

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Удосконалений метод керування котлом

Назва теми

КВРАКІТ. 2022169.01.02.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

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

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

Виконала:

студентка 2 курсу, група АКІТ_м-22-1


Підпис

Валерія КОТЛЯРСЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

д-р техн. наук, проф.


Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

зав. кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки


Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«21» грудня 2023 р.

Хмельницький 2023

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

АКТІЯ Р
В. М. Мисирюк

« 01 » 09 20 23р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Котлярській Валерії Віталіївні

1 Тема роботи: Удосконалений метод керування котлом

керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «15» 08 2023р. № 30.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2023р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування котлом.

Предмет дослідження: удосконалений метод керування котлом.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу керування котлом. Алгоритм та програмна реалізація удосконаленого методу керування котлом. Дослідження удосконаленого методу керування котлом. Висновки.





Завдання отримав

В. М. Мисирюк

Науковий керівник

В. М. Мисирюк

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

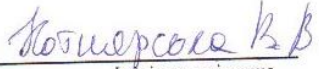
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Микола ФЕДУЛА, доцент кафедри АКІТгаР		
Нормоконтроль	Людмила КОРЕЦЬКА, доц. кафедри АКІТгаР		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2023р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2023р.	Виконано
3	Математична модель процесу керування котлом	15.10.2023р.	Виконано
4	Алгоритм та програмна реалізація удосконаленого методу керування котлом	30.10.2023р.	Виконано
5	Дослідження удосконаленого методу керування котлом	10.11.2023р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2023р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2023р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2023р.	Виконано

Студент


Підпис


Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис


Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	5
1.1 Класифікація котлів	5
1.2 Конструкція комбінованого котла.....	13
1.3 Висновки до першого розділу.....	19
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ	21
2.1 Математична модель процесу горіння.....	21
2.2 Удосконалений метод керування котлом	25
2.3 Висновки до другого розділу	32
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ.....	33
3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу керування котлом	33
3.2 Імітаційна модель підсистеми газового котла	39
3.3 Висновки до третього розділу.....	50
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ.....	52
4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом	52
4.2 Розробка програми для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED	55
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	68
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	71
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі	75

ВСТУП

Актуальність теми. Основною функцією котла є задоволення необхідних потреб в обігріві приміщення. За бажанням користувача, пристрій забезпечує подачу гарячої води. Найважливішим фактором, що визначає характеристики горіння, є те, що кількість повітря, необхідна для горіння, є або низькою, або дуже високою, або необхідною. Тому, забезпечення повного згорання природнього газу та підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшення витрат природнього газу для опалення та нагрівання води, є дійсно актуальною задачею.

Метою роботи є розробка удосконаленого методу керування котлом для забезпечення повного згорання природнього газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшити витрати природнього газу для опалення та нагрівання води.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити **завдання:**

- виконати огляд літературних джерел та патентних даних про методи керування котлом;
- розробити математичну модель процесу керування котлом;
- розробити алгоритм та програмну реалізацію удосконаленого методу керування котлом;
- розробити імітаційну модель удосконаленого методу керування котлом та дослідити її переваги та недоліки.

Об'єктом дослідження є процес керування котлом для забезпечення повного згорання природнього газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшити витрати природнього газу для опалення та нагрівання води.

Предметом дослідження є удосконалений метод керування котлом для забезпечення повного згорання природнього газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшити витрати природнього газу для опалення та нагрівання води.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

У результаті проведеного дослідження розроблено удосконалений метод керування котлом для забезпечення повного згорання природнього газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшити витрати природнього газу для опалення та нагрівання води за допомогою контролю температури полум'я.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1 Класифікація котлів

Котли – це нагрівальні прилади, які використовуються в закритих приміщеннях, таких як житлові та офісні, для задоволення потреб у опаленні та забезпечення гарячої води.

Завдяки своїм невеликим розмірам і розташуванню на стіні, вони займають менше місця і застосовуються у невеликих приміщеннях, таких як житлові та офісні приміщення. Популярність цього газових котлів зростає завдяки безшумним умовам роботи цих пристроїв. Газових котел здійснює нагрівання води в камері згоряння шляхом реакції природний газ із киснем, який отримується з повітря.

Використання природного газу як палива також збільшило використання котлів, оскільки вони є газовими настінними нагрівальними пристроями.

Основною функцією котла є задоволення необхідних потреб в обігріві приміщення. За бажанням користувача, пристрій забезпечує подачу гарячої води. Поки котел виконує свою першу функцію, вода центрального опалення направляється до радіаторів шляхом нагріву в первинному теплообміннику за допомогою насоса і забезпечується необхідне опалення приміщення. Цей процес працює як замкнута система.

Другою функцією котла є нагрівання гарячої води для побутових потреб. Вода, що нагрівається в первинному теплообміннику, досягає користувача, передаючи своє тепло споживаній воді в пластинчастому теплообміннику, який називається вторинним теплообмінником.

Котли з герметичним димоходом забирають повітря ззовні, яке використовується для спалювання газу, з частини димоходу за допомогою вентилятора та виводять гази згоряння назовні через іншу частину димоходу за допомогою того ж самого вентилятора.

Оскільки всі ці газо- та повітряні обміни здійснюються із зовнішнім

середовищем, абсолютно необхідно, щоб прилад був під'єднаний до зовнішнього середовища, як зображено на рисунку 1.1.

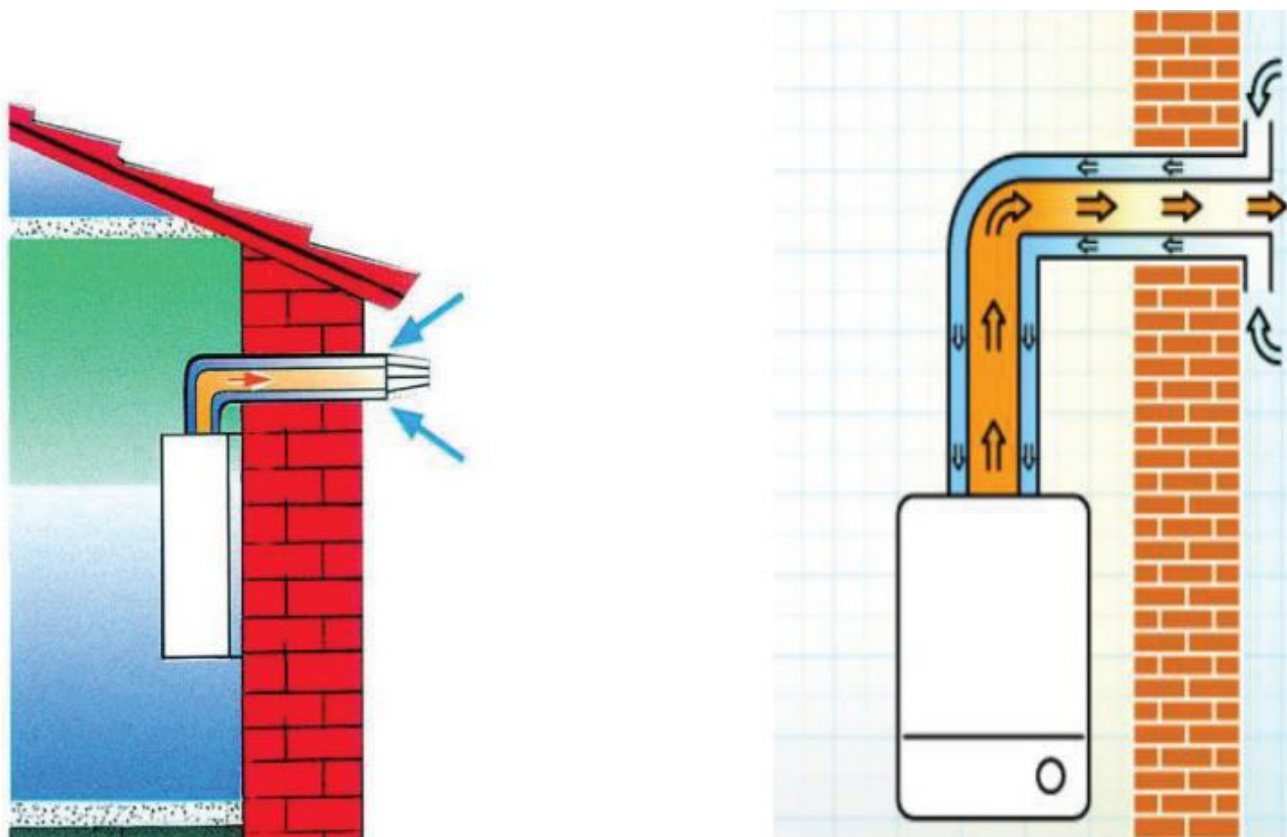


Рисунок 1.1 – Принцип роботи котла з герметичним димоходом

Оскільки котли з герметичним димоходом не залежать від середовища, в якому вони знаходяться, немає необхідності провітрювати приміщення, де вони встановлені. Такі пристрої ідеально підходять для установок, які не підходять для використання димоходів, оскільки вони не потребують будівництва димоходів.

Реакція горіння - це хімічна реакція, яка відбувається в результаті вступу в реакцію палива і окислювача. Паливом зазвичай є вуглеводень, а окислювачем - повітря.

Продуктами окислення, що утворюються в результаті реакції згорання, є моноокис вуглецю (CO) і вода. По суті, горіння - це процес, за якого паливо реагує з реакційноздатним елементом, таким як кисень, з утворенням окислення для вивільнення енергії, яка виділяється у вигляді тепла.

Горіння виділяє тепло, оскільки це екзотермічна реакція. Причина виділення цього тепла полягає в тому, що зв'язки між молекулами вуглекислого газу, що утворюється, і води сильніші, ніж зв'язки між атомами кисню, які вступають у реакцію. Утворення цих міцних зв'язків призводить до вивільнення енергії.

Найважливішим фактором, що визначає характеристики горіння, є те, що кількість повітря, необхідна для горіння, є або низькою, або дуже високою, або необхідною.

З цієї причини горіння розрізняють відповідно до повітря в паливно-повітряній суміші:

- а) горіння з недостатньою кількістю повітря;
- б) горіння з надлишком повітря;
- 4) повне згоряння.

Горіння з недостатньою кількістю повітря означає, що повітря недостатньо надходить у реакцію, щоб змусити паливо горіти відповідно до теоретичного рівняння горіння. Горіння з недостатньою кількістю повітря має більш темний колір полум'я порівняно зі звичайним.

Кисень абсолютно нездатний зв'язуватися з чадним газом через невелику кількість повітря, що надходить у реакцію, і це призводить до вивільнення надлишку чадного газу з димової труби.

Це призведе до зменшення теплопередачі, спричиняючи накопичення кіптяви та забруднень на поверхнях теплопередачі. Неможливість досягти повного згоряння також відобразиться на втратах палива. Оскільки чадний газ є отруйним газом, він завдає шкоди як здоров'ю людей, так і навколишньому середовищу.

Горіння з надлишком повітря означає, що отриманого для згоряння палива повітря більше, ніж потрібно, відповідно до теоретичного рівняння горіння. Горіння з надлишком повітря має легкий і яскравий колір полум'я в порівнянні зі звичайним.

У разі надмірного спалювання повітря температура димових газів висока, а температура камери згоряння низька. Тому що, коли надходить занадто багато повітря, надлишок повітря, який не може увійти в реакцію, поглинає тепло горіння та спричиняє зниження ефективності. Тому ми повинні спалити більше палива, щоб отримати ту саму температуру теплоносія.

Повне згоряння - це випадок, коли в результуючій частині рівняння згоряння відсутній горючий газ. Відсутність CO в димових газах є ознакою повного згоряння. Як правило, загальна кількість CO в димових газах близька до нуля, а співвідношення CO₂ знаходиться на рівні 12-13%. Також у димохідному газі присутній азот.

Оскільки фактичні умови не збігаються з ідеальними умовами горіння, для забезпечення повного згоряння використовується надлишок повітря, але у цьому випадку тепловіддача нижча, ніж в процесі повного згорання природнього газу. Горіння з надлишком повітря збільшує витрати природнього газу для опалення та нагрівання води.

Комбіновані котли – це нагрівальні прилади, які використовуються в закритих приміщеннях для задоволення потреб у опаленні та забезпеченні гарячою водою. Комбіновані котли поділяються на кілька типів відповідно до їх властивостей [1].

У відповідності до подачі повітря і відведення відпрацьованих газів, комбіновані котли поділяють на:

- тип А – котел, у якому природній газ поєднується з киснем, який надходить із місця, де встановлено котел;
- тип В – котел з відкритим димоходом;
- тип С – котел з герметичною димоходом.

У відповідності до використання димових газів, комбіновані котли поділяють на:

- звичайні котли (тип В або С);
- конденсаційні котли (тільки для типу С).

У відповідності до робочого середовища, комбіновані котли поділяють на:

- котли для використання в приміщенні;
- котли для використання на відкритому повітрі.

У відповідності до системи запалювання, комбіновані котли поділяють на:

- котли із зовнішнім запалюванням;
- котли із електронним запалюванням.

У відповідності до типу теплообмінника, комбіновані котли поділяють на:

- монотермічні котли – теплообмінник, відокремлений від головного теплообмінника;
- бітермічні котли – нагрів гарячої води здійснюється в первинному теплообміннику.

У відповідності до типу палива, комбіновані котли поділяють на:

- котли на природному газі;
- котли на зрідженому газі.

Відповідно до забору свіжого повітря та відведення відпрацьованих газів комбіновані котли поділяються на три типи: А, В і С.

У котлах типу А паливний газ поєднується з киснем, який надходить із місця, де встановлено котел, а потім залишає газів згоряння в середовищі, в якому вони все ще знаходяться.

