний моніторинг ключових параметрів (температури, тиску, витрати), виявляти відхилення від нормальних режимів та проводити діагностику можливих несправностей.

Сигналізація та захист: у разі виникнення аварійних ситуацій (перегрів, перевищення тиску, відмова обладнання) САУ повинна активувати відповідні сигнали тривоги та вживати заходів захисту, включаючи автоматичне відключення системи або її переведення в безпечний режим.

Інтеграція з іншими системами: САУ повинна бути інтегрована з загальною системою автоматизації теплогенераційної установки, забезпечуючи узгоджену роботу всіх її компонентів. [2], [6]

**1.4.3. Технічні вимоги**

Надійність та безперервність роботи: система повинна забезпечувати безперервну роботу в умовах промислової експлуатації, з високою надійністю та мінімальним часом простою.

Стійкість до зовнішніх впливів: обладнання САУ має бути стійким до впливу високих температур, вологи, пилу та інших агресивних факторів, характерних для середовища теплогенераційної установки.

Можливість масштабування та модернізації: конструкція системи повинна передбачати можливість її розширення, модернізації та адаптації до нових вимог без значних витрат часу та ресурсів.

Енергоефективність: САУ повинна сприяти зниженню енергоспоживання установки шляхом оптимізації режимів роботи та мінімізації втрат енергії. [3], [4]

**1.4.4. Експлуатаційні вимоги**

Простота обслуговування: система повинна бути зручною в обслуговуванні, з можливістю швидкого доступу до основних компонентів для проведення технічного обслуговування та ремонту.

Зрозумілий інтерфейс користувача: інтерфейс САУ має бути інтуїтивно зрозумілим, з відображенням основних параметрів роботи, повідомлень про стан системи та інструкцій для оператора.

Навчання персоналу: система повинна супроводжуватися документацією та навчальними матеріалами для підготовки персоналу до її експлуатації та обслуговування.

Відповідність нормативним вимогам: САУ повинна відповідати чинним стандартам та нормативним документам у сфері безпеки, енергетики та охорони навколишнього середовища.

# 1.5. Функціональна схема системи автоматизації економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Функціональна схема системи автоматизації економайзера є логічною і технологічною моделлю, що відображає сукупність взаємопов’язаних елементів керування, їх функціональні зв’язки, послідовність обробки інформації та дій, спрямованих на досягнення заданих параметрів технологічного процесу. У теплогенераційній установці на біопаливі автоматизація економайзера має критичне значення, оскільки дозволяє забезпечити стійкий режим теплоутилізації в умовах змінної якості палива, нестабільного теплового навантаження та підвищеного ризику корозії теплообмінних поверхонь.

**1.5.1. Загальна концепція функціональної схеми**

Основна мета функціональної схеми — забезпечити автоматичне, безперервне та ефективне управління усіма технологічними параметрами, що стосуються роботи економайзера, включаючи: температуру димових газів на вході та виході, температуру і витрату теплоносія, тиск у контурі, ступінь забруднення теплообмінника та режим продувки.

Парогазові установки з вприскуванням пари відкритої схеми зазвичай є установками, що виробляють тільки електроенергію. У ПГУ ВП з конденсацією і поверненням в цикл всієї кількості водяної пари доводиться істотно знижувати температуру вихлопних газів для конденсації з них води. Для цього використовуються газові мережні підігрівачі або інші технічні рішення, а в установці виникає необхідність відпуску тепла зовнішнім споживачам. Таким чином, ПГУ ВП стають установками теплофікації. Теплова схема ПГУ ВП з відведенням парогазової суміші в атмосферу (відкрита схема) приведена на рис. 1.5.1. Основними елементами схем є енергетичні ГТУ і котел-утилізатор, в якому з хімічно очищеної живильної води генерується перегріта пара, що вводиться потім в камеру згорання ГТУ. Повітря і пара нагріваються спалюваним паливом.

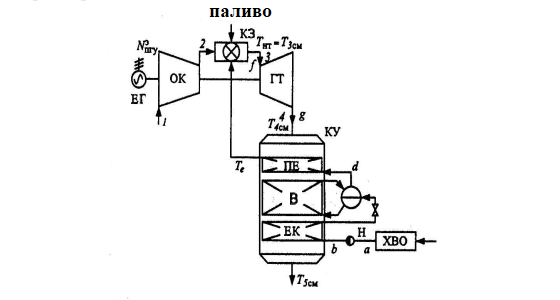


Рис. 1.5.1. - Теплова схема ПГУ ВП відкритого типу: ГТ − газова турбіна; КЗ – камера згорання ГТУ; ЕГ – електрогенератор; ОК – осьовий компресор; КУ – котел-утилізатор; ПЕ – перегрівач; В – випарник; ЕК – економайзер; Н – насос; ХВО – хімічна водоочистка.

Вихлопні гази ГТ охолоджуються на поверхнях нагріву котла-утилізатора і прямують в димар. Утилізація теплоти цих газів обмежується мінімальним значенням температури Tух. Її вплив на характеристики системи виявляється двояко: по-перше, в утворені при низьких температурах конденсату, що викликає корозію, і, по-друге, в появі вихлопного струменя газів підвищеної температури, що породжує пізнішу конденсацію вологи, коли гази, що виходять з труби, змішуються з холоднішим зовнішнім повітрям. З цієї причини зазвичай приймають 135 125... Tух °С. Для підвищення температури перегрітої пари до початкової температури газів доводиться збільшувати кількість спалюваного в камері згорання ГТУ палива, проте надалі це компенсується зростанням потужності газової турбіни в тепловій схемі ПГУ ВП, оскільки присутність перегрітої пари в потоці газів збільшує теплоємність середовища при тому ж перепаді температур. Застосування проміжного пароперегрівача в тепловій схемі на рис. 1.5.1, коли частина потенціалу перегрітої пари спрацьовує за котлом-утилізатором в паровій турбіні, потім знову підігрівається в проміжному пароперегрівачеві і після цього вводиться в камеру згорання ГТУ, підвищує потужність і економічність установки, але приводить до ускладнення конструкції КУ і схеми ПГУ.

Схема реалізується у вигляді багаторівневої системи автоматизації, яка включає:

* Польовий рівень — сенсорні засоби (температурні датчики, витратоміри, датчики тиску);
* Керуючий рівень — програмований логічний контролер (ПЛК), що виконує обробку сигналів та реалізує алгоритми регулювання;
* Виконавчий рівень — серводвигуни, насосне обладнання, заслінки, клапани;
* Операторський рівень — HMI або SCADA для візуалізації, моніторингу та налаштування системи.

Усі ці рівні з’єднані між собою індустріальними мережами (Modbus, Profibus, OPC UA) і діють як єдина цілісна система. [1], [5]

**1.5.2. Опис основних функціональних вузлів**

Вимірювальні підсистеми.

До складу вимірювального блоку входять:

* Датчики температури типу Pt100 — на вході й виході теплоносія, а також у димовому каналі до та після економайзера.
* Витратоміри електромагнітного типу або ультразвукові — для вимірювання витрати води.
* Датчики тиску — для контролю стабільності тиску в системі.
* Газоаналізатори — для визначення вмісту O₂ у димових газах, що дозволяє оцінити ефективність згоряння та вплив на теплообмін.

Керуючий блок (ПЛК).

Контролер виконує такі функції:

* Збір та попередня обробка сигналів з польового рівня.
* Порівняння фактичних значень параметрів з заданими уставками.
* Реалізація алгоритмів ПІД-регулювання температури теплоносія.
* Розрахунок похідних і трендів — для реалізації адаптивного управління.
* Генерація аварійних сигналів у разі перевищення граничних значень або виявлення несправностей.
* Комунікація з вищими рівнями (SCADA, ERP, енергоменеджмент). [5], [10]

Виконавчі пристрої.

Сигнали, сформовані ПЛК, подаються на:

* Моторизовані клапани регулювання витрати води;
* Заслінки на димових каналах для керування швидкістю проходження газів;
* Частотні перетворювачі циркуляційних насосів;
* Системи продувки (імпульсне очищення теплообмінника стисненим повітрям або механічними щітками).

Операторський інтерфейс.

На панелі оператора відображаються:

* Поточні значення температур, тиску, витрати;
* Стан виконавчих механізмів;
* Повідомлення про аварії або попередження;
* Історичні графіки та архіви даних;
* Меню налаштування уставок, запуску та зупинки режимів.

**1.5.3. Алгоритм функціонування системи**

Функціональна схема реалізує замкнене управління з багатьма петлями зворотного зв’язку. Система працює за наступною послідовністю:

* Датчики фіксують температуру води на виході з економайзера та температуру димових газів.
* ПЛК порівнює ці значення з уставками та визначає відхилення.
* Залежно від величини відхилення ПЛК подає керуючий сигнал на клапани, насоси або заслінки.
* Якщо фіксується тренд зростання температури димових газів без підвищення температури води — система формує сигнал про забруднення поверхонь та активує продувку.
* У випадку перевищення температури теплоносія чи відсутності витрати води активується захисна процедура — зупинка системи або переведення в безпечний режим.
* Усі дані записуються у внутрішню пам’ять або SCADA для подальшого аналізу.

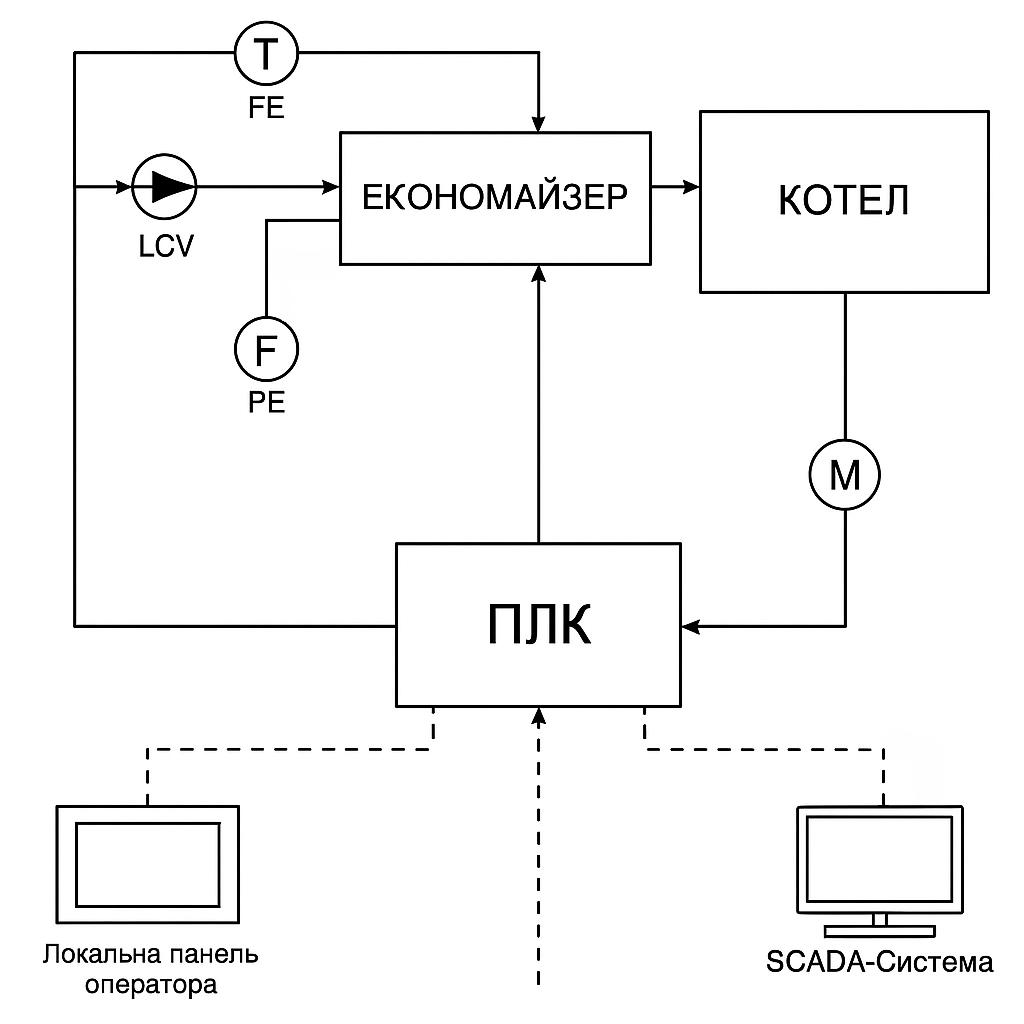


Рис. 1.5.2 - Функціональна схема,

де ПЛК – програмований логічний контролер, LCV – регулюючий клапан витрати теплоносія, T – температурний датчик, F – витратомір, М – мотор, виконавчий механізм.

**1.5.4. Переваги функціонального підходу**

Такий підхід до побудови функціональної схеми має ряд важливих переваг:

* Гнучкість: можливість адаптації до будь-якого типу економайзера та виду біопалива;
* Масштабованість: система легко розширюється для додаткових контурів або обладнання;
* Діагностичність: аналіз трендів та параметрів дозволяє здійснювати превентивне технічне обслуговування;
* Безпека: реалізація алгоритмів самозахисту запобігає виходу обладнання з ладу;
* Енергоефективність: постійне коригування режимів дає змогу економити паливо та зменшувати втрати.

# 1.6. Інформаційно-логічна схема системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Інформаційно-логічна схема (ІЛС) є важливою складовою частиною проєктування автоматизованих систем керування технологічними об’єктами. У випадку теплогенераційної установки на біопаливі ІЛС визначає структуру обробки сигналів, логіку взаємодії між елементами системи, а також принципи побудови зворотних зв’язків і логіки прийняття рішень. Її мета — забезпечити ефективну, надійну та адаптивну роботу системи керування економайзером як ключовим елементом процесу утилізації тепла.

**1.6.1. Призначення та значення ІЛС**

Інформаційно-логічна схема унаочнює алгоритм функціонування системи, починаючи від надходження первинної інформації з датчиків, її обробки у програмованому логічному контролері, формування керуючих дій і завершуючи поданням зворотного зв’язку оператору. На відміну від функціональної схеми, яка описує фізичне розташування компонентів, ІЛС концентрується на логічній послідовності подій, взаємозв’язку даних та умов активації певних функціональних блоків системи.

У теплогенераційних установках, що працюють на біопаливі, ІЛС набуває особливого значення через високу мінливість умов роботи: непостійна теплотворна здатність палива, нестабільна температура димових газів, різка зміна теплового навантаження, схильність до забруднення теплообмінних поверхонь. Усі ці фактори вимагають побудови логічної моделі з високим рівнем адаптивності, резервування і захисту.

**1.6.2. Структурні компоненти інформаційно-логічної схеми**

У типових системах керування економайзером ІЛС складається з трьох логічних рівнів:

1. Інформаційний рівень — забезпечує первинний збір технологічних параметрів:

* Температура води на вході та виході з економайзера (Tвх, Tвих);
* Температура димових газів до і після економайзера (Tг1, Tг2);
* Витрата теплоносія (Q);
* Тиск у системі (P);
* Сигнали стану виконавчих механізмів (відкриття клапанів, робота насосів, положення заслінок);
* Аварійні сигнали (відсутність потоку, перевищення температури, зниження тиску).

1. Логічний рівень обробки — реалізується у ПЛК і включає:

* Алгоритми регулювання: ПІД-регулятори для підтримання температури води;
* Логіку безпеки: умови аварійного зупинення, черговість активації функцій;
* Умови очищення: запуск продувки за критерієм зниження теплового градієнта або підвищення температури димових газів;
* Блок адаптації: коригування регулювання на основі динаміки вхідних параметрів (наприклад, тренду зміни температури палива);
* Систему архівації: накопичення значень параметрів із заданим інтервалом для аналізу та діагностики. [2], [5], [6]

1. Рівень представлення та взаємодії з оператором:

* Графічне відображення поточних параметрів;
* Вивід повідомлень і попереджень;
* Формування звітів;
* Інтерактивне налаштування уставок;
* Реєстрація дій оператора та доступу. [5]

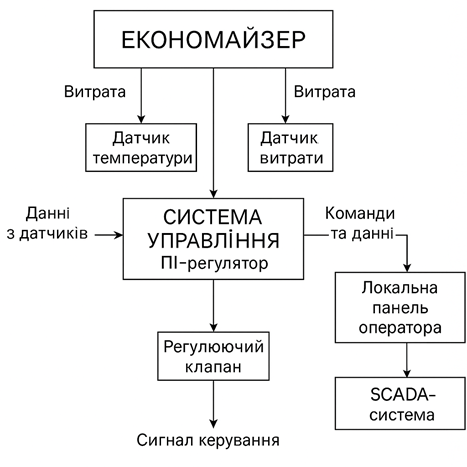


Рис. 1.6 - Структурно-логічна схема

**1.6.3. Типова логіка роботи системи**

На основі ІЛС реалізується послідовна логіка функціонування системи автоматичного керування:

* Збір і обробка вхідних сигналів. Усі вимірювальні пристрої надсилають сигнали до ПЛК, де вони перетворюються в цифровий формат і перевіряються на допустимі межі. Невірогідні або аварійні значення маркуються.
* Аналіз поточних значень. Контролер обчислює відхилення температури води на виході від заданого значення. Якщо відхилення перевищує допустиму межу, активується модуль керування.
* Формування керуючих дій. ПЛК формує сигнал для виконавчого механізму — наприклад, на регулюючий клапан або насос, із метою змінити витрату води через економайзер.
* Моніторинг зворотного зв’язку. Відстежується реакція системи: чи змінюється температура відповідно до очікуваної, чи працює насос, чи не зафіксовано протікання або перевищення тиску.
* Реакція на події. У випадку аномальних подій (раптове зростання температури димових газів, відсутність витрати, спрацювання аварійного датчика) система переходить у режим захисту — зупинка циркуляції, сповіщення оператора, блокування подальших дій.
* Архівація. Ключові параметри записуються з інтервалом 5–10 секунд у базу даних. У разі потреби оператор може переглянути графіки, тренди та порівняти режими роботи системи.

На рис. 1.6.1 наведено інформаційно-логічну схему кожухотрубного теплообмінника як об'єкта управління.

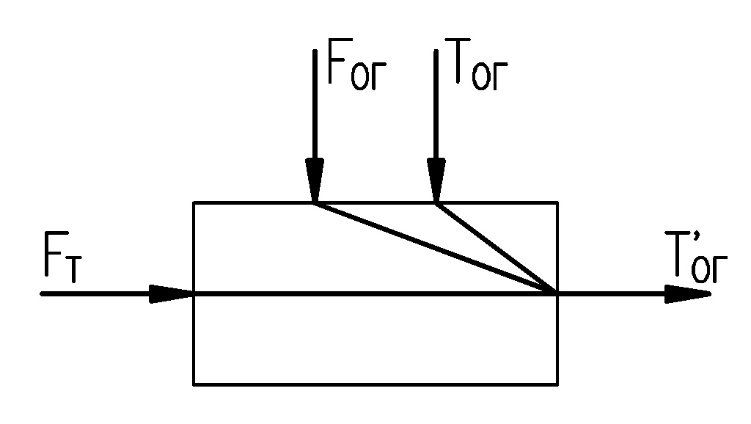


Рис 1.6.1 – Інформаційно-логічна схема кожухотрубного теплообмінника як об'єкта управління

Вхідні параметри:

* FТ - масова витрата теплоносія (пара) на вході в теплообмінник, кг/с.

Обурювальні параметри:

* FОГ - масова витрата відпарного газу на вході в теплообмінник, кг/с;
* TОГ – температура відпарного газу на вході в теплообмінник, оС.

Вихідні параметри:

* T'ОГ – температура відпарного газу на виході з теплообмінника, оС.

Теплота передається на дві стадії:

* від теплоносія трубкам, якими проходить відпарний газ;
* від трубок відпарного газу.

**1.6.4. Переваги побудови інформаційно-логічної моделі**

Інформаційно-логічна схема дозволяє не лише наочно відобразити логіку системи, але й:

* Забезпечити підвищену надійність за рахунок чітко визначених умов і черговості спрацьовування;
* Реалізувати модульність і масштабованість, що спрощує адаптацію системи під нові типи обладнання;
* Визначити чіткі точки контролю та діагностики, що підвищує ефективність технічного обслуговування;
* Забезпечити високий ступінь автоматизації, мінімізуючи людський фактор;
* Оптимізувати експлуатаційні витрати за рахунок вчасного очищення теплообмінника і динамічного регулювання потужності.

# Висновки до розділу 1

У результаті аналізу сучасного стану технологічного процесу та особливостей функціонування економайзера у складі теплогенераційної установки на біопаливі зроблено низку важливих висновків.

По-перше, встановлено, що економайзер відіграє критично важливу роль у загальній енергетичній ефективності установки. Його основне призначення полягає в утилізації залишкової теплоти димових газів після згоряння біопалива, що дозволяє зменшити питомі витрати палива, знизити температуру викидів та покращити екологічні показники.

По-друге, визначено конструктивні та експлуатаційні особливості економайзерів, які працюють у складі установок на біомасі. Серед них — підвищені вимоги до стійкості матеріалів до корозії, наявність засобів очищення теплообмінних поверхонь, а також необхідність захисту від утворення кислотного конденсату в умовах роботи з вологим паливом.

По-третє, проаналізовано сучасні підходи до автоматизації економайзерів. Встановлено, що найбільш ефективними є інтегровані системи, які використовують програмовані логічні контролери, датчики температури, тиску, витрати та елементи предиктивного управління з адаптацією до змін режиму роботи. Такі системи забезпечують не лише регулювання основних параметрів, але й діагностику стану обладнання, оптимізацію режимів очищення та збирання статистичних даних.

По-четверте, визначено вимоги до системи автоматичного управління економайзером. До них належать: надійність, гнучкість, швидкодія, адаптивність до змінних умов та можливість інтеграції в загальну систему керування теплогенераційною установкою. Система повинна забезпечувати стабільну роботу при змінному навантаженні, враховувати характеристики палива і забезпечувати захист від аварій.

По-п’яте, сформовано функціональну та інформаційно-логічну схеми автоматизованої системи управління. Функціональна схема визначає структуру апаратної взаємодії елементів системи, тоді як інформаційно-логічна схема відображає алгоритмічну послідовність обробки даних, прийняття рішень та формування керуючих дій у ПЛК. Разом ці схеми забезпечують цілісне бачення побудови системи та є основою для реалізації технічного проєкту автоматизації.

У підсумку слід зазначити, що впровадження сучасної автоматизованої системи керування економайзером є необхідною умовою для забезпечення ефективної, стабільної та екологічно безпечної роботи теплогенераційної установки на біопаливі. Проведений аналіз створює обґрунтовану основу для переходу до етапу розробки проєкту комп’ютерно-інтегрованої системи управління, що є предметом наступного розділу дипломної роботи.