Хоча котли типу А не входять до складу сучасних комбінованих котлів, у літературі вони все ще зараховуються до типів комбінованих котлів. В якості прикладу котли типу А можна привести каталітичний нагрівач, який зображено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Каталітичний нагрівач [2]

Комбінований котел типу В з відкритим димоходом зображено на рисунку 1.3. У процесі згоряння в комбінованому котлі типу В поєднується природний газ з киснем, який необхідний для горіння.

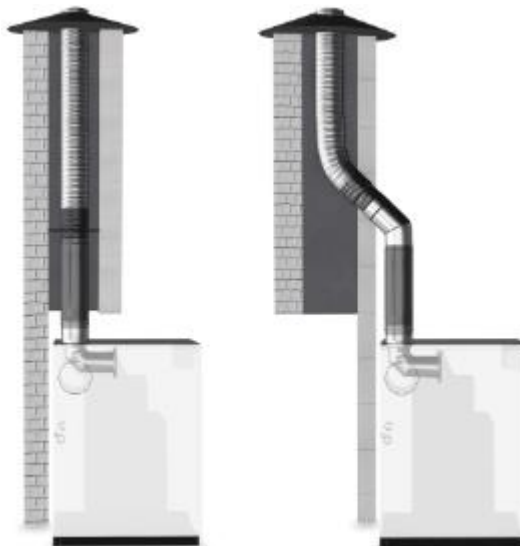


Рисунок 1.3 – Котел типу В з відкритим димоходом [3]

Повітря для горіння використовується із приміщення, де встановлено котел типу В. Відпрацьовані гази, які утворюються в результаті спалювання, виводяться у димохід будівлі.

Комбіновані котли з таким типом димоходу є комбінованими котлами з типу В з відкритим димоходом звичайного типу. У комбінованих котлах конденсаційного типу не використовуються димоходи типу В.

Комбіновані котли з герметичним димоходом забирають повітря ззовні, яке використовується для спалювання, з частини димоходу за допомогою вентилятора та виводять гази згоряння назовні через іншу частину димоходу за допомогою того самого вентилятора.

Оскільки всі ці газо- та повітрообміни здійснюються із зовнішнім середовищем, абсолютно необхідно, щоб прилад був підключений до зовнішнього середовища. Оскільки вони не залежать від середовища, в якому вони знаходяться, немає необхідності провітрювати приміщення, де вони встановлені. Такі котли ідеально підходять для приміщень, які не підходять для використання димоходів, оскільки вони не потребують будівництва димоходів.

Комбіновані котли з герметичним димоходом поділяються на звичайні та конденсаційні комбіновані котли. Основні принципи роботи звичайних і конденсаційних котлів з герметичною димоходом подібні, але камера згоряння, основна система теплообмінника та матеріал димоходу відрізняються, оскільки тепло накопичується в конденсаційному пристрої. На рисунку 1.4 зображена схема звичайного комбінованого котла з герметичним димоходом [4].

На відміну від звичайних котлів, комбіновані котли конденсаційного типу не мають відкритої камери згоряння. Камера згоряння комбінованого котла конденсаційного типу мають форму герметичної закритої камери, як зображено на рисунку 1.5.

Як для звичайних, так і для конденсаційних комбінованих котлів з герметичною димоходом, використовується вентилятор для примусової подачі повітря в камеру згоряння. Димохідна труба складається з двох концентричних внутрішніх труб. Повітря забирається із зовнішнього боку труби, тоді як вихлопні гази видаляються зсередини труби.

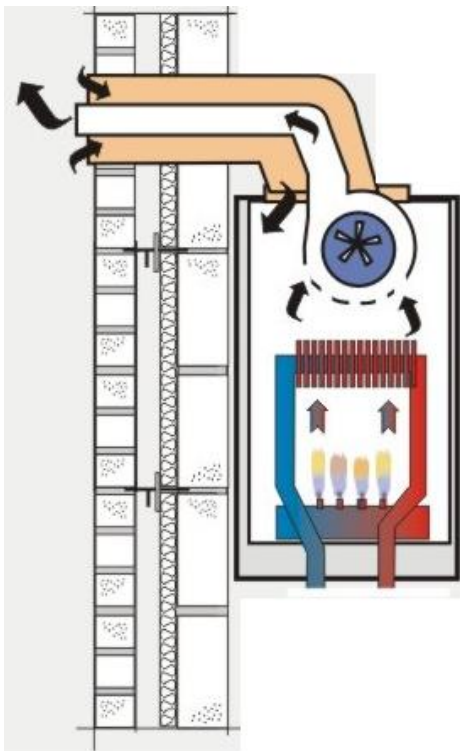


Рисунок 1. 4 – Схема звичайного комбінованого котла з герметичним
ДИМОХОДОМ

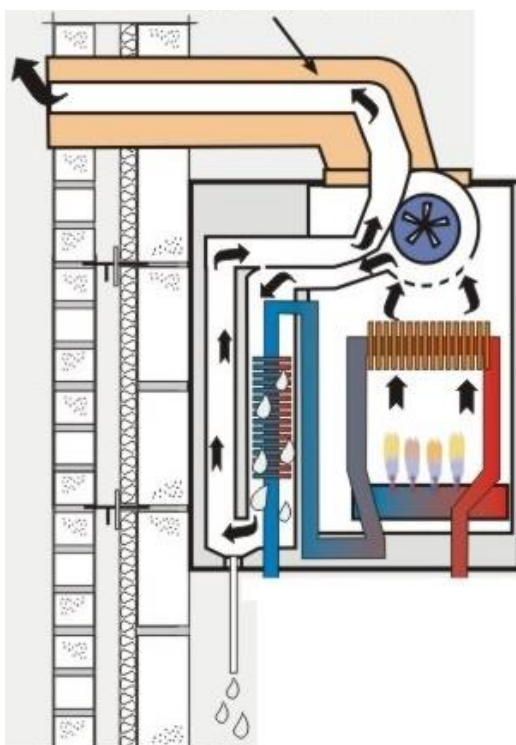


Рисунок 1.5 – Схема конденсаційного комбінованого котла з герметичним
ДИМОХОДОМ [4]

У звичайних комбінованих котлах для внутрішньої труби димоходу використовується стальна труба, тоді як внутрішня труба димоходу конденсаційного типу є пластиковим матеріалом.

У звичайних комбінованих котлах водяна пара, що утворюється після процесу згоряння, викидається в атмосферу разом із димовими газами. У цьому випадку прихована енергія у водяній парі не використовується.

Конденсаційні комбіновані котли призначені для використання водяної пари в димових газах. Основний теплообмінник, який має великий розмір і має форму теплової комірки, конденсує водяну пару в димовому газі та підвищує температуру води на вході за рахунок використання тепла, що утворюється під час конденсації.

Конденсаційна вода, що утворюється, є кислою і скидається через резервуар для конденсату всередині приладу, оскільки вона є шкідливою для навколишнього середовища.

Конденсаційні комбіновані котли працюють у середньому на 15% ефективніше, ніж звичайні котли, оскільки вони використовують значну частину тепла димових газів у процесі нагрівання.

1.2 Конструкція комбінованого котла

Схема розташування загальних компонентів сучасного конденсаційного котла показана на рисунку 1.6 [5]. Основним принципом роботи газового котла є використання хімічної енергії природного газу, що виділяється при згорянні, для нагрівання робочого тіла системи опалення.

У той час як у минулому каміни використовували хімічну енергію вугілля для обігріву, більша частина теплової енергії, що виділяється, виходила в димохід через конвекцію.

Метою газових котлів і нагрівачів, що працюють на паливі, деревних пелетах та інших хімічних паливних системах спалювання, є отримання якомога

більшої кількості теплової енергії з теплотворної здатності палива та передача її в розподільчу мережу, зводячи до мінімуму втрати в димохід або димохід.

Тому метою буде 100% перетворення хімічної енергії на тепло в системі опалення шляхом зниження температури та вологості димових газів до температури зовнішнього повітря.

Оскільки при спалюванні цих вуглеводнів утворюється переважно CO_2 і H_2O , хімічна енергія, що міститься в агрегаті, має два визначення: високу теплотворну здатність і низьку теплотворну здатність, які відрізняються за величиною прихованою теплотою випаровування утвореної води від згоряння палива, для чистого метану це буде 39,8 і 36,6 МДж/м³ відповідно.

Склад природного газу змінюється залежно від частки метану, етану та інших газів, що входять до його складу. Газова мережа подає газ у межах від 37,5 МДж/м³ до 43,0 МДж/м³, який контролюється на приймальному терміналі та в інших місцях мережі.

Таким чином, будь-яке значуще визначення теплової ефективності системи опалення, заснованої на спалюванні вуглеводнів, має використовувати високу теплотворну здатність, щоб досягнути ефективності вище 100%. Ефективність цього перетворення на практиці залежить від температури, при якій вода центрального опалення повертається з контуру опалення та надходить у первинний теплообмінник (враховуючи, що температура газового полум'я є відносно постійною та відносно високою).

Найзначніший прогрес у ефективності газових котлів за останні роки залежить від цього принципу, завдяки використанню достатньо низької температури зворотної лінії, щоб забезпечити конденсацію продуктів згоряння в теплообміннику та тим самим розблокувати приховане тепло всередині, таким чином дозволяючи конверсії наблизитися до повної високої теплотворної здатності.

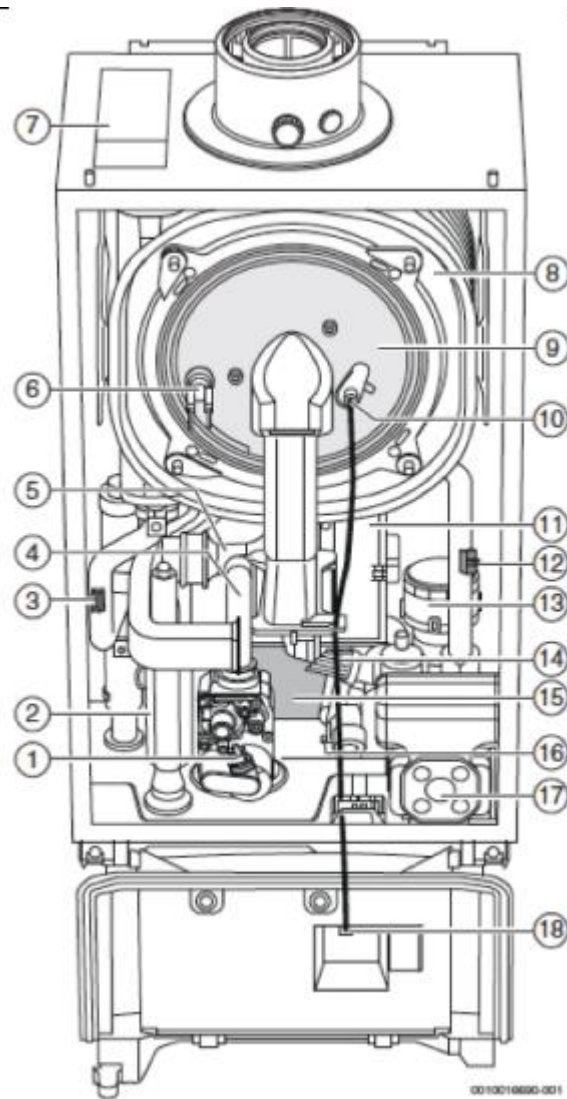


Рисунок 1.6 – Схема розташування загальних компонентів сучасного конденсаційного котла:

- 1 - газовий клапан; 2 - сифон для конденсату; 3 - давач температури подачі;
 4 - газова труба; 5 - запобіжний клапан; 6 - термостат пальника; 7 - інформаційний дисплей; 8 - основний теплообмінник; 9 – пальник; 10 - електрод іонізації та запалювання; 11 – вентилятор; 12 - зворотній температурний давач;
 13 - перекидний клапан; 14 - датчик тиску; 15 - пластинчастий теплообмінник;
 16 - давач витрат; 17 – насос; 18 - кабель запалювання

Зв'язок між коефіцієнтом корисної дії котла та температурою димових газів (тісний зв'язок із температурою зворотної лінії та ефективністю теплообмінника) показаний на рисунку 1.7 [6].

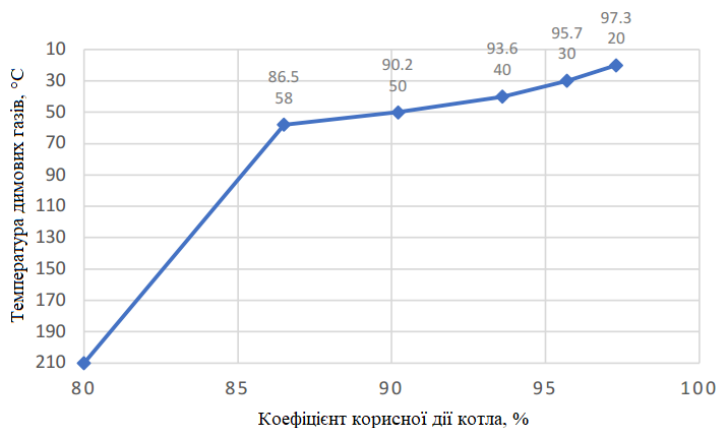


Рисунок 1.7 – Залежність між коефіцієнтом корисної дії котла та температурою димових газів [6]

Температура димових газів, при якій вода згорання починає конденсуватися, становить 58°C , це буде практична максимальна ефективність «звичайного» (без конденсації) котла; оскільки конденсат пошкоджує теплообмінники. При температурах димових газів, нижчих за цю температуру, ефективність зростає, але не так різко, як при температурі вище температури конденсації.

Ефективність цього перетворення на практиці залежить від температури, при якій вода центрального опалення повертається з контуру опалення та надходить у первинний теплообмінник (враховуючи, що температура газового полум'я є відносно постійною та відносно високою).