# РОЗРОБКА КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКОНОМАЙЗЕРА У СКЛАДІ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА БІОПАЛИВІ

# 2.1. Вибір типу системи управління: АСР чи АСК

У процесі розробки комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі одним із перших та принципових рішень є вибір концептуального типу системи управління — автоматичне регулювання (АСР) чи автоматичне системне керування (АСК). Цей вибір визначає склад, ієрархію, функціональні можливості й гнучкість майбутньої системи, а також рівень її інтеграції у загальну інфраструктуру автоматизації підприємства. [1]

Автоматична система регулювання (АСР) — це система, що виконує регулювання одного або декількох технологічних параметрів у межах одного локального контуру. У контексті економайзера це може бути система, яка підтримує температуру теплоносія на виході за заданою уставкою, коригуючи, наприклад, витрату води або положення заслінки димових газів. АСР характеризується простою структурою, високою швидкодією, але обмеженою гнучкістю та відсутністю централізованого управління при зміні зовнішніх умов або взаємодії з іншими підсистемами установки. [22]

Автоматична система керування (АСК), у свою чергу, є більш комплексним рішенням, що передбачає ієрархічну побудову, координацію кількох АСР, взаємодію з суміжними підсистемами, а також можливість адаптації до змін умов функціонування. АСК зазвичай включає в себе елементи обробки інформації, оптимізації, самодіагностики, архівування даних та обміну інформацією з вищими рівнями управління (SCADA, MES, ERP).

У разі управління економайзером, що працює у складі теплогенераційної установки на біопаливі, перевага надається саме АСК, що зумовлено рядом факторів:

1. Висока динамічність процесу — зміни в теплотворній здатності біопалива, вологість, непостійне навантаження створюють складну динаміку, що потребує багатоканального управління і координації з іншими вузлами системи (пальниковий блок, контури ГВП тощо).
2. Потреба в інтеграції — економайзер повинен взаємодіяти з котлом, насосною групою, системами очищення та охолодження, що вимагає централізованого управління та обміну даними.
3. Наявність вимог до архівації і звітності — у рамках енергоменеджменту необхідно фіксувати температуру, витрати, енергетичні показники для оцінки ККД та виявлення відхилень.
4. Забезпечення надійності і безпеки — АСК дозволяє реалізовувати більш гнучку систему аварійного захисту та дублювання функцій, що критично для безперервної роботи котельні.

Таким чином, у рамках даної дипломної роботи доцільно застосувати автоматичну систему керування (АСК), яка інтегрує функції автоматичного регулювання, збору та обробки інформації, діагностики, взаємодії з SCADA та оптимізаційного керування. Побудова такої системи забезпечить стабільну й ефективну роботу економайзера в умовах нестабільних режимів горіння біопалива, дозволить зменшити витрати, покращити обслуговування обладнання та підвищити загальну енергоефективність теплогенераційної установки. [5], [6], [10]

# 2.2. Розробка структурної схеми системи автоматизації

Структурна схема є базовим елементом проєктування автоматизованої системи управління (АСУ), що визначає її загальну архітектуру, взаємозв’язки між компонентами та рівні управління. У контексті керування економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі структурна схема відображає взаємодію сенсорів, контролерів, виконавчих пристроїв, операторських інтерфейсів та систем зберігання і аналізу даних. Вона дозволяє візуалізувати логіку функціонування системи, визначити її компонування, забезпечити масштабованість та гнучкість на майбутнє. [1], [2], [6]

**2.2.1. Загальна концепція структури системи**

В основі побудови структури автоматизації покладено ієрархічний принцип з розподілом на три логічних рівні:

* Польовий рівень (Sensor/Actuator Level) — забезпечує безпосередню взаємодію з технологічним середовищем через засоби первинного вимірювання (датчики температури, тиску, витрати) та виконавчі пристрої (заслінки, клапани, насоси).
* Рівень керування (Control Level) — представлений програмованим логічним контролером (ПЛК), що реалізує алгоритми регулювання, логіки, аварійного захисту, самодіагностики. Саме цей рівень є центральним у системі прийняття рішень на основі обробки сигналів із польового рівня.
* Рівень візуалізації та диспетчеризації (SCADA/HMI Level) — забезпечує взаємодію з оператором, візуалізацію процесу, збирання статистики, формування звітності, архівацію даних та віддалений моніторинг. [6], [7]

**2.2.2. Основні компоненти структурної схеми**

Автоматичні системи регулювання можуть бути простими та складними. Простими називаються такі АСР, які мають замкнутий або розімкнений контур для проходження однієї регулюючої дії. АСР, які мають два і більше контурів проходження різних характером регулюючих дій, називаються складними. Регулююча дія може бути введена оператором, програмованим або мікропроцесорним приладом, а також безпосередньо за рахунок зміни факторів, що впливають, що являють собою сильні обурення.

Найпростішою АСР є одноконтурна, яка має один замкнутий або розімкнений контур. АСР, що має один замкнутий контур з негативним зворотним зв'язком, називається АСР за відхиленням.

На рис. 2.1.1 наведено структурну схему одноконтурної автоматичної системи регулювання за відхиленням.

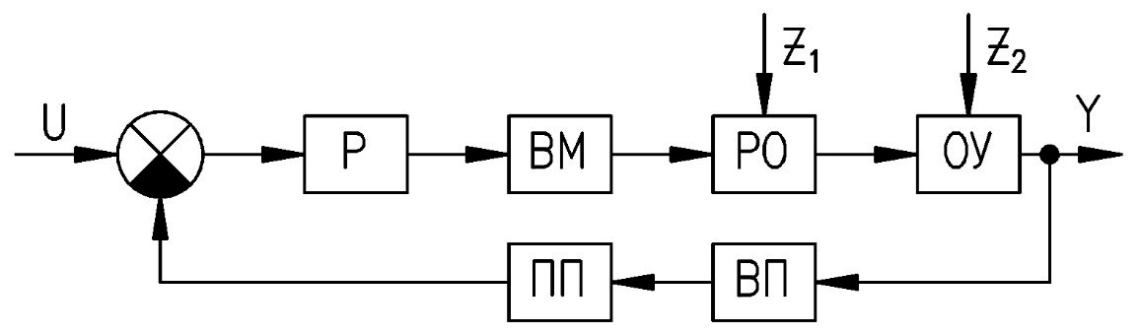


Рис. 2.1.1 - Структурна схема одноконтурної АСР щодо відхилення

де Р – регулятор, ВМ – виконавчий механізм, РО – регулюючий орган,

ОУ - об'єкт управління, ВП - вимірювальний перетворювач, ПП - проміжний перетворювач.

АСР за відхиленням призначена для відтворення величини керованої координати згідно з завданням, яке задається оператором або відповідною програмою за допомогою приладу завдання або програматора. Основним елементом такої системи є регулятор.

АСР, яка має один розімкнений контур, називається АСР з обурення.

На рис. 2.1.2 наведено структурну схему одноконтурної автоматичної системи регулювання з обурення.

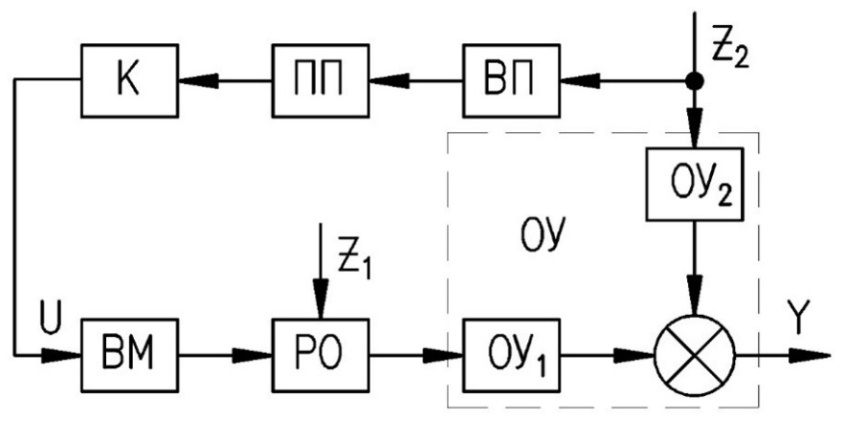


Рисунок 2.1.2 - Структурна схема одноконтурної АСР щодо обурення

де К – компенсатор, ПП – проміжний перетворювач, ВП – вимірювальний перетворювач, ОУ1,2 – об'єкти управління, РО – регулюючий орган, ВМ – виконавчий механізм.

АСР з обурення призначена для зменшення впливу того чи іншого найбільш значущого фактора, що обурює. Основним елементом такої системи є компенсатор.

Використання одноконтурних систем у часто не забезпечує високої якості перехідного процесу. Тому з метою підвищення якості регулювання об'єктів управління необхідно розробляти і застосовувати більш складні комбіновані, каскадні, каскадно-комбіновані системи.

Вимірювальні засоби:

* Датчики температури на вході та виході з економайзера (Pt100 або термопари);
* Витратоміри для водяного контуру (електромагнітного типу);
* Датчики тиску (аналогові або цифрові);
* Газоаналізатори для оцінки складу димових газів (вміст O₂).

Контролер управління: [21], [23]

* ПЛК (наприклад, Siemens S7-1200, WAGO 750-8212 або ОВЕН ПЛК110);
* Виконує ПІ або ПІД-регулювання температури;
* Реалізує аварійний захист, логіку запуску/зупинки, керування режимами очищення.

Виконавчі пристрої:

* Моторизовані клапани подачі води;
* Заслінки регулювання потоку димових газів;
* Частотні перетворювачі насосів;
* Механізми продувки (імпульсна подача стисненого повітря).

Операторський інтерфейс:

* Панель HMI або SCADA-станція (наприклад, Weintek, WinCC або TRACE MODE);
* Графічна візуалізація системи;
* Меню налаштувань та журнал подій.

Зовнішні з’єднання: [5], [10]

* Протоколи обміну (Modbus TCP, OPC UA, Ethernet/IP);
* Інтеграція з ERP або хмарною системою моніторингу енергоспоживання;
* Віддалений доступ для діагностики та технічної підтримки.

**2.2.3. Опис логіки взаємодії між компонентами**

Структура системи побудована таким чином, щоб забезпечити повний цикл: вимірювання → аналіз → керування → зворотний зв'язок. Алгоритм роботи виглядає наступним чином:

* Датчики вимірюють температуру димових газів і теплоносія.
* Сигнали надходять до ПЛК, де виконується порівняння з уставками.
* Контролер формує керуючі дії: змінює положення клапанів, керує швидкістю насосів або активує продувку.
* Виконавчі механізми змінюють параметри процесу.
* Результати відстежуються через сенсори, і цикл повторюється.

Паралельно, вся інформація передається до HMI або SCADA-системи, де відображається у вигляді графіків, таблиць, а також записується до архіву.

**2.2.4. Переваги обраної структурної побудови**

Модульність: дозволяє легко масштабувати систему, додавати нові функції або змінювати склад обладнання.

Гнучкість: забезпечує можливість адаптації алгоритмів регулювання під різні режими роботи.

Надійність: завдяки чітко розмежованій архітектурі та використанню промислових стандартів.

Простота експлуатації: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та логічно побудована система підвищують зручність обслуговування.

Інтегрованість: система може взаємодіяти з іншими енергетичними або інформаційними підсистемами.

# ****2.3. Математичне моделювання процесу керування економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі****

Математичне моделювання є важливим етапом розробки автоматизованої системи управління, оскільки дозволяє на етапі проєктування оцінити динаміку об’єкта керування, дослідити вплив різних збурень, визначити оптимальні режими роботи та обрати адекватні алгоритми регулювання. У даному підрозділі розглянуто побудову математичної моделі економайзера як теплообмінного об’єкта, що функціонує в умовах змінного навантаження та нестабільних властивостей біопалива.