Ефективність котла залежить не лише від температури димових газів, але й від співвідношення газу та повітря, яке також відіграє вирішальну роль у процесі згорання, впливаючи на ефективність і викиди.

Температура точки роси продуктів згорання залежить від співвідношення газ/повітря, як зображено на рисунку 1.8 [7].

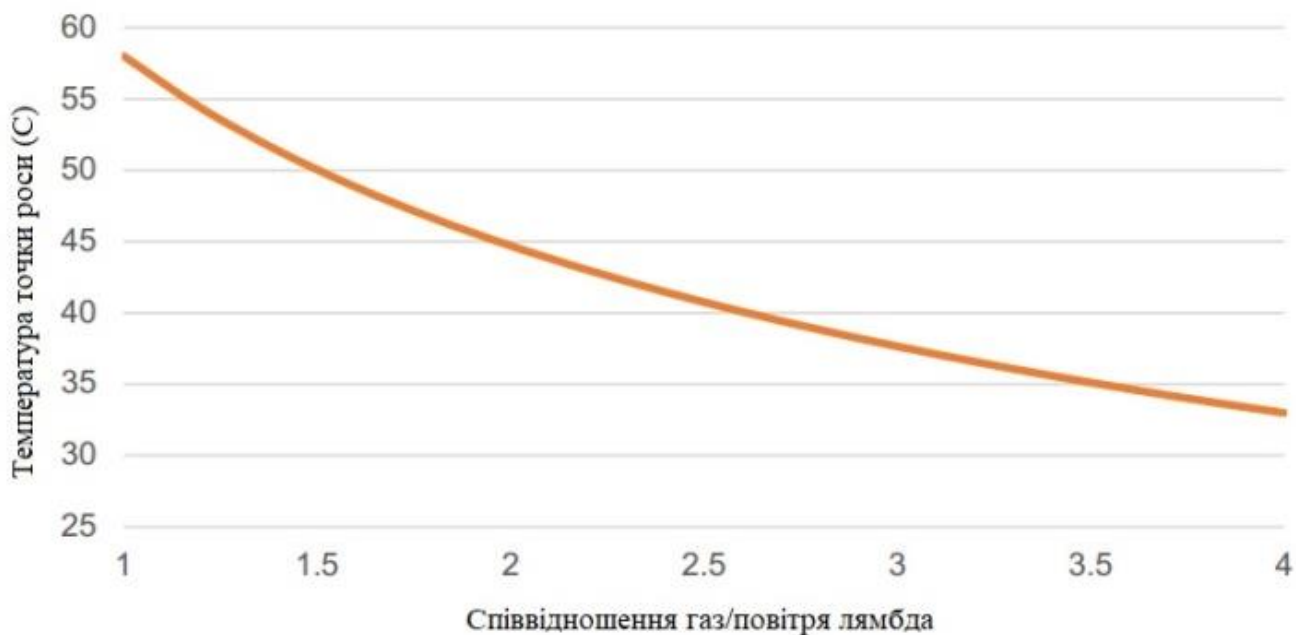


Рисунок 1.8 – Температура точки роси димового газу як функція співвідношення газ/повітря лямбда [7]

Дані, які зображені на рисунку 1.8, дійсні для стехіометричного горіння з хімічно ідеальним співвідношенням газ/повітря. Лямбда є зручним параметром для представлення співвідношення газ/повітря при згорянні відносно стехіометричного горіння.

Якщо лямбда дорівнює 1 до 1, то це призводить до стехіометричного горіння. Якщо лямбда більше одиниці, то це призводить до збідненого горіння, а якщо менше одиниці, то це призводить до збагаченого горіння.

Відхід від стехіометричного спалювання до збідненого газу знижує температуру точки роси, тим самим знижуючи потенціал ефективності. Перехід до збагаченого газом має свої недоліки, оскільки підвищує ризик неповного згорання та викидів CO, що створює ризик для безпеки.

Конденсація води з димового газу для вивільнення прихованого тепла не є перевагою, яка приходить безслідно. Природний газ містить добавки та домішки, а також оксиди азоту від спалювання, які призводять до кислотного та корозійного конденсату в теплообміннику.

На практиці звичайні неконденсаційні котли не працюють надто близько до температури димових газів 58°C через ризик локалізованої конденсації в теплообміннику, що призведе до корозії матеріалів і скорочення терміну служби котла.

Конденсаційні котли, однак, мають конструкції теплообмінника, як з точки зору матеріалу, так і з точки зору компонування, які можуть справлятися з кислим рідким конденсатом, який є побічним продуктом згоряння.

На відміну від двигунів внутрішнього згоряння, на ефективність газового котла не впливає суттєво навантаження, при якому він працює. Звичайні котли без конденсації спочатку були розроблені як прилади з фіксованою продуктивністю з газовими клапанами з фіксованою витратою.

У атмосферних котлах, повітря для згоряння захоплюється потоком газу в пальнику, щоб забезпечити згоряння, причому співвідношення газ/повітря визначається динамікою рідини всередині пристрою.

За допомогою використання постійно запаленого полум'я або пізніше іскрового запалювання режим роботи полягав у відкриванні та закриванні газового клапана та термоелемента, щоб перевірити, чи відбулося запалювання та було встановлено стабільне полум'я.

З додаванням витяжних вентиляторів зі змінною швидкістю потоку та газових клапанів з декількома витратами потоку було введено певний ступінь модуляції, але це відбулося лише після спільних нововведень попереднього змішування газу/повітря перед пальником і більшого або вторинного теплообмінника, щоб котли могли реалізувати свій потенціал ефективності.

Хоча на перший погляд це може свідчити про те, що газові котли є термодинамічно простою та надійною формою опалювальної технології, з точки зору факторів, що сприяють роботі та ефективності, реальність, як завжди, складніша, і постійний розвиток котлів відображає це.

Вимоги до потужності нагріву гарячої води вказуються на основі максимальної миттєвої потреби в теплі, яка для комбінованого приладу є

максимальною потребою в потужності гарячої води, яка може виникнути в будинку.

Враховуючи, що температура холодної води на вході змінюється в межах відомого діапазону протягом року, а температуру гарячої води на виході можна вважати постійною, головною змінною, що впливає, є витрата.

В якості простого наближення для оцінки потреби в гарячій воді виробники котлів часто вдаються до рекомендацій моделей комбінованих котлів на основі кількості ванних кімнат у будинку для максимальної одночасної потреби в гарячій воді.

Розробляючи котли зі змінною швидкістю/модулюючим рівнем вихідної потужності, це можна було б використовувати не тільки для полегшення прямого нагріву гарячої води, але й також можна було б використовувати в режимі обігріву приміщення, забезпечуючи покращений контроль кімнатної температури, але ця подвійна функціональність і модуляція можуть вплинути на ефективність.

1.3 Висновки до першого розділу

1. Комбіновані котли з герметичним димоходом поділяються на звичайні та конденсаційні комбіновані котли. Основні принципи роботи звичайних і конденсаційних котлів з герметичною димоходом подібні, але камера згоряння, основна система теплообмінника та матеріал димоходу відрізняються, оскільки тепло накопичується в конденсаційному пристрої.

2. Конденсаційні комбіновані котли призначені для використання водяної пари в димових газах. Основний теплообмінник, який має великий розмір і має форму теплової комірки, конденсує водяну пару в димовому газі та підвищує температуру води на вході за рахунок використання тепла, що утворюється під час конденсації.

3. Конденсаційні комбіновані котли працюють у середньому на 15% ефективніше, ніж звичайні котли, оскільки вони використовують значну частину тепла димових газів у процесі нагрівання.

4. Ефективність котла залежить не лише від температури димових газів, але й від співвідношення газу та повітря, яке також відіграє вирішальну роль у процесі згоряння, впливаючи на ефективність і викиди.

5. Лямбда є зручним параметром для представлення співвідношення газ/повітря при згорянні відносно стехіометричного горіння. Якщо лямбда дорівнює 1 до 1, то це призводить до стехіометричного горіння. Якщо лямбда більше одиниці, то це призводить до збідненого горіння, а якщо менше одиниці, то це призводить до збагаченого горіння.

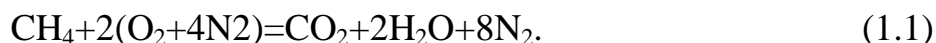
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ

2.1 Математична модель процесу горіння

Для складання рівнянь горіння дуже важливо знати вміст кисню в повітрі. Як відомо, повітря в основному складається з атомів азоту (78%) та кисню (21%). Аргон містить 0,9% і є найбільшим компонентом з решти 1% газів. Усі інші гази в повітрі містять всього лише 0,1%.

Спалювання в комбінованих котлах відбувається в камері згорання. Спалювання в конденсаційному комбінованому котлі відбувається в теплообміннику, тоді як згорання в звичайному комбінованому котлі відбувається в камері згорання під первинним теплообмінником.

У комбінованих котлах в якості палива зазвичай використовується природний газ. Природний газ в основному складається з метану. Через це в рівняннях метан використовується як паливо для загального відображення рівняння горіння природного газу, тоді як співвідношення компонентів повітря прийнято приблизно як 20% кисню та 80% азоту.



У реальному житті природний газ складається не тільки з метану. Щоб зробити наукові розрахунки, спочатку необхідно вивчити вміст природного газу та точно знати компоненти вмісту.

Хоча природний газ переважно складається з метану, він також містить різні вуглеводневі групи. Він також містить азот, чадний газ, кисень і водень, навіть у невеликих кількостях.

Для теоретичного повітря, яке включено в рівняння, компонентами низького вмісту повітря нехтують, а співвідношення компонентів розраховують як 21% кисню та 79% азоту.

Стехіометрія - це взаємозв'язок між вагами реагентів і продуктів до, під час і після хімічних реакцій. Стехіометрія заснована на законі збереження маси, де загальна маса реагентів дорівнює загальній масі продуктів, що призводить до розуміння того, що співвідношення між кількостями реагентів і продуктів зазвичай утворюють відношення натуральних додатних чисел.

Це означає, що якщо відомі кількості окремих реагентів, то можна обчислити кількість продукту. І навпаки, якщо один реагент має відому кількість, і кількість продуктів може бути визначена емпірично, то можна обчислити і кількість інших реагентів.

Стехіометрична кількість або стехіометричне відношення реагенту - це оптимальна кількість або співвідношення, при якому, припускаючи, що реакція йде до завершення:

- увесь реагент витрачається;
- дефіциту реагенту немає;
- надлишку реагенту немає.

У реакції горіння кисень вступає в реакцію з паливом, і точка, де витрачається саме весь кисень і все паливо спалюється, визначається як стехіометрична точка. При більшій кількості кисню (надмірне стехіометричне горіння) частина його залишається не використаною. Так само, якщо згорання неповне через відсутність достатньої кількості кисню, паливо залишається не використаним.

Не використане паливо також може залишитися через повільне згорання або недостатнє змішування палива з киснем – це не пов'язано зі стехіометрією. Різні вуглеводневі види палива мають різний вміст вуглецю, водню та інших елементів, тому їх стехіометрія різна.

Зазначимо, що кисень становить лише 20,95% об'єму повітря, і лише 23,20% його маси. Співвідношення повітря-паливо, набагато вище, ніж еквівалентне співвідношення кисню та палива, через високу частку інертних газів у повітрі.

Природний газ (також викопний газ) - це природна суміш газоподібних вуглеводнів, що складається в основному з метану на додаток до різних менших кількостей інших вищих алканів.

Також зазвичай присутні низькі рівні супутніх газів, таких як вуглекислий газ, азот, сірководень і гелій. Оскільки природний газ не має запаху, для безпеки до нього зазвичай додають одоратори, такі як меркаптан (який пахне сіркою або тухлими яйцями), щоб можна було легко виявити витіки.

Стехіометричне співвідношення повітря до палива для природного газу визначається по масі, за об'ємом та відсотком палива за масою. Стехіометричне співвідношення повітря до природного газу:

- по масі 17,2/1 [7];
- за об'ємом 9,7/1 [8];
- відсотком палива за масою 5,8% [8].

Температура адіабатичного полум'я - це температура, досягнута полум'ям в ідеальних умовах. Це верхня межа температури, яка досягається в реальних процесах. Припускаючи початкові атмосферні умови (1 бар і 20 °C), для природного газу температура адіабатичного полум'я складає $T=1960$ °C [8].

Аналіз стехіометричного співвідношення повітря до палива для природного газу, яке визначається по масі, за об'ємом та відсотком палива за масою і наведене в [7, 8], визначає оптимальне по масі співвідношення між повітрям і природним газом 17,2/1.

У сучасних комбінованих котлах використовується співвідношення між повітрям і природним газом в діапазоні 25/1-30/1. Це не відповідає оптимальному по масі співвідношенню між повітрям і природним газом 17,2/1. В наслідок цієї невідповідності виникають великі втрати теплоти через димохід із вихідними газами [9].

Метою спалювання палива в камері згорання є підвищення температури газового потоку, і температура полум'я є одним із факторів, оскільки вона впливає на швидкість реакції горіння. Іншим параметром, який впливає на швидкість реакції, є тиск горіння. За відсутності зовнішнього теплообміну досягнута

температура називається адіабатичною температурою полум'я. На практиці завжди існує деяка теплопередача, і температура, досягнута під час горіння, завжди нижча за справжню адіабатичну температуру полум'я.

При температурі полум'я вище 1800 °К продукти згорання можуть дисоціювати з утворенням радикалів і частинок. Ці реакції поглинають енергію (ендотермічні) і додатково знижують температуру полум'я. При порівнянні температур полум'я різних видів палива зручно працювати з коефіцієнтами еквівалентності.