**2.3.1. Мета моделювання**

Метою математичного моделювання є створення динамічної моделі, яка описує зміну температури теплоносія на виході з економайзера залежно від:

* температури димових газів на вході;
* температури та витрати води (теплоносія);
* геометричних і фізичних параметрів теплообмінника.

Також модель повинна враховувати інерційність теплообміну, теплові втрати, затримки у відповіді та можливу зміну ефективності внаслідок забруднення теплообмінних поверхонь.

**2.3.2. Розробка математичних моделей об’єкта керування**

Математична модель кожухотрубного теплообмінника, наведеного на рис. 2.1.

Тепловий баланс

(2.1)

де

– кількість теплоти, що надходить із теплоносієм, кДж;

- масова витрата теплоносія на вході в теплообмінник, кг/с;

- питома теплоємність теплоносія на вході в теплообмінник, кДж//кг · ОС;

– температура теплоносія на вході в теплообмінник, ОС;

– температура теплоносія на виході з теплообмінника, ОС;

t - час, с;

– кількість теплоти, що накопичується у матеріалі трубок, кДж;

– маса трубок, кг;

– питома теплоємність трубок, кДж/кг · ОС;

– температура стінок трубок, ОС;

– кількість теплоти, що відбирається відпарним газом від стінок трубок, кДж;

– коефіцієнт віддачі теплоти відпарному газу стінками трубок, кДж/м2  · · с · оС;

– поверхня трубок, м2;

– температура відпарного газу на виході з теплообмінника, оС;

– кількість теплоти, що надходить із відпарним газом, кДж;

- масова витрата відпарного газу на вході в теплообмінник, кг/с;

– питома теплоємність відпарного газу на вході в теплообмінник, кДж//кг · оС;

– температура відпарного газу на вході в теплообмінник, ОС;

– кількість теплоти, що накопичується у відпарному газі, кДж;

– маса відпарного газу, кг;

– питома теплоємність відпарного газу на виході з теплообмінника, кДж/кг · оС;

– кількість теплоти, що відбирається відпарним газом, кДж;

– кількість теплоти, що відбирається довкіллям з поверхні теплообмінника, кДж;

– коефіцієнт віддачі теплоти в навколишнє середовище поверхнею теплообмінника, кДж/м2 · с · оС;

S – поверхня теплообмінника, м2;

– середня температура навколишнього середовища, оС.

Якщо теплообмінник має теплову ізоляцію, то кількість теплоти, що відбирається навколишнім середовищем з поверхні теплообмінника , незначна і становить 3 ÷ 5 % кількості теплоти, що приходить з теплоносієм .

Підставляємо (4.2) ÷ (4.8) у (2.1) і отримуємо систему рівнянь теплового балансу в розгорнутому вигляді

Перше рівняння системи (2.9) описує кількість теплоти теплоносія (пара), друге – кількість теплоти продукту, що нагрівається (відпарного газу).

Ділимо систему рівнянь (2.9) на dt

Так як теплообмінник має теплову ізоляцію, значить втрати теплоти dqОС незначні і ними можна знехтувати. При допустимих відхиленнях температури зміни питомих теплоємностей , , незначні і можна також знехтувати. Коефіцієнт віддачі теплоти в довкілля поверхнею теплообмінника також незначний.

Постійні параметри:

- - питома теплоємність теплоносія на вході в теплообмінник, кДж//кг · оС;

- - температура теплоносія на вході в теплообмінник, оС;

- – температура теплоносія на виході з теплообмінника, оС;

- - маса трубок, кг;

- - поверхня трубок, м2;

- - маса відпарного газу, кг.

Змінні параметри:

- - температура відпарного газу на вході в теплообмінник, оС;

- - температура стінок трубок, оС;

- – температура відпарного газу на виході з теплообмінника, оС;

- - масова витрата відпарного газу на вході в теплообмінник, кг/с;

- - масова витрата теплоносія на вході в теплообмінник, кг/с.

Змінні параметри об'єкта керування

TВГ = TВГО + ∆TВГ; TСТ = TСТО + ∆TСТ  T'ОГ = T'ОГО + ∆T'ОГ; (2.11)

FВГ = FВГО + ∆FВГ; FТ = FТО + ∆FТ.

Підставляємо змінні параметри (2.11) у систему рівнянь (2.10)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | (FТО + ∆FТ) · СТ · (ТТ – T'Т) + αСТ · SТР · (T'ВГО + ∆T'ВГ) = | | = mТР · CТР · d(TСТО + ∆TСТ) / dt + αСТ · SТР · (TСТО + ∆TСТ); | | (FВГО + ∆FВГ) · CВГ · (TВГО + ∆TВГ) + αСТ · SТР · (TСТО + ∆TСТ) = | | = mВГ · C'ВГ · d(T'ВГО + ∆T'ВГ) / dt +(FВГО + ∆FВГ) · C'ВГ · | | · (T'ВГО + ∆T'ВГ) + αСТ · SТР · (T'ВГО + ∆T'ВГ). | | (2.12) |

Виконуємо математичні операції (2.12) і нехтуємо складовими малого ступеня важливості

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | FТО · СТ · ТТ – FТО · СТ · T'Т + ∆FТ · СТ · ТТ + αСТ · SТР · T'ВГО + | | + αСТ · SТР · ∆T'ВГ = mТР · CТР · d∆TСТ / dt + αСТ · SТР · TСТО + | | + αСТ · SТР · ∆TСТ; | | FВГО · CВГ · TВГО + FВГО · CВГ · ∆TВГ + ∆FВГ · CВГ · TВГО + | | + αСТ · SТР · TСТО + αСТ · SТР · ∆TСТ = mВГ · C'ВГ · d∆T'ВГ / dt + | | + FВГО · C'ВГ · T'ВГО + FВГО · C'ВГ · ∆T'ВГ + ∆FВГ · C'ВГ · T'ВГО + | | + αСТ · SТР · T'ВГО + αСТ · SТР · ∆T'ВГ. | | (2.13) |

Система рівнянь статики

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | FТО · СТ · (ТТ – T'Т) = αСТ · SТР · (TСТО – T'ВГО); | | FВГО · CВГ · TВГО + αСТ · SТР · (TСТО – T'ВГО) = FВГО · C'ВГ · T'ВГО. | | (2.14) |

Виключаємо систему рівнянь статики (2.14) із системи рівнянь (2.13)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | ∆FТ · СТ · ТТ + αСТ · SТР · ∆T'ВГ = mТР · CТР · d∆TСТ / dt + αСТ · SТР · ∆TСТ; | | FВГО · CВГ · ∆TВГ + (CВГ · TВГО – C'ВГ · T'ВГО) · ∆FВГ + αСТ · SТР · ∆TСТ = | | = mВГ · C'ВГ · d∆T'ВГ / dt + (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР) · ∆T'ВГ. | | (2.15) |

Вводимо такі позначення

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | z = ∆TВГ / TВГО; | y1 = ∆TСТ / TСТО; | y2 = ∆T'ВГ / T'ВГО; |  | | x2 = ∆FВГ / FВГО; | x1 = ∆FТ / FТО. |  | | (2.16) |

Підставляємо позначення (2.16) у систему рівнянь (2.15)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | x1 · FТО · СТ · ТТ + αСТ · SТР · y2 · T'ВГО = | | = mТР · CТР · dy1 / dt · TСТО + αСТ · SТР · y1 · TСТО; | | FВГО · CВГ · z · TВГО + (CВГ · TВГО – C'ВГ · T'ВГО) · x2 · FВГО+ | | + αСТ · SТР · y1 · TСТО = mВГ · C'ВГ · dy2 / dt · T'ВГО + | | + (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР) · y2 · T'ВГО. | | (2.17) |

Постійні часу

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | τ1 = mТР · CТР / αСТ · SТР; |  | | τ2 = mВГ · C'ВГ / (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР). | | (2.18) |

Коефіцієнти передачі

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  | | --- | --- | --- | | К1 = FТО · СТ · ТТ / αСТ · SТР · TСТО; | К2 = T'ВГО / TСТО; |  | | К3 = (CВГ · TВГО – C'ВГ · T'ВГО) · FВГО / (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР) · T'ВГО; | | | К4 = FВГО · CВГ · TВГО / (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР) · T'ВГО; | | | К5 = αСТ · SТР · TСТО / (FВГО · C'ВГ + αСТ · SТР) · T'ВГО. | | | (2.19) |

Ділимо перше рівняння системи (2.17) на , друге – на , з урахуванням постійних часу (2.18) та коефіцієнтів передачі (2.19)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | |  | τ1 · dy1 / dt + y1 = К1 · x1 + К2 · y2; | | τ2 · dy2 / dt + y2 = К4 · z + К3 · x2 + К5 · y1. | | (2.20) |

Оскільки температура стінок трубок TСТО є проміжним параметром, її необхідно виключити з другого рівняння системи (2.17). Для цього розв'язуємо систему рівнянь щодо вихідної величини y2. [2], [7]

З другого рівняння системи (2.20) знаходимо y1

(2.21)

Похідна y1 на підставі рівняння (2.21)

(2.22)

Підставляємо рівняння (2.21) та (2.22) у перше рівняння системи (2.20)

Постійні часу

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | τ' = (τ1 + τ2) / (1 – К2 · К5); |  | | τ'' = (τ1 · τ2) / (1 – К2 · К5). | | (2.24) |

Коефіцієнти передачі

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  | | --- | --- | --- | | К6 = К1 · К5 / (1 – К2 · К5); | К7 = К3 / (1 – К2 · К5); |  | | К8 = К4 / (1 – К2 · К5). |  | | (2.25) |

Підставляємо постійні часу (2.24) та коефіцієнти передачі (2.25) до рівняння (2.23)

Рівняння (2.26) відповідає структурно-логічній схемі кожухотрубного теплообмінника як об'єкта управління, наведеної на рис. 2.2.

Передавальні функції об'єкта управління з урахуванням часу запізнення:

- по каналу регулювання

- По каналах обурення

Значення технологічних параметрів, що відповідають номінальному режиму роботи представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 − Вихідні дані для розрахунку математичної моделі кожухотрубного теплообмінника

|  |  |
| --- | --- |
| Потік, що нагрівається | відпарний газ |
| Масова витрата відпарного газу на виході з теплообмінника F'ВГ, т/год | 30 |
| Тиск відпарного газу на вході в теплообмінник РВГ, МПа | 3.8 |
| Температура відпарного газу на вході в теплообмінник TВГ, ОС | 240 |
| Температура відпарного газу на виході з теплообмінника T'ВГ, ОС | 320 |
| Теплоносій | пар |
| Тиск теплоносія на вході в теплообмінник РТ, МПа | 4.0 |
| Температура теплоносія на вході в теплообмінник TТ, ОС | 380 |
| Температура теплоносія на виході з теплообмінника T'Т, ОС | 300 |

Довідкові дані для розрахунку математичної моделі кожухотрубного теплообмінника.

Таблиця 2.2 − Склад відпарного газу

|  |  |
| --- | --- |
| Речовина | % |
| Н2О | 98 ÷ 99.5 |
| СО2 | 0.1 ÷ 0.5 |
| NН3 | 0.1 ÷ 0.5 |
| Н2 | 0.04 ÷ 0.06 |
| Органічні сполуки у перерахуванні на метанол | 0.1 ÷ 0.5 |

З даних табл. 2.2. приймаємо фазовий стан відпарного газу - перегріта пара.

Середня температура відпарного газу

оС. (2.30)

Таблиця 2.3 − Характеристика відпарного газу

|  |  |
| --- | --- |
| Тиск відпарного газу на вході в теплообмінник РВГ, МПа | 3.8 |
| Середня температура відпарного газу ТСЕР, оС | 280 |
| Щільність відпарного газу ρВГ, кг / м3 | 16.967 |
| Питома теплоємність відпарного газу на вході в теплообмінник CВГ, кДж / кг · оС | 2.99 |
| Динамічний коефіцієнт в'язкості відпарного газу на вході в теплообмінник μВГ, Па · с | 1.897 · 10–5 |
| Коефіцієнт теплопровідності відпарного газу на вході в теплообмінник λВГ, Вт / м · оС | 0.05 |
| Критерій Прандтля Pr | 1.133 |

Питома теплоємність відпарного газу на виході з теплообмінника C'ВГ = = CВГ = 2.99 кДж/кг · оС.

Коефіцієнт об'ємного розширення

оС, (2.31)

де Т = ТСРВГ + 273 = 280 + 273 = 553 оС.

Критерій Грасгофа

(2.32)

де g = 9.81 – коефіцієнт вільного падіння, м / с2;

∆t = TСТ – ТСРВГ = 324 - 280 = 44 оС;

TСТ = T'ВГ + 4 = 320 + 4 = 324 - температура стінок трубок, оС.

Добуток критеріїв Прандтля (табл. 2.3.) та Грасгофа (2.32)

Pr · Gr = 1.133 · 86325111.99 = 97806351.89 (2.33)

Перевіряємо нерівність

500 < Pr · Gr < 2 · 107. (2.34)

Підставляємо в рівняння (2.34) чисельне значення Pr · Gr (2.33)

500 < 97806351.89 > 2 · 107. (2.35)

Нерівність (2.34) не виконується.

Перевіряємо нерівність

Pr · Gr > 2 · 107. (2.36)

Підставляємо в рівняння (2.36) чисельне значення Pr · Gr (2.33)

97806351.89 > 2 · 107. (2.37)

Нерівність (2.36) виконується.

Оскільки ТСРВГ = 280 оС; перегріта (водяна) пара – номер точки 13;

(2.38)

Коефіцієнт віддачі теплоти відпарному газу стінками трубок

= 23 · 1,163 · = 0.027 кДж / · с · оС.

Таблиця 2.4 − Характеристика кожухотрубного теплообмінника типу ТУ

|  |  |
| --- | --- |
| Діаметр кожуха теплообмінника (зовнішній) DН, мм | 500 |
| Діаметр кожуха теплообмінника (внутрішній) DВН, мм | 490 |
| Діаметр трубок теплообмінника (зовнішній) dН, мм | 25 |
| Товщина стін трубок теплообмінника s, мм | 2 |
| Число ходів | 2 |
| Поверхня трубок SТР, м2 | 41.7 |
| Площа перерізу трубок теплообмінника SСЕЧ, м2 (0.0291 · 2) | 0.0582 |
| Питома теплоємність трубок CТР, кДж / кг · оС | 0.5 |
| Довжина трубок теплообмінника l, м | 3 |
| Маса теплообмінника mКТ, кг | 2250 |
| Маса трубок теплообмінника mТР, кг | 830 |
| Кількість трубок теплообмінника N, шт | 168 |

Маса відпарного газу

Теплове навантаження теплоносія

Масова витрата відпарного газу на вході в теплообмінник FВГ = F'ВГ = 30 т/год = 8.333 кг/с.

Середня температура теплоносія

оС. (2.42)

Таблиця 2.5 − Характеристика теплоносія

|  |  |
| --- | --- |
| Тиск теплоносія на вході в теплообмінник РТ, МПа | 4.0 |
| Середня температура теплоносія ТСРТ, оС | 340 |
| Щільність теплоносія ρТ, кг / м3 | 15.38 |
| Питома теплоємність теплоносія на вході в теплообмінник CТ, кДж / кг · оС | 2.54 |

Масова витрата теплоносія на вході в теплообмінник

Масова витрата теплоносія на вході в теплообмінник = 9.809 кг/с = 35 т/год.

Підставляємо чисельні значення (2.18). Постійні часу

Підставляємо чисельні значення (2.19). Коефіцієнти передачі

Підставляємо чисельні значення (2.24). Постійні часу

Підставляємо чисельні значення (2.25). Коефіцієнти передачі

Підставляємо постійні часу (2.46) та коефіцієнти передачі (2.47) до рівняння (2.26)

З математичної моделі (2.48) випливає, що зв'язки між вихідним параметром y2 збуреннями x2 і z незначні і їх можна знехтувати. Тоді математична модель (2.48) набуває наступного вигляду

Передатна функція об'єкта управління по каналу регулювання без урахування часу запізнення

На підставі (2.50) кожухотрубний теплообмінник як об'єкт управління [2], [6] описується диференціальним рівнянням другого порядку, а це означає, що за певних умов його перехідна функція може бути коливальною, якщо . У даному випадку це відношення становить . Перехідний процес описується рівнянням аперіодичного ланки другого порядку.

Час запізнення каналом зміни теплоносія

де - обсяг теплоносія, м3.

Об'єм теплоносія

Передатна функція об'єкта управління [2], [6] каналом регулювання (2.50) з урахуванням часу запізнення (2.51)

На рис. 2.2. наведено структурну схему автоматичної системи регулювання витрати пари на вході парового економайзера.

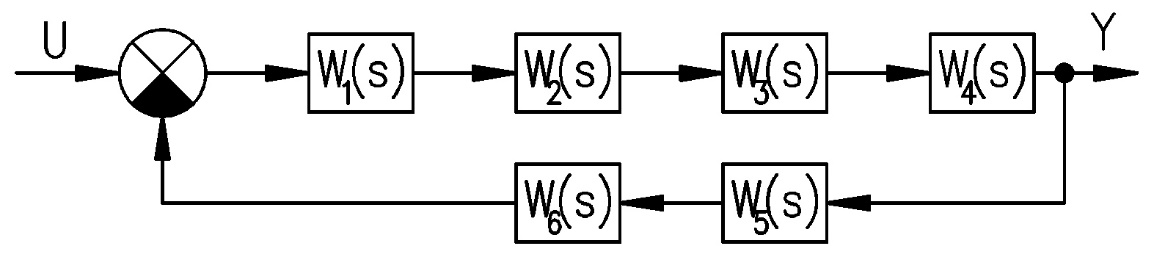


Рисунок 2.2 - Структурна схема АСР витрати пари на вході парового економайзера

Передавальні функції окремих динамічних ланок АСР [23]

Передатна функція ПІД-регулятора (РСУ «INVENSYS»)

де – коефіцієнт посилення регулятора;

- постійна часу інтегрування;

- постійна часу диференціювання;

Передавальна функція виконавчого механізму (регулювальний клапан «EMERSON»)

де = 0.8 - коефіцієнт передачі;

= 20 - постійна часу;

Передавальна функція регулюючого органу (регулюючий клапан «EMERSON»)

де = 1.2 - коефіцієнт передачі;

Передатна функція об'єкта управління

Передатна функція вимірювального перетворювача (діафрагма камерна стандартна ДКС-6.3-250)

де = 0.4 - коефіцієнт передачі;

Передатна функція проміжного перетворювача (інтелектуальний датчик різниці тисків Метран-100-ДД)

де = 1.08 - коефіцієнт передачі.

Передатна функція АСР

# ****2.4. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB / Simulink (або аналогічному)****

Передатна функція еквівалентного об'єкта керування

Підставляємо в (2.61) передавальні функції окремих динамічних ланок

Функція кривої розгону еквівалентного об'єкта управління АСР витрати пари на вході парового економайзера

На рис. 2.3. наведено криву розгону еквівалентного об'єкта управління АСР витрати пари на вході парового економайзера.



Рисунок 2.3 - Крива розгону еквівалентного об'єкта керування АСР витрати пари на вході парового економайзера

Визначаємо оптимальні налаштування ПІД-регулятора методом максимальних швидкостей.

Алгоритм розв'язання методом максимальних швидкостей

**Знайди параметри кривої розгону**:

**K** — статичний коефіцієнт підсилення (кінцеве значення виходу, ). З графіка ≈ **0.8**3

**L** — запізнювання (время затримки, де крива починає змінюватись від 0), з графіка ≈ **35 с**

c

**T** — постійна часу (приблизно досягнення 63% від максимуму), з графіка ≈ **80 с**

c

Альтернативно: знайди дотичну в точці найбільшого нахилу та визнач час затримки ​ і час росту ​.

Пропорційна складова:

Інтегральна складова: c

Диференціальна складова: c

На рис. 2.4. наведено ділянку кривої розгону еквівалентного об'єкта управління АСР (рис. 2.3.) для зручності визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора методом трикутника.



Рисунок 2.4 - Ділянка кривої розгону еквівалентного об'єкта керування АСР

На кривій розгону еквівалентного об'єкта управління АСР (рис. 2.4.) будуємо прямокутний трикутник і визначаємо максимальну швидкість перехідного процесу.[24]

Максимальна швидкість перехідного процесу

де ∆у = 0.25 - 0.05 = 0.2;

∆t = 40 - 15 = 25.

Оптимальні параметри ПІД-регулятора, що настроюються (табл. 1.1.)

- Коефіцієнт посилення регулятора = 0.83 · · τ = 0.83 · 0.008 · 10 =0.066;

- Постійна часу інтегрування = 2 · τ = 2 · 10 = 20 с;

- Постійна часу диференціювання

Підставляємо (2.54) чисельні значення параметрів ПІД-регулятора. Передатна функція ПІД-регулятора

# 2.5 Розрахунок частотних характеристик та перехідних процесів автоматичної системи регулювання

Основним призначенням АСР є підтримання заданого постійного значення регульованого параметра чи зміна його за визначеним законом. При відхиленні в даний момент часу величини регульованого параметра від заданого значення, що може статися або в результаті появи обурювальних впливів на систему, або при зміні заданого значення регульованої величини, автоматичний регулятор впливає на систему таким чином, щоб ліквідувати це відхилення. Тоді система переходить з одного рівноважного стану в інший, тобто в ній виникає перехідний процес, що визначається динамічними властивостями системи.

Якщо вплив, що обурює, буде знято або якщо постійний за величиною вплив, що обурює, або зміна на постійну величину управляючого вплив буде зберігатися і при цьому система після закінчення перехідного процесу знову приходить в початковий або інший рівноважний стан, така система називається стійкою.

Якщо за тих самих умовах у системі або виникають коливання з зростаючою амплітудою, або відбувається монотонне збільшення відхилення регульованої величини від її заданого рівноважного значення, то система називається нестійкою.

Щоб визначити, стійка чи нестійка система, необхідно вивчити її поведінка при малих відхиленнях від рівноважного стану. Якщо при цьому система прагне повернутися до рівноважного стану, то вона буде стійкою. Якщо ж у системі виникають сили, які прагнуть збільшити відхилення системи від рівноважного стану, система буде нестійкою.