Для збіднених сумішей коефіцієнт еквівалентності буде меншим за одиницю, а для багатих сумішей коефіцієнт еквівалентності буде більшим за одиницю. Співвідношення паливо-повітря, що відповідають стехіометричному відношенню, мають коефіцієнт еквівалентності, що дорівнює одиниці.

На рисунку 1.9 [10] показано адіабатичну температуру полум'я для метану, яка змінюється залежно від коефіцієнта еквівалентності. На малюнку також показано відхилення фактичної адіабатичної температури полум'я від теоретичного значення внаслідок ефектів дисоціації.

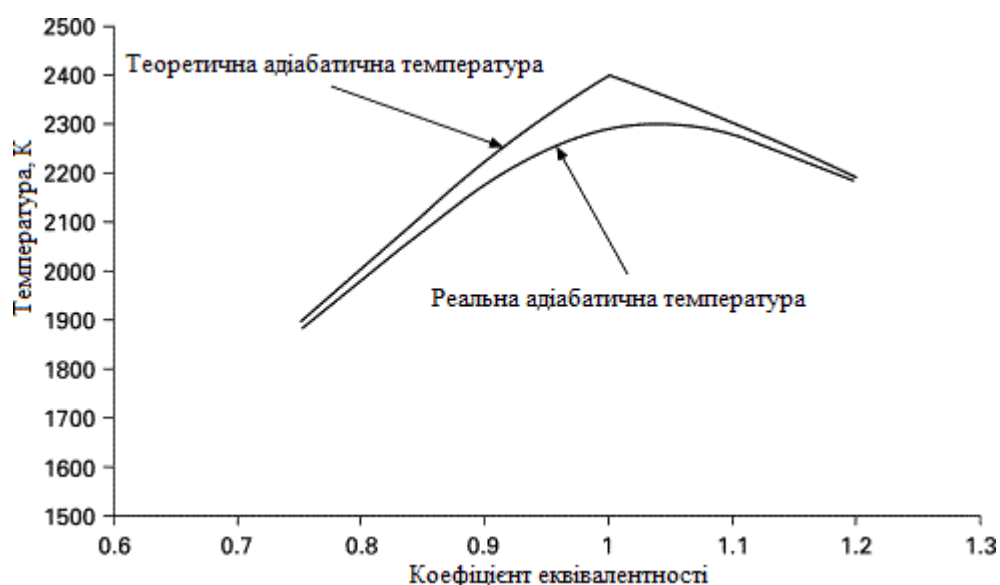


Рисунок 1.9 - Адіабатична температура полум'я для метану, яка змінюється залежно від коефіцієнта еквівалентності [10]

Максимальна фактична адіабатична температура полум'я виникає у злегка насичених сумішах (наприклад, $\varphi=1,05$). Адіабатична температура для палива з вищим вмістом вуглецю буде вищою, а коефіцієнт еквівалентності, де спостерігається максимальна адіабатична температура полум'я, також збільшується.

2.2 Удосконалений метод керування котлом

Удосконалений метод керування газовим котлом, який дозволяє підвищити ефективність згорання палива, за рахунок вимірювання температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

За допомогою цього методу, давач вимірює температуру полум'я в пальнику котла. Після цього система керування може регулювати подачу палива та повітря в камеру згорання, щоб забезпечити оптимальні умови для ефективного згорання. Контроль температури полум'я дозволяє підтримувати оптимальну температуру для згорання палива і, таким чином, забезпечує оптимальну ефективність котла.

Цей метод допомагає зменшити викиди шкідливих речовин, підвищити ефективність опалення і зменшити споживання палива, що може призвести до зменшення витрат енергії та витрат на опалення в цілому.

Впровадження удосконаленого методу керування опалювальним котлом базується на використанні компонентів сучасного конденсаційного котла, які забезпечують згорання природнього газу та виведення димових газів із котла.

Важливим компонентом сучасного конденсаційного котла є газовий клапан, який зображено на рисунку 1.10 [11].

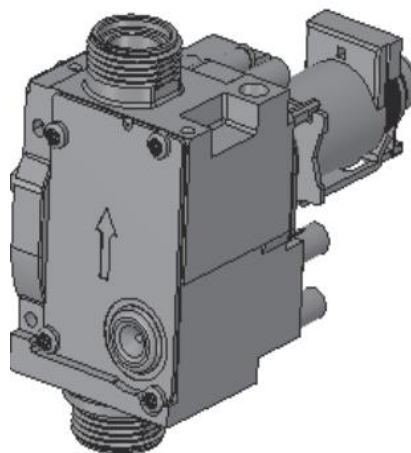


Рисунок 1.10 - Газовий клапан [11]

Газовий клапан регулює кількість паливного газу, необхідного для згоряння, яке подається в пальник. Ступінь відкриття газового клапана та його повне відкриття/закриття контролюються основною платою приладу. Газовий клапан виконує функцію регулювання подачі газу шляхом взаємодії рухомих котушок. Оскільки висота полум'я, ефективність приладу та температура гарячої води для домашнього господарства залежать від ступені відкриття газового клапана, ця функція є дуже важливою.

Іншим важливим компонентом газового котла є пальник. Пальник - це місце, де паливо, що спалюється, надходить від газового клапана до форсунок через колектор і змішується з повітрям. Завдяки розпалювальному електроду на пальнику здійснюється процес горіння. До складу пальник входять колектор і форсунки, як зображено на рисунку 1.11 [11].

Пальник розміщується у камері згоряння. Камера згоряння - це закрита ізольована камера, у якій газ і повітря змішуються і спалюються в пальнику. Для забезпечення теплоізоляції стінок камери згоряння використовується спеціальний вогнестійкий матеріал, як показано на рисунку 1.12 [11].

Важливим компонентом газового котла є вентилятор, який зображено на рисунку 1.13 [11].

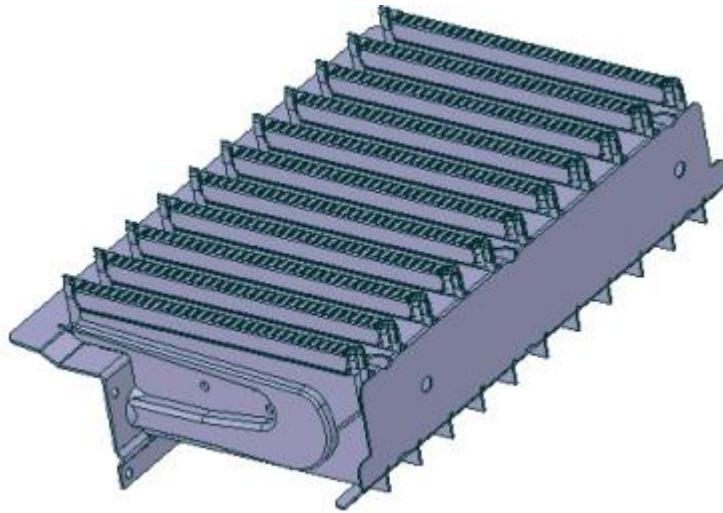


Рисунок 1.11 – Пальник [11]



Рисунок 1.12 – Камера згоряння [11]

Вентилятор забирає свіже повітря ззовні приміщення для процесу горіння та відводить вихлопний газ, який утворюється після згоряння, через димову трубу. Вентилятор є однією з двох найважливіших частин системи разом із газовим клапаном завдяки функції регулювання процесу горіння.

Завдяки функції регулювання, коли швидкість вентилятора змінюється - кількість повітря, що надходить у камеру згоряння також змінюється і відбувається ефективне згоряння.

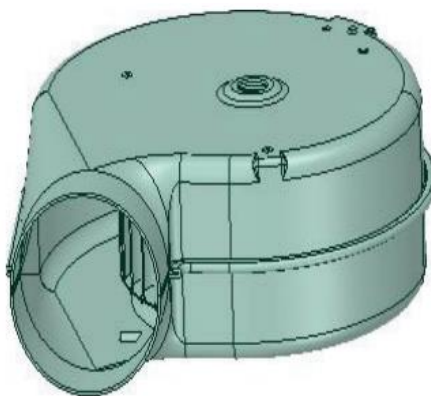


Рисунок 1.13 – Вентилятор [11]

Коли кількість вхідного повітря низька, паливний газ використовується без повного згорання, а якщо кількість вхідного повітря надто велика, то теплота, яка утворюється в процесі згорання, зменшується через велику кількість вхідного повітря.

У відповідності до запропонованого удосконаленого методу керування газовим котлом в процесі горіння здійснюється вимірювання температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

З точки зору ефективності газового котла, контроль надлишку повітря дуже важливо правильно налаштувати. Коли в процесі згорання занадто багато повітря, спалюється додаткове паливо, щоб підвищити температуру цього надлишку повітря до температури згорання.

Надлишок повітря поглинає тепло, яке йде вгору, а не на нагрівання. Щоб контролювати надлишок повітря до мінімального рівня, необхідно жорстко контролювати його «безпечним способом». Якщо в процес згорання надходить недостатньо повітря, все паливо не згорить і, отже, буде втрачено в димохід у вигляді горючих речовин. Це не тільки призводить до очевидної втрати цінної енергії, створює небезпеку забруднення повітря.

У випадку, якщо схема регулювання надлишку повітря розроблена неправильно або якщо виникають проблеми з налаштуванням або керуванням

ПД, регулювання надлишку повітря циклічно зростає та опускається навколо заданого значення.

Це змушує або працювати зі схемою керування в ручному режимі, або працювати з високим надлишком повітря. Контроль надлишку повітря є найважливішим інструментом для управління енергоефективністю та атмосферними викидами системи газового котла.

Окрім схеми керування потоком живлення газового котла, іншими важливими цілями є контроль температури на виході печі та підтримка правильного стехіометричного співвідношення повітря та паливного газу.

Існує природна тенденція, що у промислових газових котлах підтримують надлишок повітря більший, ніж потрібно, щоб гарантувати, що все паливо повністю згорить із надлишком повітря.

Для вимірювання надлишку повітря в газовому котлі передбачено аналізатор надлишку кисню для вимірювання надлишку O_2 у димових газах. У випадках, коли аналізатор надлишку кисню недоступний або ненадійний, необхідно контролювати співвідношення повітря/паливо, щоб запобігти неправильній роботі пальників і впливу на горіння. На рисунку 1.14 показані типові прилади, які встановлені в газовому котлі.

Контроль температури на виході газового котла з одночасним збереженням безпечного співвідношення повітря та палива є головним пріоритетом. Як правило, для оптимізації роботи газового котла та зменшення споживання палива рекомендується мінімум 1-2 % надлишку кисню.

Щоб досягти цього, схема контролю надлишкового кисню повинна працювати правильно без будь-яких коливань і повинна швидко усувати збурення.

Основні перешкоди виникають через потік живлення, температуру живлення на вході, калорійність паливного газу або тиск паливного газу в колекторі.

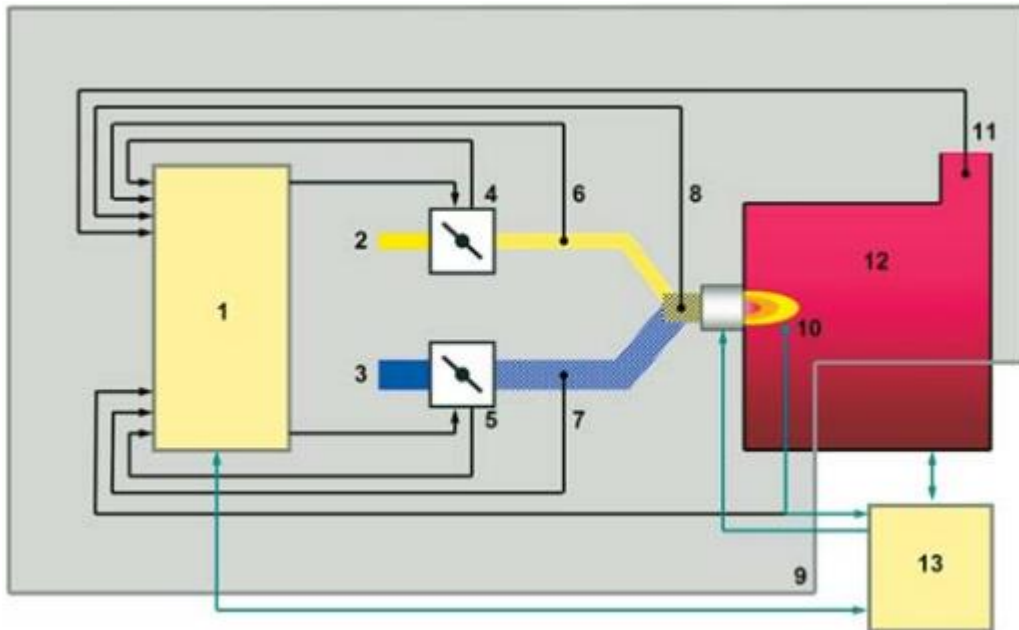


Рисунок 1.14 - Структурна схема регулятора співвідношення повітря/газ: 1 – блок керування; 2 – система подачі газу; 3 – система подачі повітря; 4 – регулятор подачі газу; 5 – регулятор подачі повітря; 6 – давач газу; 7 – давач повітря; 8 – давач суміші газ/повітря; 9 – границя системи регулювання співвідношення повітря/газ; 10 – давач температури полум'я; 11 – давач димохідних газів; 12 – камера згорання; 13 – блок керування пальником

Щоб чітко контролювати температуру на виході з пальника, мінімізуючи надлишок кисню до мінімально допустимої межі, у газовому котлі необхідно впровадити належним чином розроблену схему керування.

Для цього була запропонована наступна схема керування. Ця схема автоматично й безперервно регулює потік повітря, щоб підтримувати оптимальне співвідношення повітря та палива в будь-який час і за умов змінного навантаження. Крім того, є компенсація тиску та температури для витратомірів палива та повітря.

Зі збільшенням потреби в паливі спочатку збільшиться потік повітря, а потім потік палива, щоб уникнути будь-якого низького співвідношення повітря до газу.

При зменшенні потреби в паливі спочатку зменшується потік палива, а потім – повітря.

Здійснюється компенсація потоку повітря температурою та тиском повітря.

Здійснюється компенсація потоку паливного газу температурою і тиском палива.

Здійснюється регулювання високого та низького тиску газу, щоб уникнути відключення газового котла при низькому чи високому тиску газу.

Здійснюється регулювання мінімального співвідношення повітря до природного газу. Відбувається забезпечення зсуву співвідношення повітря до палива.

Схема керування для кожного газового котла може дещо змінюватись залежно від процесу, але основні цілі керування залишаються незмінними. Будь-яка модифікація в існуючій схемі керування має без винятку взаємодіяти з існуючими засобами керування газового котла.

Цю запропоновану схему можна легко реалізувати в газовому котлі за допомогою стандартних блоків та обчислень. Окрім впровадження правильної схеми керування, не менш важливо правильно налаштувати контури ПД.

Програмне забезпечення розраховує правильні параметри, щоб вам не довелося переглядати їх знову. Зрештою, програмне забезпечення допомагає швидше досягти бажаного результату.

Впроваджуючи схему автоматичного контролю надлишку O_2 у газовому котлі, можна досягти економії газу шляхом зменшення та контролю надлишку O_2 у димових газах. Ця економія газу також призводить до зменшення викидів CO_2 .

Фактична річна економія споживання газу залежить від кількох робочих параметрів, таких як швидкість спалювання, температура вихлопу, вартість природного газу і кількість робочих годин газового котла на рік.

Економія енергії коливається від 5% для низькотемпературного процесу до 20% для високотемпературного процесу шляхом контролю надлишку повітря до мінімально допустимого рівня.

2.3 Висновки до другого розділу

1. У реакції горіння кисень вступає в реакцію з паливом, і точка, де витрачається саме весь кисень і все паливо спалюється, визначається як стехіометрична точка. При більшій кількості кисню (надмірне стехіометричне горіння) частина його залишається не використаною. Так само, якщо згорання неповне через відсутність достатньої кількості кисню, паливо залишається не використаним.

2. У відповідності до запропонованого удосконаленого методу керування газовим котлом в процесі горіння здійснюється вимірювання температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

3. З точки зору ефективності газового котла, контроль надлишку повітря дуже важливо правильно налаштувати. Коли в процесі згорання занадто багато повітря, спалюється додаткове паливо, щоб підвищити температуру цього надлишку повітря до температури згорання.

4. Надлишок повітря поглинає тепло, яке йде вгору, а не на нагрівання. Щоб контролювати надлишок повітря до мінімального рівня, необхідно жорстко контролювати його «безпечним способом». Якщо в процес згорання надходить недостатньо повітря, все паливо не згорить і, отже, буде втрачено в димохід у вигляді горючих речовин. Це не тільки призводить до очевидної втрати цінної енергії, створює небезпеку забруднення повітря.

5. Запропоновано структурну схему регулятора співвідношення повітря/газ. Контроль температури на виході газового котла з одночасним збереженням безпечного співвідношення повітря та палива є головним пріоритетом. Як правило, для оптимізації роботи газового котла та зменшення споживання палива рекомендується мінімум 1-2 % надлишку кисню.

6. Щоб досягти цього, схема контролю надлишкового кисню повинна працювати правильно без будь-яких коливань і повинна швидко усувати збурення. Основні перешкоди виникають через потік живлення, температуру живлення на вході, калорійність паливного газу або тиск паливного газу в колекторі.

3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ

3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу керування КОТЛОМ

На рисунку 3.1 зображено імітаційну модель системи опалення будинку, в якій застосовано удосконалений метод керування котлом.

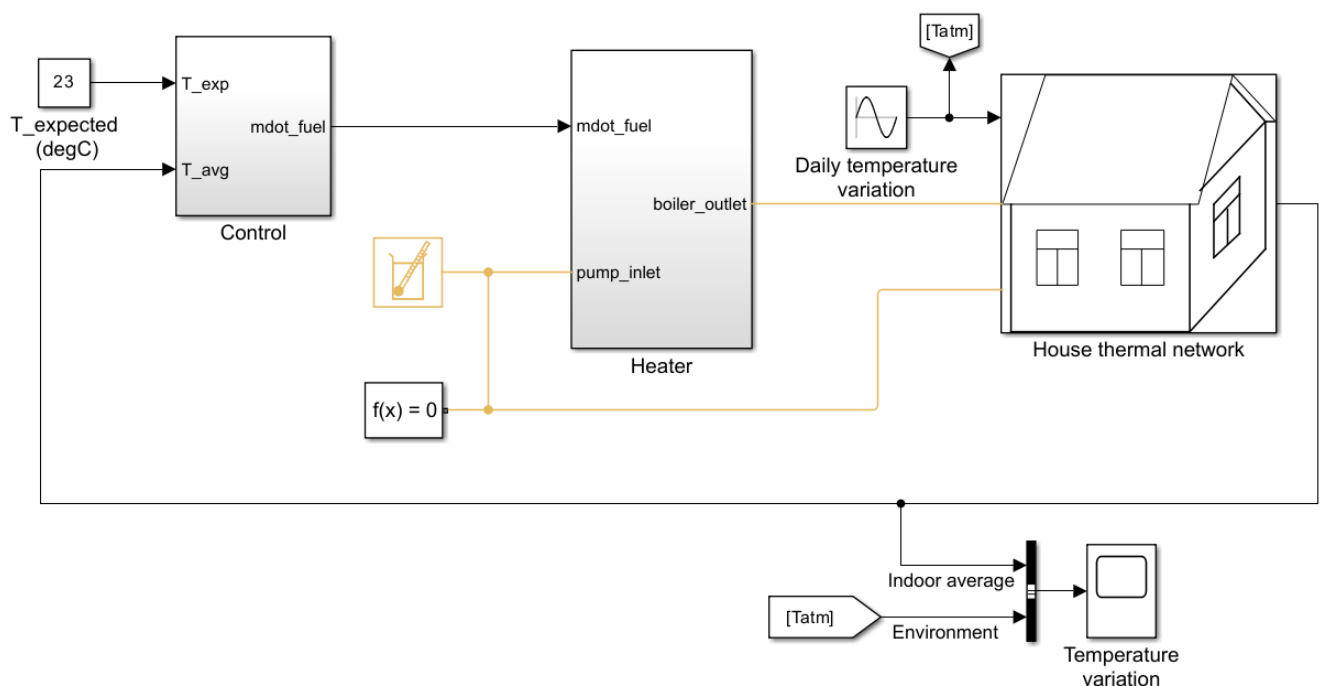


Рисунок 3.1 - Імітаційна модель системи опалення будинку, в якій застосовано удосконалений метод керування котлом

Модель містить обігрівач, контролер і будинкову конструкцію з чотирма радіаторами і чотирма кімнатами. Кожна кімната обмінюється теплом з навколишнім середовищем через зовнішні стіни, дах і вікна.

Передача тепла моделюється як комбінація теплової конвекції, теплопровідності та теплової маси. Передбачається, що тепло не передається всередину між приміщеннями.

Нагрівач складається з газового котла, гідроаккумулятора та насоса для циркуляції гарячої води в системі. Контролер починає впускати паливо в газовий котел, якщо загальна середня температура приміщень опускається нижче $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, і припиняє впускати паливо в газовий котел, якщо температура перевищує $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Моделювання розраховує вартість опалення та температуру в приміщенні.

Розглянемо імітаційну модель підсистеми обігрівач (Heater), який зображено на рисунку 3.2.

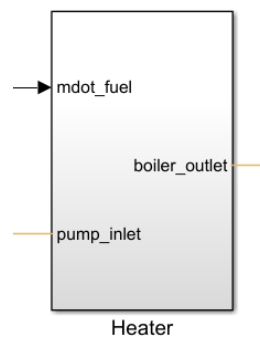


Рисунок 3.2 – Блок підсистеми обігрівач (Heater)

Блок підсистеми обігрівач (Heater) моделюється за допомогою імітаційної моделі, яка зображена на рисунку 3.3.

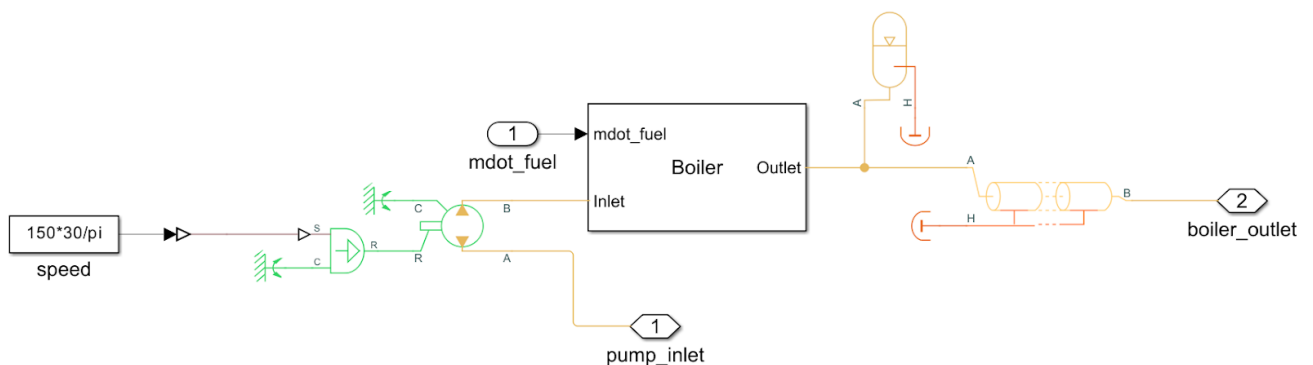


Рисунок 3.3 - Імітаційна модель підсистеми обігрівач (Heater)

До складу імітаційної моделі підсистеми обігрівач (Heater) входить блок насос фіксованого об'єму (TL), який зображено на рисунку 3.4.

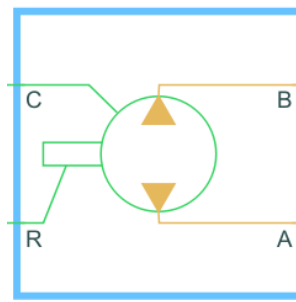


Рисунок 3.4 - Блок насос фіксованого об'єму (TL)

Блок насос фіксованого об'єму (TL) моделює насос з постійним об'ємним об'ємом, який подає механічну енергію в мережу теплової рідини. Він враховує втрати через потік витоків і момент тертя.

Насос може працювати як в прямому, так і в зворотному напрямку в залежності від обертання вала. Він також може працювати як двигун, який приводить в рух вал.

Порти А і В є портами для під'єднання рідини, пов'язаними з входом і випуском насоса. Порти R і C є механічними портами під'єднання обертання, пов'язаними з валом і корпусом відповідно.

Додатне обертання порту R відносно порту C призводить до збільшення потоку рідини та збільшення тиску від порту А до порту В. Об'ємний ККД, механічний ККД, об'ємні втрати та механічні втрати можна додатково встановити за допомогою фізичних сигнальних входів EV, EM, LV та LM відповідно.

Параметри блоку насоса фіксованого об'єму (TL) задаються у відповідності до вікна встановлення параметрів, яке зображено на рисунку 3.5.

Швидкість обертання блоку насоса фіксованого об'єму (TL) регулюється за допомогою блоку джерела кутової швидкості, який зображено на рисунку 3.6.

Блок моделює ідеальне джерело кутової швидкості, яке генерує диференціал швидкості на своїх терміналах, пропорційний фізичному вхідному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану швидкість незалежно від крутного моменту, що діє на систему.

Block Parameters: Fixed-Displacement Pump (TL)		
Fixed-Displacement Pump (TL) <input checked="" type="checkbox"/> Auto Apply		
Settings Description		
NAME	VALUE	
Parameters		
Leakage and friction parameterization	Analytical	
> Displacement	2e-5	m ³ /rad
> Nominal shaft angular velocity	150	rad/s
> Nominal pressure gain	1	bar
> Nominal dynamic viscosity	0.9	cP
> Volumetric efficiency at nominal conditions	0.92	
> Mechanical efficiency at nominal conditions	0.88	
> No-load torque	0.05	N*m
> Cross-sectional area at ports A and B	0.01	m ²

Рисунок 3.5 - Вікно встановлення параметрів блоку насоса фіксованого об'єму (TL)

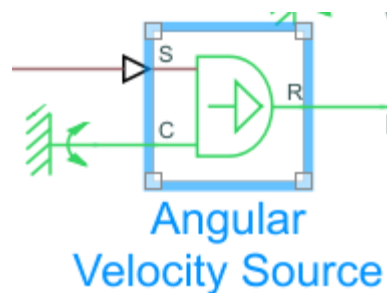


Рисунок 3.6 - Блок джерела кутової швидкості

Блокові з'єднання R і C є механічними ротаційними портами. Порт S є фізичним сигнальним портом, через який подається керуючий сигнал, який керує джерелом. Відносна швидкість визначається виразом (3.1).

$$W = W_R - W_C, \quad (3.1)$$

де W_R і W_C - абсолютні кутові швидкості терміналів R і C відповідно.

Під'єднання газового котла до системи опалення будинку здійснюється за допомогою блоку труба (Pipe TL), який моделює динаміку потоку труби в мережі теплової рідини за рахунок втрат на в'язке тертя та конвективного теплообміну зі стінкою труби. Блок труба (Pipe TL) зображено на рисунку 3.7.