Перетворимо передатну функцію АСР (2.60)

Реальна частотна характеристика АСР

На рис. 2.5. наведено графік реальної частотної характеристики автоматичною системи регулювання



Рисунок 2.5 - Графік реальної частотної характеристики АСР

Уявна частотна характеристика АСР

На рис. 2.6. наведено графік уявної частотної характеристики автоматичної системи регулювання



Рисунок 2.6 - Графік уявної частотної характеристики АСР

Амплітудно-частотна характеристика АСР

На рис. 2.7. наведено графік амплітудно-частотної характеристики автоматичної системи регулювання

Рисунок 2.7 - Графік амплітудно-частотної характеристики АСР

Фазочастотна характеристика АСР

На рис. 2.8. наведено графік фазочастотної характеристики автоматичної системи регулювання



Рисунок 2.8 - Графік фазочастотної характеристики АСР

Функція перехідного процесу автоматичної системи регулювання

На рис. 2.9. наведено графік перехідного процесу автоматичної системи регулювання



Рисунок 2.9 - Графік перехідного процесу АСР

Першою проблемою, що вирішувалася теорією автоматичного регулювання, було забезпечення стійкості автоматичних систем. Пізніше центральною завданням стало досягнення необхідної якості регулювання. Систематизація та узагальнення накопичених знань призвели до створення методів наукового проектування (синтезу) систем із заданими показниками точності регулювання та швидкодії.

Проблема забезпечення необхідних властивостей лінійних автоматичних систем дуже складна. У ньому може бути виділено передусім такі часткові завдання: забезпечення стійкості (стабілізація); підвищення запасу стійкості (демпфування); підвищення точності регулювання в встановлених режимах (зменшення або усунення статичної помилки відтворення задає впливу, зменшення або усунення впливу постійних обурень); поліпшення перехідних процесів (збільшення швидкодії, максимальне зменшення динамічних помилок відтворення впливу та від обурень).

Іноді кілька окремих завдань можуть бути вирішені спільно, в інших випадках вони виявляються суперечливими. Залежно від призначення системи та вимог, що висуваються до неї, одні завдання стають основними, а інші відсуваються на другий план або знімаються.

Прямі оцінки якості роботи АСР отримують по кривій перехідного процесу Y(t) під час дії одиночної ступінчастої функції

та за нульових початкових умов.

До прямих оцінок якості відносять:

1. Час регулювання tР – мінімальний час, після якого регульована величина залишатиметься близькою до значення, що встановилося, із заданою точністю

де ∆ – постійна величина, значення якої потрібно обумовлювати (задається величина ∆ у відсотках від значення вихідної величини ).

Як правило, перехідний процес вважається закінченим, якщо входить до 5% зони постійного значення вихідної величини.

2. Перерегулювання σ – максимальне відхилення переходної характеристики від значення вихідної величини, що встановилося, виражене у відносних одиницях або відсотках

а при перехідному процесі каналом обурення –

де , – значення першого та другого максимумів відповідно.

3. Частоту коливань , де Т – період коливань для коливальних перехідних характеристик.

4. Число коливань n, яке має перехідна характеристика Y(t) за час регулювання ().

5. Час досягнення першого максимуму tМАХ.

6. Час наростання перехідного процесу tН – абсциссу першої точки перетину кривої перехідної характеристики Y(t) з рівнем значення вихідної величини YУСТ.

7. Декремент згасання ν, рівний відношенню модулів двох суміжних перерегулювань

Прямі оцінки якості роботи АСР витрати пари на вході парового економайзера, наведеної на рис. 2.8.

- Час регулювання tР = 154 с;

- Перерегулювання

- Частота коливань ;

- Число коливань n = 9;

- Час досягнення першого максимуму tМАХ = 16 с;

- Час наростання перехідного процесу tН = 9 с;

- Декремент згасання

Зазначимо, що у час при бурхливому розвитку обчислювальної техніки проблеми, пов'язані з розрахунком перехідних процесів і вибором можливих варіацій параметрів системи, істотно зменшуються, тому роль прямих оцінок якості під час проектування АСР зростає.

# 2.6 Розробка алгоритму роботи комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі

Алгоритм роботи комп’ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) економайзером розробляється з урахуванням вимог до енергоефективності, стабільності теплового режиму та безпеки експлуатації. Основні принципи побудови алгоритму включають:

* Модульність: розподіл функціональності на окремі логічні блоки (вимірювання, обробка, керування, діагностика, аварійне реагування).
* Ієрархічність: реалізація багаторівневої структури управління, де нижній рівень відповідає за безпосереднє керування виконавчими механізмами, а верхній — за оптимізацію режимів роботи.
* Адаптивність: здатність системи адаптуватися до змінних умов експлуатації, таких як коливання якості біопалива або зміна теплового навантаження.
* Інтеграція: забезпечення взаємодії з іншими підсистемами теплогенераційної установки через стандартні протоколи обміну даними.

Ініціалізація системи:

* Перевірка працездатності сенсорів та виконавчих механізмів.
* Завантаження початкових параметрів та уставок з енергонезалежної пам’яті.
* Встановлення зв’язку з операторською панеллю та SCADA-системою.

Збір та обробка даних:

* Періодичне опитування датчиків температури, тиску, витрати теплоносія та параметрів димових газів.
* Фільтрація та усереднення виміряних значень для зменшення впливу шумів.
* Виявлення аномалій та відхилень від нормальних режимів роботи.

Розрахунок керуючих дій:

* Визначення відхилення температури теплоносія на виході з економайзера від заданого значення.
* Розрахунок керуючого сигналу за допомогою ПІ-регулятора.
* Обмеження керуючого сигналу в межах допустимих значень для запобігання перенавантаженням.

Керування виконавчими механізмами:

* Передача керуючих сигналів на регулюючі клапани, заслінки та частотні перетворювачі.
* Моніторинг зворотного зв’язку для підтвердження виконання команд.

Діагностика та аварійне реагування:

* Постійний контроль стану обладнання та виявлення несправностей.
* Реалізація алгоритмів аварійного зупинення або переходу в безпечний режим при виявленні критичних ситуацій.
* Інформування оператора про стан системи та необхідні дії.

Архівація та візуалізація даних:

* Збереження історії параметрів роботи для подальшого аналізу.
* Відображення поточного стану системи на операторській панелі та в SCADA-системі. [2], [6], [7]

# 2.7. Впровадження в SCADA-середовище (за наявності)

Впровадження автоматизованої системи керування в SCADA-середовище є завершальним етапом створення комп’ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) економайзером. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) дозволяє здійснювати централізований нагляд, керування, аналіз та архівування параметрів технологічного процесу у реальному часі. У контексті теплогенераційної установки на біопаливі, використання SCADA-системи забезпечує гнучкий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс взаємодії оператора з системою, підвищує ефективність обслуговування та дозволяє реалізувати концепцію "розумної" котельні. [5], [10]

**2.7.1. Вибір SCADA-платформи**

Для реалізації проєкту доцільно використовувати SCADA-платформу, сумісну з обраним ПЛК і здатну обробляти аналогові, дискретні та логічні сигнали у режимі реального часу. У даному випадку рекомендовано застосування:

* Siemens WinCC RT Advanced — для роботи з ПЛК Siemens;
* TRACE MODE — у разі використання контролерів ОВЕН або WAGO;
* Ignition, Weintek EasyBuilder Pro або SCADA WebHMI — як альтернативи з веб-доступом.

Ці середовища дозволяють будувати мультивіконні інтерфейси, реалізовувати подієве керування, візуалізацію трендів, запис архівів і сигналізацію. [10], [26]

**2.7.2. Структура SCADA-проекту**

У межах SCADA-проекту реалізовано наступні функціональні блоки: [26]

Головне вікно:

* Схематичне зображення економайзера з основними вузлами (вхід/вихід теплоносія, контур димових газів);
* Відображення поточних значень температур, тиску, витрати;
* Стан виконавчих механізмів (насоси, клапани, продувка).

Панель керування:

* Кнопки ручного запуску та зупинки системи;
* Поля для введення та зміни уставок температури;
* Перемикач режимів: автоматичний / ручний.

Тренди:

* Побудова графіків температур, тиску, витрат за заданий період;
* Візуалізація динаміки відхилення від уставки;
* Підтримка масштабування та експорт даних.

Журнал подій та аварій: [4], [10], [19]

* Реєстрація всіх спрацювань аварійного захисту;
* Архівування операторських дій;
* Колірна індикація рівнів тривоги.

Вікно налаштувань:

* Параметри мережі;
* Дані про логін/пароль доступу;
* Керування правами користувачів.

**2.7.3. Обмін даними з контролером**

Обмін даними між SCADA та ПЛК організований через стандартні промислові протоколи:

* Modbus TCP — для обміну по Ethernet;
* OPC UA — для універсальної інтеграції з зовнішніми базами даних або ERP-системами;
* SNMP або MQTT — для віддаленого моніторингу.

Реалізована адресація змінних SCADA до регістрів ПЛК, що дозволяє в реальному часі зчитувати значення змінних, передавати команди та приймати сигнали стану. [5], [10]

**2.7.4. Переваги впровадження SCADA-рішення**

* Централізований нагляд: оператор має повний огляд ситуації та може оперативно реагувати на зміни;
* Підвищення безпеки: автоматичне виявлення відхилень та активація аварійного захисту;
* Аналітика: можливість порівняльного аналізу режимів роботи та пошуку причин неефективності;
* Віддалене керування: інтеграція SCADA з веб-інтерфейсом або мобільним доступом;
* Простота навчання персоналу: завдяки інтуїтивному графічному інтерфейсу.

**2.7.5. Результати впровадження**

У результаті реалізації SCADA-проєкту створено повноцінну комп’ютерно-інтегровану систему, що дозволяє: [26]

* Здійснювати моніторинг усіх ключових параметрів роботи економайзера;
* Керувати його режимами в реальному часі;
* Реагувати на аварійні ситуації з мінімальною затримкою;
* Формувати звіти про споживання енергії та ефективність теплоутилізації.

# Висновки до розділу 2

У межах дослідження було обґрунтовано та реалізовано етапи створення комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі. Визначено, що найбільш ефективною у цьому контексті є автоматична система керування (АСК), яка дозволяє реалізовувати гнучке, ієрархічне та інтегроване управління в умовах змінної якості палива та нестабільного навантаження.

Розроблена структурна схема охоплює взаємодію польового, керуючого та диспетчерського рівнів, забезпечуючи повний цикл управління — від вимірювання параметрів до візуалізації й архівації. Математичне моделювання процесу теплообміну дозволило створити адекватну динамічну модель економайзера з урахуванням основних впливів та внутрішньої інерційності. Це, у свою чергу, стало основою для точного налаштування регуляторів і забезпечення стабільної роботи системи.

Здійснено обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації — програмованого логічного контролера, сенсорів, виконавчих механізмів та інтерфейсних пристроїв. Розроблено алгоритм функціонування системи, що включає збір та обробку інформації, формування керуючих дій, діагностику та аварійне реагування. Впровадження в SCADA-середовище дало змогу забезпечити повноцінне диспетчерське управління, архівацію даних, інтуїтивну взаємодію з оператором та віддалений моніторинг.

Результати підтверджують, що запропонована комп’ютерно-інтегрована система здатна забезпечити ефективне, стабільне й безпечне управління процесом утилізації тепла за допомогою економайзера, що відповідає вимогам сучасної теплоенергетики та промислової автоматизації.

# ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

# 3.1. Порівняльний аналіз характеристик до та після автоматизації

Проведення порівняльного аналізу характеристик функціонування економайзера до та після впровадження автоматизованої системи керування є ключовим етапом оцінки ефективності розробленого технічного рішення. Автоматизація процесу теплоутилізації дозволяє не лише зменшити вплив людського фактора, але й забезпечити стабільність параметрів, своєчасне реагування на зміни умов експлуатації та підвищення загального ККД теплогенераційної установки.