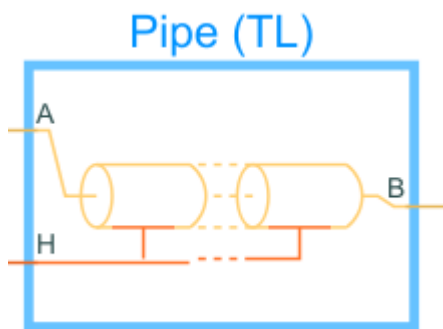


Рисунок 3.7 - Блоку труба (Pipe TL)

До блоку труба (Pipe TL) додатково можуть бути включені ефекти динамічної стисливості, інерції рідини, висоти та податливості стінки.

Труба може складатися з одного або кількох сегментів. Кожен сегмент містить фіксований об'єм рідини, тиск і температура якого змінюються на основі його динамічної стисливості та теплоємності, а також обміну масою та енергією з сусідніми сегментами.

Параметр початкової температури рідини та параметр початкового тиску рідини кожен може бути вектором з 1, 2 або n елементів, де n є кількістю сегментів. Задається рівномірна початкова температура або тиск за допомогою 1-елементного вектора. Задається лінійна зміна від A до B за допомогою 2-елементного вектора. Задається початкова температура або тиск кожного сегмента від A до B за допомогою n -елементного вектора.

Порти A і B є портами для передачі рідини, пов'язаними з вхідним і вихідним отворами труби. Порт H – це теплозберігаючий порт, пов'язаний із температурою стінки труби.

Додаткові фізичні вхідні сигнали EL і G – це збільшення висоти від порту A до порту B і гравітаційне прискорення відповідно. Передбачається, що всі сегменти мають однакову температуру стінки труби.

Параметри блоку труба (Pipe TL) задаються у відповідності до вікна встановлення параметрів, яке зображено на рисунку 3.8.

NAME		VALUE
Configuration		
<input checked="" type="checkbox"/>	Fluid dynamic compressibility	
<input type="checkbox"/>	Fluid inertia	
	Number of segments	1
>	Pipe total length	30 m
	Cross-sectional geometry	Custom
>	Cross-sectional area	0.01 m ²
>	Hydraulic diameter	0.1128 m
	Elevation gain specification	Constant
>	Elevation gain from port A to port B	0 m
	Gravitational acceleration specification	Constant
>	Gravitational acceleration	9.81 m/s ²
Viscous Friction		
	Viscous friction parameterization	Haaland correlation
	Local resistances specification	Aggregate equivalent length
>	Aggregate equivalent length of local resis...	1 m
	Surface roughness specification	Custom
>	Internal surface absolute roughness	1.5e-5 m
>	Laminar flow upper Reynolds number limit	2e+3
>	Turbulent flow lower Reynolds number limit	4e+3
>	Laminar friction constant for Darcy friction...	64
>	Pipe Wall	
Heat Transfer		
	Heat transfer parameterization	Gnielinski correlation
>	Nusselt number for laminar flow heat tran...	3.66
Initial Conditions		
>	Initial liquid pressure	0.101325 MPa
>	Initial liquid temperature	293.15 K

Рисунок 3.8 - Вікно встановлення параметрів блоку труба (Pipe TL)

Також до складу імітаційної моделі підсистеми обігрівач (Heater) входить блок газозарядний терморідинний акумулятор (Gas-Charged Accumulator (TL)), який зображений на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 - Блок газозарядний терморідинний акумулятор (Gas-Charged Accumulator (TL))

Блок газозарядний терморідинний акумулятор (Gas-Charged Accumulator (TL)) складається з попередньо зарядженої газової камери та рідинної камери. Рідинна камера підключена до мережі теплової рідини. Камери розділені ємністю, поршнем або будь-якою діафрагмою.

Коли тиск рідини на вході в акумулятор стає більшим, ніж тиск попереднього заряду, рідина надходить в акумулятор і стискає газ через політропний процес. Зниження тиску рідини призводить до декомпресії газу та викиду накопиченої рідини в систему.

Рух сепаратора обмежується жорсткою зупинкою, коли об'єм рідини дорівнює нулю та коли об'єм рідини відповідає місткості рідинної камери. Ємність рідинної камери - це загальний об'єм акумулятора мінус мінімальний об'єм газу.

3.2 Імітаційна модель підсистеми газового котла

Блок газового котла (Boiler) зображений на рисунку 3.10. Імітаційна модель підсистеми блоку газового котла складається з блоку пальника (Furnace) та блоку теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)) і зображена на рисунку 3.11.

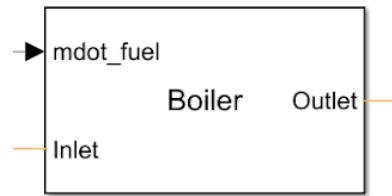


Рисунок 3.10 - Блок газового котла (Boiler)

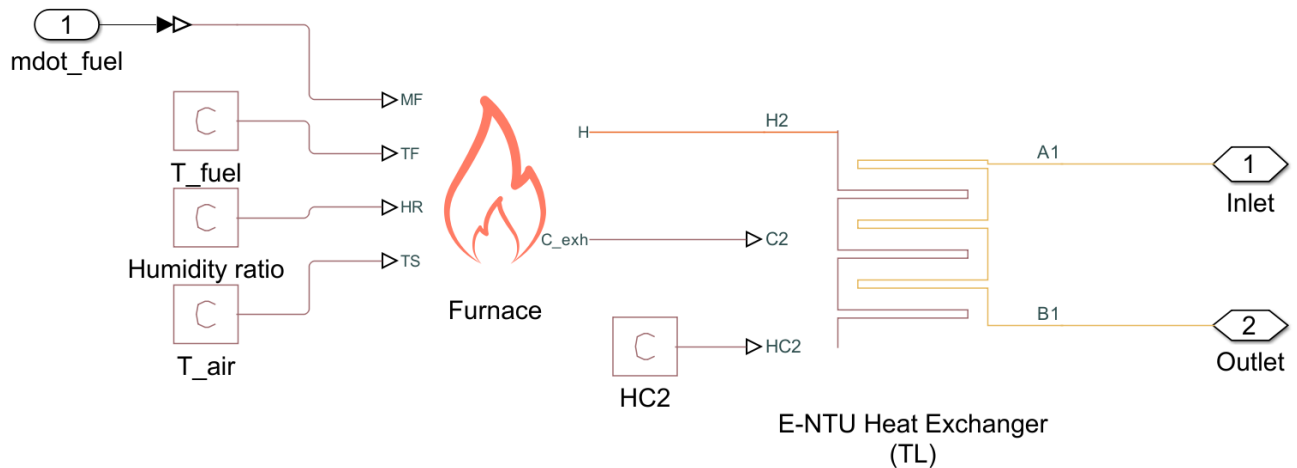


Рисунок 3.11 - Імітаційна модель підсистеми блоку газового котла (Boiler)

Основою імітаційної моделі підсистеми блоку газового котла (Boiler) є блок пальник (Furnace), який зображено на рисунку 3.12.

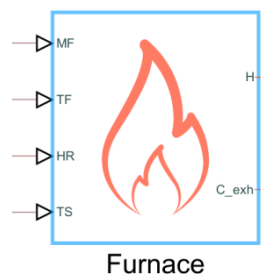


Рисунок 3.12 - Блок пальник (Furnace)

Блок пальник (Furnace) моделює процес горіння газу в системі опалення. Вважається, що горіння є повним окисненням простого вуглеводневого палива. Масова витрата палива, температура палива, коефіцієнт вологості та температура повітря встановлюються фізичними входами сигналу MF [кг/с], TF [K], HR та TS [K] відповідно.

Параметри блоку пальника (Furnace) задаються у відповідності до вікна встановлення параметрів, яке зображено на рисунку 3.13.

NAME		VALUE
Parameters		
Percent excess air	0.1	
Configurability	Compile-time	
Hydrogen to carbon mole ratio in hydroc...	3.95	
Hydrocarbon lower heating value	41e6	J/kg
Fuel specific heat at constant pressure	1880	J/kg/K
Dry air specific heat at constant pressure	1005	J/kg/K
Water vapor specific heat at constant pre...	1820	J/kg/K
Minimum fuel mass flow rate	1e-5	kg/s

Рисунок 3.13 - Вікно встановлення параметрів блоку пальника (Furnace)

Іншим важливим блоком імітаційної моделі підсистеми блоку газового котла (Boiler) є блок теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)), який зображено на рисунку 3.14.

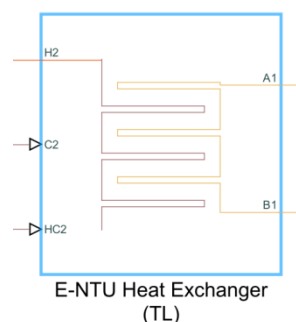


Рисунок 3.14 - Блок теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL))

Блок теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)) моделює охолодження та нагрівання рідин через провідність через тонку стінку. Властивості однофазної терморідина визначаються на вкладці Thermal Liquid. Друга рідина – це контрольована рідина, яка визначається лише визначеними користувачем параметрами на вкладці Контрольована рідина. Він не отримує жодних властивостей від рідинної мережі домену. Теплообмін між рідинами заснований на тепловій теплоті рідини.

Модель E-NTU, яка базується на методі Ефективності-NTU, є стандартним варіантом блоку. Стаціонарна теплопередача визначається на основі коефіцієнта, що відноситься до ідеальних та реальних втрат в системі:

$$Q_{Act} = \varepsilon Q_{Max}, \quad (3.2)$$

де Q_{Act} - фактична швидкість тепловіддачі;

Q_{Max} - це ідеальна швидкість тепловіддачі;

ε - ефективність теплообмінника, яка базується на співвідношенні показників теплоємності C_{Min}/C_{Max} .

Кількість одиниць передачі теплообмінника визначається виразом (3.3):

$$NTU = 1/RC_{Min}, \quad (3.3)$$

де R - загальний тепловий опір;

C_{Min} - менша теплоємність двох рідин;

C_{Max} - більша теплоємність двох рідин.

Порт H - це теплозберігаючий порт, пов'язаний з відпрацьованим газом. Фізичний вихідний сигнал C_exh [Вт/К] повідомляє про теплову потужність вихлопних газів.

Параметри блоку теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)) задаються у відповідності до вікна встановлення параметрів, яке зображено на рисунку 3.15.

Block Parameters: E-NTU Heat Exchanger (TL) ✕

Heat Exchanger (TL) Auto Apply ?

Settings Description

NAME	VALUE		
Modeling option	E-NTU model		▼
▼ Common			
Flow arrangement	Parallel or counter flow		▼
> Wall thermal resistance	1.6e-4	K/W	▼
▼ Thermal Liquid			
Minimum free-flow area	0.01	m ²	▼
Hydraulic diameter for pressure loss	0.1	m	▼
> Thermal Liquid volume	0.01	m ³	▼
> Laminar flow upper Reynolds number limit	2000		
> Turbulent flow lower Reynolds number limit	4000		
Pressure loss parameterization	Constant loss coefficient		▼
> Pressure loss coefficient	0.1		
Heat transfer parameterization	Constant heat transfer coefficient		▼
> Heat transfer surface area	0.5	m ²	▼
> Liquid-wall heat transfer coefficient	500	W/(m ² *K)	▼
> Fouling factor	1e-4	m ² *K/W	▼
> Minimum fluid-wall heat transfer coefficient	5	W/(m ² * K)	▼
▼ Controlled Fluid			
> Heat transfer surface area	0.5	m ²	▼
> Fouling factor	1e-4	m ² *K/W	▼
> Minimum fluid-wall heat transfer coefficient	0.01	W/(m ² *K)	▼
▼ Effects and Initial Conditions			
Thermal Liquid 1 dynamic compressibility	On		▼
Thermal Liquid initial temperature	300	K	▼
Thermal Liquid initial pressure	0.101325	MPa	▼

Рисунок 3.15 - Вікно встановлення параметрів блоку теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL))

Керування блоком газового котла (Boiler) здійснюється блоком керування (Control), який зображено на рисунку 3.16.

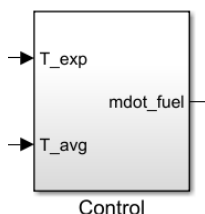


Рисунок 3.16 - Блок керування (Control)

Імітаційна модель блоку керування (Control) зображена на рисунку 3.17.

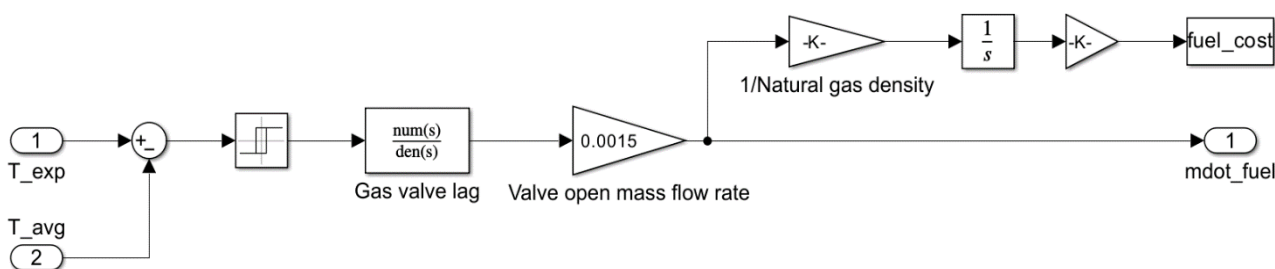


Рисунок 3.17 - Імітаційна модель блоку керування (Control)

До складу системи входить блок затримки вмикання газового клапана (Gas valve lag), блок підсилення, який визначає масову витрату відкритого клапана (Valve open mass flow rate), блок множення на величину обернену до густини природнього газу (Natural gas density), а також блок інтегрування $1/s$.

Моделювання системи опалення будинку здійснюється блоком теплова мережа будинку (House thermal network), який зображено на рисунку 3.18.

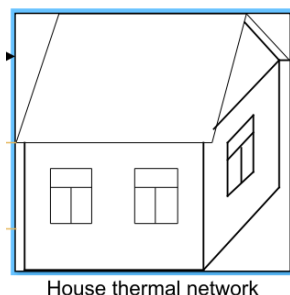


Рисунок 3.18 - Блок теплова мережа будинку (House thermal network)

Температура опалювальної рідини встановлюється за допомогою блоку налаштування теплопровідної рідини (Thermal Liquid Settings (TL)), який зображено на рисунку 3.19.

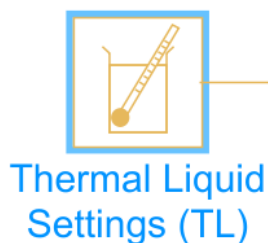


Рисунок 3.19 - Блок налаштування теплопровідної рідини (Thermal Liquid Settings (TL))

Блок налаштування теплопровідної рідини (Thermal Liquid Settings (TL)) встановлює фізичні властивості рідини для мережі теплопровідної рідини. Властивості є глобальними: вони застосовуються не до одного компонента, а до всіх тих, що складають мережу. Кожна теплопровідна рідинна мережа в моделі повинна з'єднуватися рівно з одним екземпляром цього блоку. Цей блок характеризується ступінними властивостями.

1. Термодинамічні властивості.

До цих властивостей відноситься густина, питома внутрішня енергія та питома теплоємність.

2. Похідні властивості.

До цих властивостей відноситься об'ємний модуль і коефіцієнт теплового розширення.

3. Транспортні властивості.

До цих властивостей відноситься кінематична в'язкість і теплопровідність.

Кожна властивість рідини вказується у формі таблиці відносно температури та тиску або лише відносно температури. Використовується опція, щоб ігнорувати зміни, спричинені тиском, якщо відомо, що ці зміни незначні, якщо очікується,

що тиск буде майже постійним, або якщо дані про властивості рідини доступні лише з точки зору температури.

Щоб візуалізувати залежність властивостей рідини від тиску та температури використовують графіки (рисунок 3.20), наприклад, щоб легше виявити аномалії у вказаних даних. Більшість властивостей рідини показані як змінні за тиском, лише якщо вони вказані як функції тиску. Винятки включають густину, яка виводить залежність тиску від об'ємного модуля та коефіцієнта теплового розширення, а також будь-які властивості, розраховані на основі густини, такі як питома теплоємність.

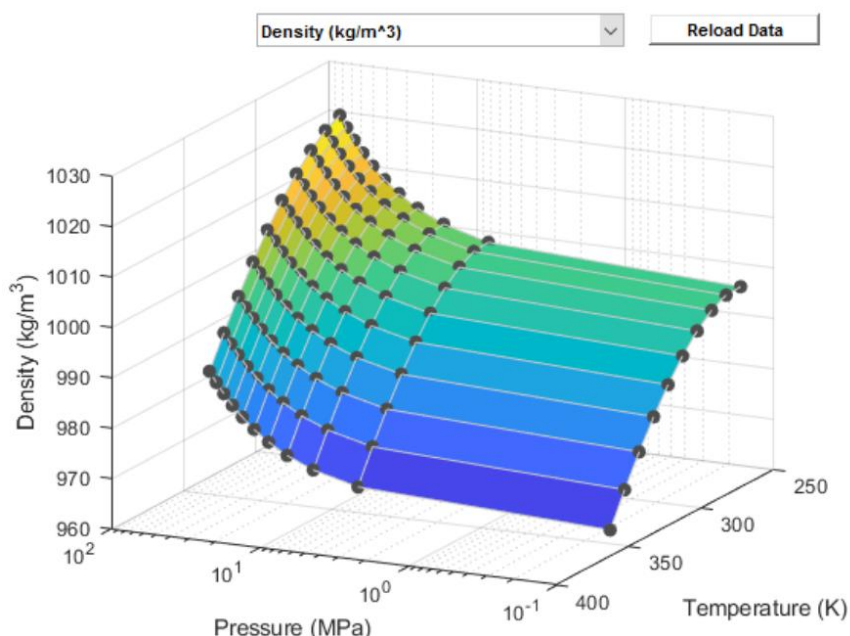


Рисунок 3.20 - Залежність властивостей рідини від тиску та температури

Імітаційна модель блоку теплова мережа будинку (House thermal network) складається із чотирьох кімнат та чотирьох батарей, які наведені на рисунку 3.21. Також до складу імітаційної моделі блоку теплова мережа будинку (House thermal network) входить блок середня температура всіх кімнат, який визначає середню температуру в будинку. На цей блок надходять всі температури усіх кімнат, далі вони додаються і визначається середнє арифметичне температури у будинку.

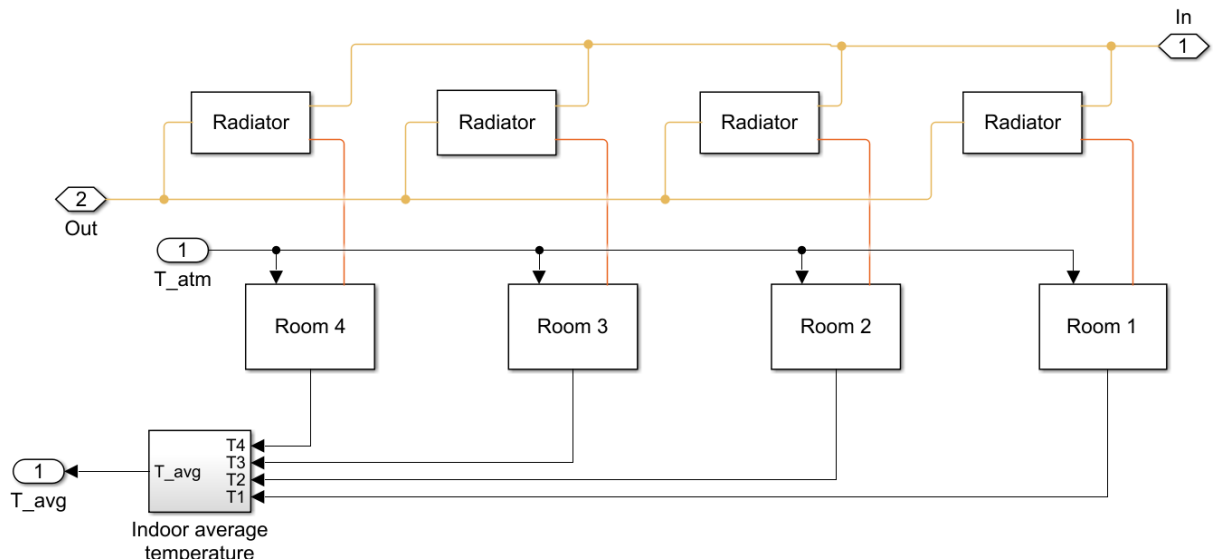


Рисунок 3.21 - Імітаційна модель блоку теплова мережа будинку (House thermal network)

Кожна кімната моделюється блоком Room, який наведено на рисунку 3.22.

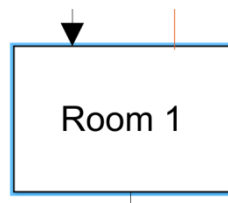


Рисунок 3.22 – Блок кімната 1 (Room 1)

Імітаційна модель блоку кімната 1 (Room 1) наведена на рисунку 3.23. До складу імітаційної моделі блоку кімната 1 (Room 1) входить датчик температури в кімнаті (Temperature sensor), який вимірює температуру в кімнаті.

Також до складу імітаційної моделі блоку кімната 1 (Room 1) входять блоки, які моделюють передачу тепла від кімнати до даху, від кімнати до стін та від кімнати до вікон.

Ці блоки моделюють передачу тепла конвекцією та теплопровідністю. Паралельно до напрямків теплопередачі також під'єднані блоки, які моделюють втрати тепла через дах, стіни та вікна.

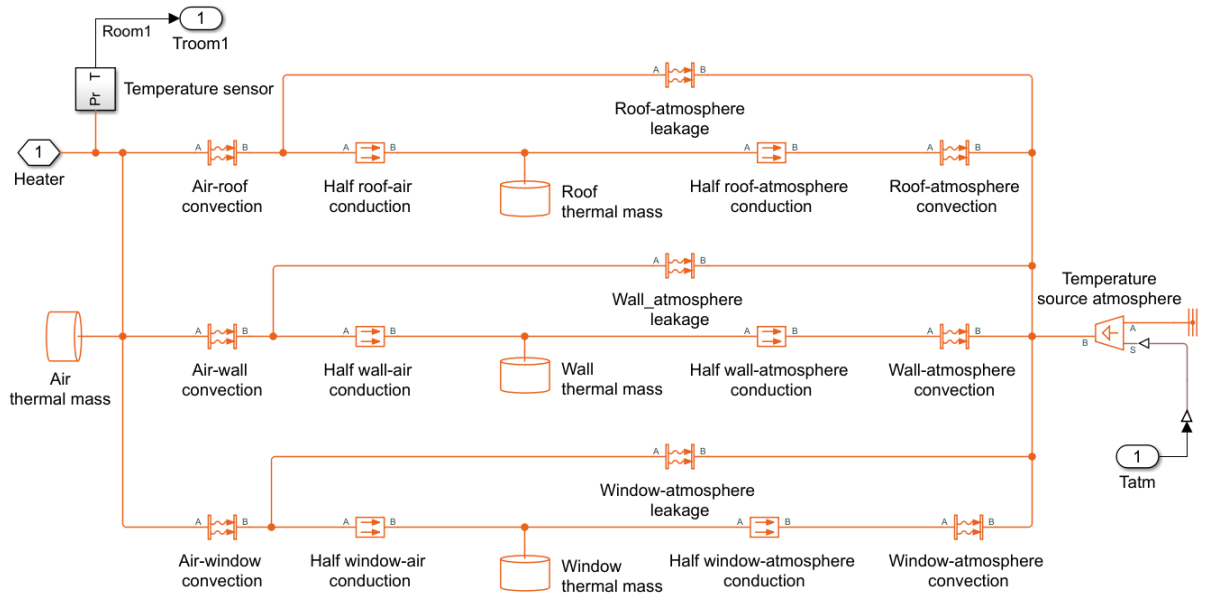


Рисунок 3.23 - Імітаційна модель блоку кімната 1 (Room 1)

Для моделювання батарей для обігріву кімнат використовується блок батарея (Radiator), який зображено на рисунку 3.24.

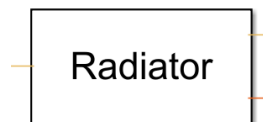


Рисунок 3.24 - Блок батарея (Radiator)

Імітаційна модель блоку батарея (Radiator) наведена на рисунку 3.25.

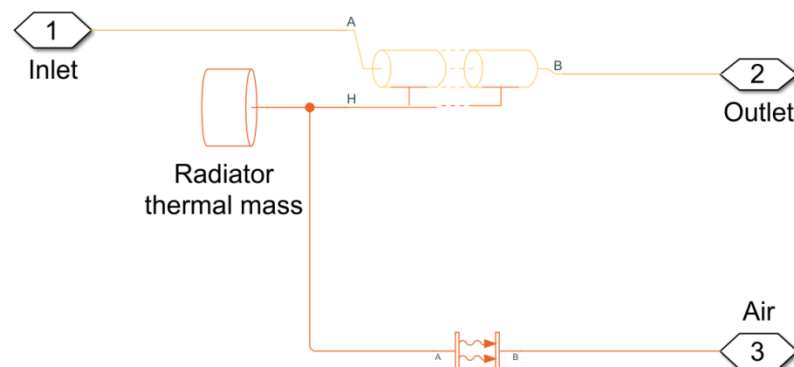


Рисунок 3.25 - Імітаційна модель блоку батарея (Radiator)

На рисунку 3.26 зображені результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування котлом у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK.

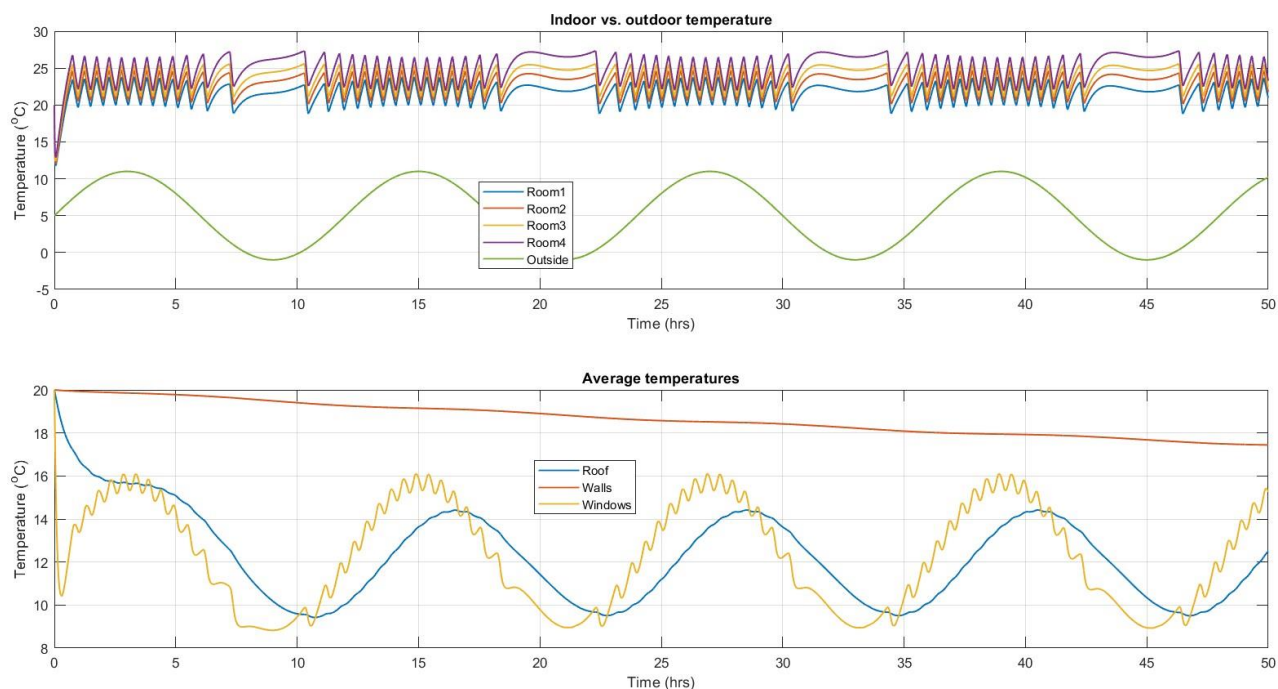


Рисунок 3.26 - Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування котлом у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK

На першому графіку показані коливання температури в кожній кімнаті в порівнянні з коливаннями зовнішньої температури. На другому графіку показані середні загальні температури даху, стін і вікон.