Для об’єктивної оцінки було проаналізовано основні техніко-експлуатаційні показники до впровадження системи (в умовах ручного або частково автоматизованого регулювання) та після реалізації комп’ютерно-інтегрованої системи управління. [5], [6]

У таблиці 3.1 нижче представлено порівняння базових характеристик.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Показник** | **До автоматизації** | **Після автоматизації** |
| Середній ККД економайзера, % | 63–68 | 80–85 |
| Витрати палива на 1 Гкал, кг | 125–135 | 105–115 |
| Середнє відхилення температури на виході, °C | ±12 | ±2–3 |
| Частота аварійних зупинок, раз/місяць | 2–4 | 0–1 |
| Час реакції на зміну навантаження, хв | 10–15 | 2–4 |
| Кількість ручних втручань операторів/зміну | 5–7 | 0–1 |

Як видно з даних, після автоматизації спостерігається істотне покращення техніко-економічних показників. Завдяки стабільному регулюванню температури теплоносія та оптимізації режимів теплообміну вдалось підвищити коефіцієнт корисної дії на 15–20%, що безпосередньо вплинуло на зменшення витрат біопалива.

Зменшення середнього відхилення температури на виході з економайзера свідчить про високу точність роботи системи регулювання. Це, своєю чергою, позитивно впливає на роботу котельного агрегату, знижує ризики утворення кислотного конденсату та підвищує ресурс роботи трубного пучка.

Також суттєво знизився рівень ручного втручання з боку обслуговуючого персоналу, що свідчить про підвищення автоматичності процесу й зменшення ймовірності помилок через людський фактор. Система продемонструвала високу стабільність, зменшення кількості аварійних зупинок та оперативну реакцію на зміну навантаження або якості палива.

Підвищення ефективності функціонування також виявилось у скороченні тривалості перехідних процесів та зменшенні теплових втрат, зумовлених коливаннями параметрів при ручному керуванні. Це підтверджує практичну цінність впровадження комп’ютерно-інтегрованої системи управління та її доцільність для об’єктів біоенергетики.

# 3.2. Технічні переваги впровадженої системи

Впровадження комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі забезпечило низку технічних переваг, які суттєво підвищили надійність, ефективність та стабільність функціонування енергетичного обладнання. Ці переваги стали можливими завдяки використанню сучасних технічних засобів, автоматичних регуляторів, алгоритмічної логіки обробки даних і централізованого диспетчерського керування через SCADA-систему.

До основних технічних переваг належать:

1. Підвищена точність регулювання параметрів

Однією з найважливіших технічних переваг впровадженої комп’ютерно-інтегрованої системи управління є значне підвищення точності регулювання основних параметрів технологічного процесу, зокрема температури теплоносія на виході з економайзера. У традиційних схемах керування, що реалізуються вручну або із застосуванням спрощених регуляторів, відхилення від заданих температурних значень можуть сягати десятків градусів, що призводить до коливань продуктивності системи, перевитрати палива та зниження коефіцієнта корисної дії.

Застосування ПІ-регулятора в автоматизованій системі дозволило забезпечити підтримку температури теплоносія в заданому діапазоні з відхиленням не більше ±2–3 °C. Такий рівень точності був досягнутий завдяки безперервному моніторингу вхідних параметрів, швидкому реагуванню на збурення та використанню ефективного алгоритму регулювання із зворотним зв’язком. Додаткову стабільність забезпечили високоточні сенсори температури та витрати, підключені безпосередньо до програмованого логічного контролера. [2], [3], [13]

Результатом підвищеної точності є не лише покращення теплового балансу установки, а й зниження ризиків утворення конденсату, запобігання перегріву або недогріву теплоносія, а також підвищення загальної надійності роботи економайзера. Це дозволяє зменшити навантаження на теплообмінні поверхні та продовжити їхній експлуатаційний ресурс, що особливо важливо в умовах постійної зміни теплового навантаження та якості біопалива.

1. Зменшення динамічних коливань і перехідних процесів

Ще однією вагомою технічною перевагою впровадженої системи є істотне зменшення динамічних коливань та скорочення тривалості перехідних процесів у роботі економайзера. У попередньому, неавтоматизованому варіанті керування, при зміні теплового навантаження або коливанні температури димових газів система реагувала із запізненням, що призводило до значних температурних коливань на виході з теплообмінника. Такі нестабільні режими негативно впливали на роботу всієї теплогенераційної установки, підвищували навантаження на котел та спричиняли нераціональне використання палива. [2], [6]

Впровадження ПІ-регулятора та логіки безперервного аналізу змін температури та витрати теплоносія дозволило суттєво зменшити інерційність реакції системи. Завдяки точній синхронізації керуючих дій з фактичними відхиленнями технологічних параметрів, система оперативно стабілізує температуру теплоносія навіть у разі різких збурень, викликаних зміною режиму горіння або переходом котла на інший тип біопалива.

Крім того, зменшення амплітуди коливань температури позитивно впливає на довговічність конструктивних елементів економайзера, знижує термічне навантаження на зварні шви та трубний пучок, а також мінімізує кількість пуско-зупинкових режимів обладнання. Усе це сприяє підвищенню стабільності та передбачуваності функціонування теплогенераційної установки, що є важливим фактором для її надійної та безперервної роботи в промислових умовах.

1. Адаптивність до змін якості біопалива

Суттєвою перевагою розробленої комп’ютерно-інтегрованої системи управління є її здатність адаптуватися до змін якісних характеристик біопалива, що використовується у теплогенераційній установці. На практиці біомаса, як паливо, має значну варіативність параметрів — зокрема вмісту вологи, щільності, теплотворної здатності, розміру частинок тощо. Ці коливання безпосередньо впливають на тепловий режим установки, стабільність процесу згоряння та, відповідно, ефективність теплообміну в економайзері.

У традиційних схемах регулювання, які не враховують зміни у властивостях палива, відсутність оперативного коригування режимів роботи призводить до втрат тепла, коливань температури теплоносія та зниження загального коефіцієнта корисної дії установки. Впроваджена ж система, завдяки реалізації логіки зворотного зв’язку та можливості налаштування уставок в реальному часі, дозволяє гнучко реагувати на зміну вхідних умов.

При виявленні тенденції до зниження температури димових газів, пов’язаної з недостатньою теплотою згоряння палива, система автоматично підлаштовує параметри регулятора або формує сигнал на зміну витрати теплоносія. Аналогічно, при надмірному зростанні температури внаслідок застосування сухішого або енергетично багатшого біопалива, здійснюється корекція подачі води або відкриття регулюючих органів.

Таким чином, адаптивність системи забезпечує підтримання сталих теплотехнічних параметрів навіть за умов нестабільного паливного ресурсу, що є характерною рисою біоенергетичних установок. Це дозволяє уникнути перевитрат палива, забезпечити екологічну рівновагу процесу горіння та зберегти тривалість міжсервісного циклу теплообмінного обладнання. [6], [11]

1. Інтеграція та віддалений доступ

Однією з важливих технічних переваг впровадженої комп’ютерно-інтегрованої системи управління є забезпечення її широких можливостей інтеграції в інформаційне середовище підприємства та реалізація функції віддаленого доступу. Сучасна архітектура автоматизованої системи, побудована на базі програмованого логічного контролера з підтримкою промислових комунікаційних протоколів (Modbus TCP, OPC UA), дозволяє легко інтегрувати керування економайзером у загальну SCADA-систему, а також зв’язати його з іншими вузлами теплогенераційної установки.

Завдяки інтеграції з диспетчерською системою оператор отримує можливість контролювати технологічні параметри в режимі реального часу, фіксувати динаміку змін та оперативно реагувати на відхилення. Крім того, реалізація архівування даних та графічної візуалізації забезпечує умови для довготривалого аналізу та формування звітної документації. Це особливо важливо для обґрунтування енергоефективності та планування технічного обслуговування. [25]

Підключення системи до мережі підприємства або до хмарного середовища дозволяє організувати повноцінний віддалений доступ — як через локальні панелі керування (HMI), так і через web-інтерфейс або мобільні пристрої. Такий функціонал значно розширює можливості обслуговуючого персоналу, дає змогу моніторити стан обладнання з будь-якої точки доступу, проводити діагностику, вносити налаштування та, за потреби, здійснювати екстрене керування в позаштатних ситуаціях.

Таким чином, завдяки реалізованим засобам інтеграції та віддаленого доступу, впроваджена система є не лише гнучкою у використанні, але й повністю готовою до роботи в умовах цифровізованого виробництва, що відповідає концепціям Індустрії 4.0 та сучасним вимогам до енергоефективних автоматизованих об’єктів. [5], [6], [10], [11]

1. Зменшення навантаження на обслуговуючий персонал

Суттєвим технічним досягненням впровадженої системи є значне зменшення навантаження на обслуговуючий персонал. У попередньому, неавтоматизованому варіанті роботи економайзера, більшість операцій виконувалася вручну або в режимі часткового контролю, що вимагало постійної присутності оператора, регулярної перевірки показників температури, тиску, витрати теплоносія, а також ручного втручання у випадку змін режиму або відхилення параметрів.

Автоматизована система взяла на себе більшість рутинних і регламентованих функцій: постійне зчитування параметрів, аналіз їх відповідності уставкам, формування та реалізацію керуючих дій, контроль стану виконавчих механізмів і сигналізацію при аварійних ситуаціях. Завдяки цьому оператор позбавлений необхідності постійно відслідковувати ситуацію вручну — система самостійно інформує про зміну режиму, надсилає тривожні сигнали у разі критичних відхилень, а також надає підказки щодо необхідних дій.

Крім того, реалізація графічного інтерфейсу у SCADA-середовищі дозволяє обслуговуючому персоналу зручно переглядати поточний стан об’єкта, отримувати доступ до історичних даних, переглядати графіки та формувати звіти — без потреби в додаткових вимірюваннях чи розрахунках. Це суттєво підвищує ефективність роботи персоналу, знижує психоемоційне та фізичне навантаження, а також мінімізує ймовірність помилок у керуванні, пов’язаних із людським фактором.

Таким чином, впроваджена система значно покращує умови праці операторів і персоналу технічного обслуговування, підвищуючи рівень безпеки, оперативності прийняття рішень та загальної культури експлуатації теплотехнічного обладнання.

1. Можливість розширення та масштабування

Ще однією важливою технічною перевагою впровадженої комп’ютерно-інтегрованої системи управління є її здатність до розширення та масштабування відповідно до зростаючих потреб підприємства або у випадку модернізації теплогенераційної установки. Архітектура системи побудована на модульному принципі, що дозволяє без суттєвих змін у програмному та апаратному забезпеченні додавати нові вузли автоматизації, розширювати кількість контрольованих параметрів, підключати додаткові датчики, виконавчі механізми або інтегрувати нові технологічні контури. [5], [10]

Таке конструктивне рішення забезпечує високу гнучкість — система легко адаптується до змін конфігурації обладнання, появи нових функціональних вимог чи переходу до багатокотельної установки. Зокрема, без додаткових витрат можуть бути реалізовані контури автоматичного керування системами золовидалення, підготовки біопалива, попереднього підігріву повітря, а також автоматичної діагностики стану теплообмінних поверхонь. [6], [15]

Крім того, можливість масштабування розповсюджується і на рівень управління — SCADA-система дозволяє одночасно контролювати декілька об’єктів, об’єднаних у загальну енергетичну мережу, що особливо важливо для підприємств із децентралізованим теплопостачанням або регіональних теплогенераційних вузлів. Водночас, використання промислових комунікаційних протоколів дає змогу безперешкодно здійснювати обмін даними між наявними системами та новими елементами автоматизації.

Таким чином, відкритість, модульність і масштабованість розробленої системи забезпечують її довготривалу актуальність, придатність до розвитку та інтеграції у більш складні енергетичні комплекси, що відповідає сучасним тенденціям розвитку промислової автоматизації та цифровізації виробництв.

1. Зниження експлуатаційних витрат

Суттєвим результатом упровадження автоматизованої системи управління економайзером є помітне зниження експлуатаційних витрат, що обумовлено комплексом технічних і організаційних факторів. Насамперед, завдяки точному та стабільному регулюванню температури теплоносія вдалося зменшити перевитрати біопалива, які раніше виникали через нерівномірність теплообміну, неефективні перехідні процеси та недостатню узгодженість між режимами роботи котельного обладнання й економайзера.

Крім того, автоматичний контроль за параметрами дозволив зменшити кількість аварійних зупинок і позапланових зупинок на технічне обслуговування. Завдяки своєчасному виявленню відхилень і реагуванню на критичні ситуації система попереджає перегрів, гідроудари, надмірне забруднення теплообмінних поверхонь, що істотно подовжує міжсервісний інтервал роботи обладнання.

Зменшення витрат також стало можливим завдяки скороченню необхідності в постійному чергуванні оператора або втручанні персоналу в рутинні операції. Візуалізація процесу, автоматичне архівування даних та сповіщення про несправності дозволяють оптимізувати роботу обслуговуючого персоналу, зменшити тривалість простоїв та раціональніше планувати технічне обслуговування. [10, 18, 19]

Загалом, зниження витрат на паливо, технічне обслуговування, ремонт і персонал разом із підвищенням надійності й енергоефективності установки формує економічно обґрунтований ефект від автоматизації. Це робить запропоноване технічне рішення вигідним як для локальних енергетичних об’єктів, так і для великих підприємств, орієнтованих на зниження собівартості теплової енергії. [1], [7]

# 3.3. Перспективи модернізації та масштабування системи

Впроваджена комп’ютерно-інтегрована система управління економайзером демонструє стабільну та ефективну роботу в умовах експлуатації на біопаливі. Однак розвиток технологій, посилення вимог до енергоефективності та цифровізації виробництв створюють умови для подальшої модернізації та розширення функціональності системи. Перспективи удосконалення охоплюють як технічні, так і функціональні напрямки.

1. Інтеграція енергоменеджменту та оптимізації

Одним із ключових векторів розвитку є впровадження модулів енергетичного моніторингу з функцією оцінки споживання енергії в реальному часі. Завдяки архівації показників температури, витрат, ККД та кількості спожитого палива можна створити базу для енергетичного аудиту. Вбудована система оптимізації дозволить в автоматичному режимі підбирати режими роботи з найменшими втратами тепла та палива, з урахуванням виробничих потреб. [8], [10], [18]

2. Підключення до загального інформаційного середовища підприємства

Масштабування системи може відбуватись через підключення до локальної мережі підприємства, включення в ERP/MES-рівень або хмарну платформу. Це відкриває можливість:

* централізованого моніторингу кількох об’єктів одночасно (наприклад, економайзери на різних котлах),
* аналізу показників в історичному та порівняльному розрізах,
* підвищення прозорості енергетичних витрат.

3. Впровадження адаптивного та інтелектуального регулювання

З метою підвищення гнучкості та надійності функціонування системи, можливе впровадження адаптивних алгоритмів, що змінюють параметри регулювання в залежності від температурного графіку, типу біопалива або динаміки зовнішніх збурень. Також перспективним є використання технологій штучного інтелекту (AI) для прогнозування поведінки об’єкта та виявлення аномалій у режимах роботи. [2], [6]

4. Дистанційне обслуговування та діагностика

Підключення системи до хмарного середовища з підтримкою протоколів IoT (наприклад, MQTT) дозволить організувати дистанційне технічне обслуговування. Це особливо актуально для регіональних об’єктів або невеликих котелень. Система зможе надсилати сповіщення про критичні події, запити на обслуговування або прогнози зносу обладнання.

5. Розширення на інші технологічні вузли

Оскільки розроблена архітектура має модульну побудову, її легко масштабувати на інші компоненти теплогенераційної установки — зокрема, пальниковий пристрій, системи золовидалення, подачі палива, вторинного теплообміну. Це дозволяє створити єдину цифрову платформу управління котельнею на біопаливі.

6. Підвищення рівня кібербезпеки

У зв’язку зі зростанням цифрової взаємодії, важливим аспектом модернізації є впровадження засобів інформаційного захисту: автентифікації користувачів, шифрування даних, моніторингу підозрілої активності, захисту SCADA-вузлів від несанкціонованого втручання. [4], [5], [10]

# 3.4. Висновки до розділу 3

У результаті проведеного аналізу встановлено, що впровадження комп’ютерно-інтегрованої системи управління економайзером у складі теплогенераційної установки на біопаливі забезпечує суттєве підвищення ефективності, надійності та економічності функціонування всієї установки. Порівняльна оцінка показників до і після автоматизації підтвердила зниження витрат біопалива, зменшення температурних відхилень, зниження частоти аварійних зупинок і підвищення точності регулювання ключових параметрів теплообміну. [1], [2], [5]

Серед основних технічних переваг розробленої системи слід відзначити підвищену точність регулювання температури теплоносія, зменшення динамічних коливань у режимах роботи, адаптивність до змін властивостей біопалива, можливість інтеграції до існуючих інформаційних систем підприємства та забезпечення віддаленого доступу до системи. Крім того, автоматизація значно зменшила навантаження на обслуговуючий персонал і дозволила знизити експлуатаційні витрати за рахунок скорочення споживання енергоресурсів, оптимізації обслуговування й підвищення стабільності роботи обладнання.

Окрему увагу приділено перспективам масштабування та модернізації. Визначено, що система має потенціал до подальшого розвитку за рахунок впровадження модулів енергоменеджменту, використання інтелектуальних алгоритмів адаптивного регулювання, підключення до ERP/MES-систем, а також розширення на інші технологічні контури котельні.

Таким чином, запропоноване технічне рішення не лише підтвердило свою ефективність на етапі реалізації, але й має значний потенціал для подальшого застосування у більш широкому масштабі в галузі енергетики, орієнтованій на використання відновлюваних джерел палива та цифровізацію теплогенераційних процесів.

# ВИСНОВОК

Дипломна робота присвячена актуальній проблемі підвищення енергоефективності теплогенераційних установок, що працюють на біопаливі, шляхом автоматизації процесу утилізації залишкового тепла димових газів за допомогою економайзера. У роботі ґрунтовно досліджено технологічні, технічні й алгоритмічні аспекти функціонування економайзера як ключового теплообмінного вузла, визначено вимоги до сучасної системи автоматичного керування, з урахуванням нестабільних умов роботи при спалюванні біомаси.

У першому розділі проведено детальний аналіз конструкції та принципу дії економайзера, обґрунтовано доцільність його автоматизації, охарактеризовано сучасні підходи до управління теплообмінними процесами, включаючи використання ПІД-регуляторів, SCADA-систем і адаптивних методів керування. Особливу увагу приділено специфіці біопалива як нестабільного джерела енергії, що зумовлює потребу в гнучкому та надійному управлінні.

У другому розділі розроблено комп’ютерно-інтегровану систему управління (АСК) економайзером, створено структурну та функціональну схеми, виконано математичне моделювання динаміки процесу в середовищі MATLAB/Simulink, визначено оптимальні параметри регулювання. Робота включає обґрунтований вибір апаратного забезпечення (ПЛК, сенсори, виконавчі механізми) та розробку алгоритму роботи системи. Система впроваджена в SCADA-середовище з реалізацією інтерфейсу оператора.

У третьому розділі виконано порівняльний аналіз роботи системи до та після автоматизації, оцінено підвищення стабільності теплового режиму, зниження теплових втрат, покращення показників безпеки та зменшення експлуатаційних витрат. Визначено перспективи подальшої модернізації та масштабування системи відповідно до вимог Індустрії 4.0.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута повністю. Запропоноване рішення забезпечує високий рівень енергоефективності, автоматизації та адаптивності теплогенераційної установки, сприяє екологічній безпеці, зниженню витрат на обслуговування та відкриває можливості для подальшої цифрової трансформації енергетичних систем.

# СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. КЕК. Тема 3.1. Завдання енергозбереження і способи удосконалення теплоенергетичного устаткування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kek.edu.ua/tema-3-1-zadachi-energozberezhennya-i-sposobi-udoskonalennya-teploenergetichnogo-ustatkuvannya/>
2. Watmfg. Condensing Economizer Boiler Book [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://watmfg.com/watmfg23082016/wp-content/uploads/2016/09/Condensing-Economizer-Boiler-Book.pdf>
3. Бєлявцев І. О. Системи автоматизації енергетичних установок: навчальний посібник / НТУУ «КПІ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/25eb3f2a-01d1-445c-828b-03befc97ee01/content>
4. ДСТУ 4092-2002. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. Основні положення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl69.pdf>
5. Siemens AG. Automation System S7-1200: System Manual. – Germany : Siemens, 2021. – 456 p.
6. Сотнікова Т. Г. Автоматизовані системи керування теплоенергетичними об'єктами : навч. посіб. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2020. – 198 с.
7. Вакуленко В. Ф., Гуревич В. І. Теплотехнічні процеси та установки : підруч. – Київ : ІСДО, 2018. – 436 с.
8. ДСТУ EN 61131-1:2017. Програмовані логічні контролери. Частина 1. Загальні положення. – Офіц. вид. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2017. – 68 с.
9. Beckhoff Automation GmbH. TwinCAT 3 Engineering Manual. – Germany : Beckhoff, 2020. – 312 p.
10. WAGO Kontakttechnik GmbH. WAGO-I/O-SYSTEM 750: Product Overview. – Germany, 2022. – 180 p.
11. Міненко С. В. Тепломеханічне обладнання і технології використання альтернативного палива : підруч. – Київ : НАУ, 2021. – 276 с.
12. ДСТУ ISO 5801:2005. Вентилятори. Аеродинамічні характеристики. Випробування в стандартних умовах. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 104 с.
13. MathWorks. Simulink User’s Guide. – USA : MathWorks Inc., 2022. – 784 p. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
14. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2013. – 225 p.
15. Мірошниченко І. О. Інформаційно-керуючі системи промислових об’єктів : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 220 с.
16. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – Brussels : CENELEC, 2010. – 36 p.
17. Viessmann Werke GmbH. Vitotronic control systems for biomass boilers. – Germany : Viessmann, 2020. – 92 p. – Режим доступу: <https://www.viessmann.de>
18. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 40 p.
19. Єрьоміна Л. О. SCADA-системи моніторингу та управління: прикладне програмування : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 195 с.
20. Кобзар І. І., Кириленко Т. М. Основи моделювання технічних систем : навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 184 с.
21. Schneider Electric. Modicon M221 Logic Controller: Hardware Guide. – France : Schneider Electric, 2021. – 164 p. – Режим доступу: <https://www.se.com>
22. Поліщук В. С. Основи автоматизації теплоенергетичних процесів: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 256 с.
23. Johnson C. D. Process Control Instrumentation Technology. – USA: Pearson, 2021. – 752 p.
24. Сидоренко С. М. Моделювання динамічних систем у MATLAB/Simulink: навч. посіб. – Київ: КНУТД, 2022. – 184 с.
25. Куракін С. А., Козак І. В. Економайзери та утилізація тепла: монографія. – Львів: ЛНТУ, 2019. – 172 с.
26. National Instruments. LabVIEW for Control Design and Simulation. – USA: National Instruments, 2020. – 328 p.