На рисунку 3.27 наведено результати імітаційного моделювання передачі теплової потужності. Ці графіки показують передачу теплової потужності від палиника до котла і до радіаторів.

Вартість палива розраховується виходячи з масової витрати палива через палиник. Передбачається, що паливо має щільність природного газу ($\sim 0,9 \text{ кг/м}^3$).

Аналізуючи результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування котлом у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK можна зробити висновок, що запропонований удосконалений метод керування котлом покращує ефективність газового котла.

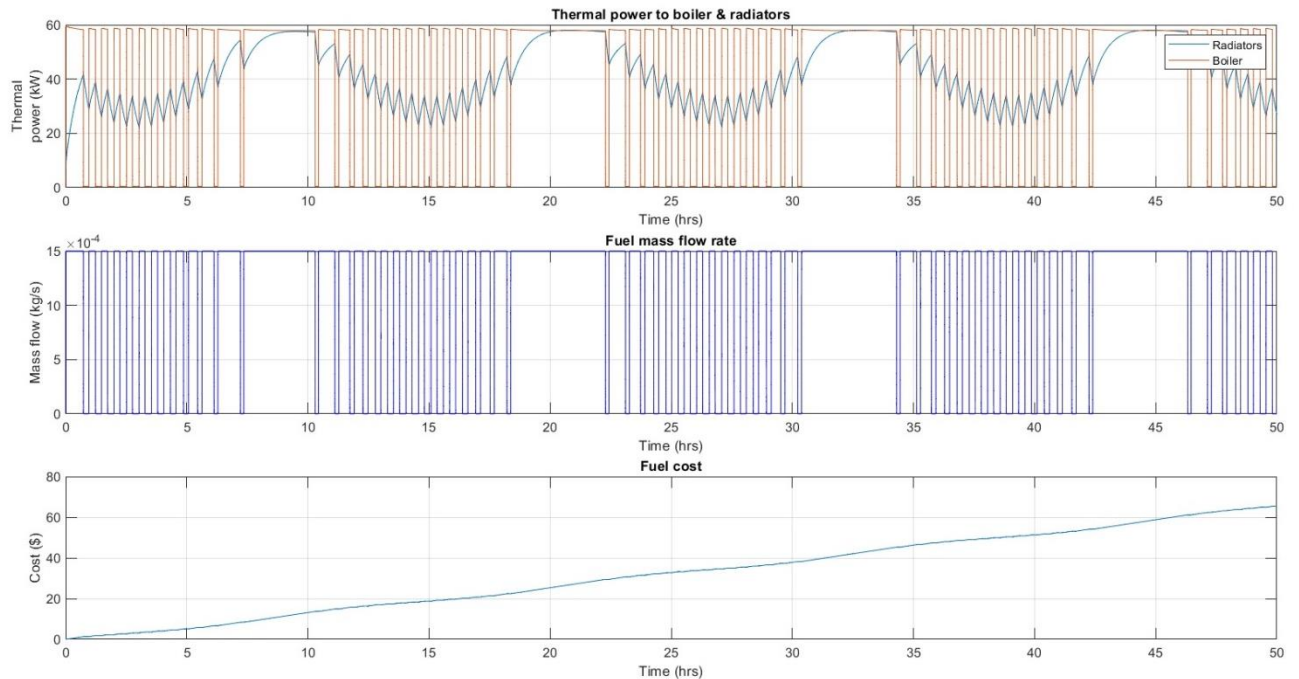


Рисунок 3.27 - Результати імітаційного моделювання передачі теплової потужності у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK

3.3 Висновки до третього розділу

1. Імітаційна модель системи опалення будинку, в якій застосовано удосконалений метод керування котлом, містить обігрівач, контролер і будинкову конструкцію з чотирма радіаторами і чотирма кімнатами.

2. Кожна кімната обмінюється теплом з навколишнім середовищем через зовнішні стіни, дах і вікна. Передача тепла моделюється як комбінація теплової конвекції, теплопровідності та теплової маси. Передбачається, що тепло не передається всередину між приміщеннями.

3. Імітаційна модель підсистеми блоку газового котла складається з блоку пальника (Furnace) та блоку теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)). Блок пальник (Furnace) моделює процес горіння газу в системі опалення. Вважається, що горіння є повним окисленням простого вуглеводневого палива.

4. Блок теплообмінника (E-NTU Heater Exchanger (TL)) моделює охолодження та нагрівання рідин через провідність через тонку стінку. Друга рідина – це контрольована рідина, яка визначається лише визначеними

користувачем параметрами на вкладці Контрольована рідина. Теплообмін між рідинами заснований на теплоті рідини.

5. До складу імітаційної моделі блоку кімната 1 (Room 1) входять блоки, які моделюють передачу тепла від кімнати до даху, від кімнати до стін та від кімнати до вікон. Ці блоки моделюють передачу тепла конвекцією та теплопровідністю. Паралельно до напрямків теплопередачі також під'єднані блоки, які моделюють втрати тепла через дах, стіни та вікна.

6. Виконано імітаційне моделювання передачі теплової потужності. Отримані графіки показують передачу теплової потужності від пальника до котла і до радіаторів. Вартість палива розраховується виходячи з масової витрати палива через пальник. Передбачається, що паливо має щільність природного газу ($\sim 0,9 \text{ кг/м}^3$).

7. Аналізуючи результати імітаційного моделювання удосконаленого методу керування котлом у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK можна зробити висновок, що запропонований удосконалений метод керування котлом покращує ефективність газового котла.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КОТЛОМ

4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом

Суть удосконаленого методу керування газовим котлом, який дозволяє підвищити ефективність згоряння палива, полягає у вимірюванні температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

Для реалізації удосконаленого методу керування котлом використано термопару К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С, яка зображена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 - Термопара К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С

Для вимірювання температури за допомогою термопари К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С використовується спеціалізований драйвер МАХ6675. Під'єднання термопари К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С до драйвера МАХ6675 показано на рисунку 4.2.

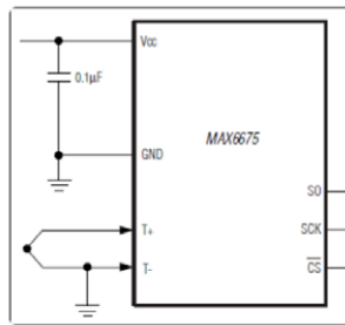


Рисунок 4.2 - Під'єднання термопары К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С до драйвера MAX6675

В якості пристрою керування для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом використаємо одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Фотографія під'єднання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi до термопары з драйвером MAX6675 зображена на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 - Під'єднання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi до термопары з драйвером MAX6675

До складу одноплатного комп'ютера Raspberry Pi входять наступні блоки, які зображені на рисунку 4.4.

USB-порти - використовуються для підключення миші та клавіатури. Є можливість підключити інші компоненти, наприклад, USB-накопичувач.

Слот для SD-карти - для зберігання програмного забезпечення операційної системи та файлів.

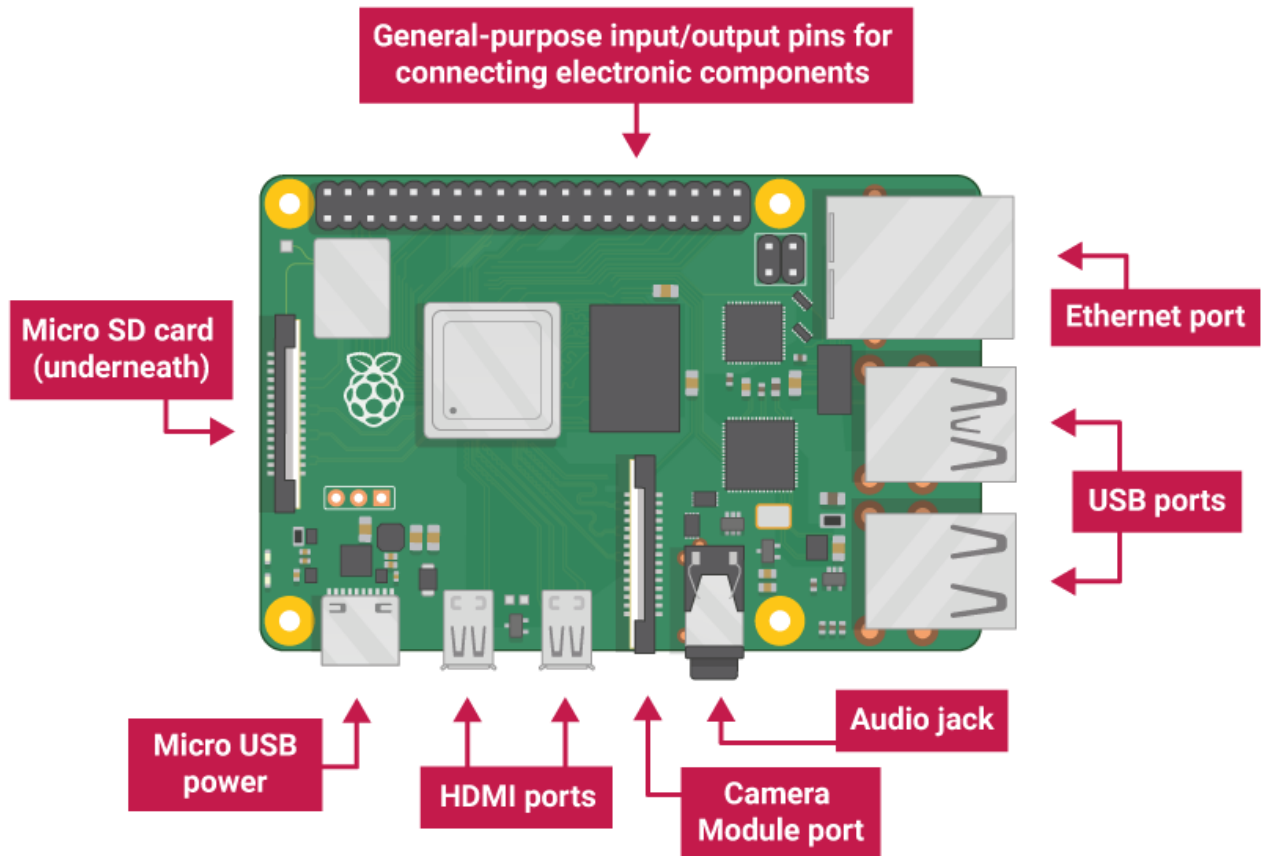


Рисунок 4.4 – Зовнішні порти одноплатного комп'ютера Raspberry Pi

Порт Ethernet - використовується для підключення Raspberry Pi до мережі за допомогою кабелю. Raspberry Pi також може підключатися до мережі через бездротову локальну мережу.

Аудіороз'єм - використовується для підключення навушників або колонки.

Порт HDMI - використовується для підключення монітора (або проектора), який використовується для відображення виходу з Raspberry Pi. Якщо на моніторі є динаміки, їх також можна використовувати для прослуховування звуку.

Роз'єм живлення Micro USB - використовується для підключення блока живлення.

Порти GPIO - вони дозволяють підключати до Raspberry Pi електронні компоненти, такі як світлодіоди та кнопки.

4.2 Розробка програми для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED

Розробку програми для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом виконано в середовищі Node-RED.

Node-RED - це інструмент програмування для з'єднання апаратних пристроїв, API та онлайн-сервісів новими та цікавими способами.

Він надає редактор на основі браузера, який дозволяє легко з'єднувати потоки за допомогою широкого спектру вузлів у палітрі, які можна розгорнути в його середовищі виконання.

Легке середовище виконання побудоване на Node.js, повною мірою використовуючи переваги його моделі, керованої подіями, без блокування. Це робить його ідеальним для роботи на периферії мережі на недорогому обладнанні, такому як Raspberry Pi, а також у хмарі.

Маючи понад 225 000 модулів у репозиторії пакетів Node, легко розширити діапазон вузлів палітри, щоб додати нові можливості.

Скрипт інсталяції для Pi також налаштовує його на запуск як служби. Це означає, що може працювати у фоновому режимі та автоматично запускатися під час завантаження.

Для роботи з сервісом передбачені такі команди.

1. `node-red-start` - запускає службу Node-RED та відображає її лог-виведення. Натискання або закриття вікна не зупиняє службу; Він зберігає роботу у фоновому режимі `Ctrl-C`.

2. `node-red-stop` - зупиняє роботу сервісу Node-RED.

3. `node-red-restart` - зупиняє та перезапускає службу Node-RED.

4. `node-red-log` - виводиться лог-вивід сервісу.

Вікно редактора складається з чотирьох компонентів і зображено на рисунку 4.5.

Заголовок у верхній частині містить кнопку розгортання, головне меню та меню користувача.

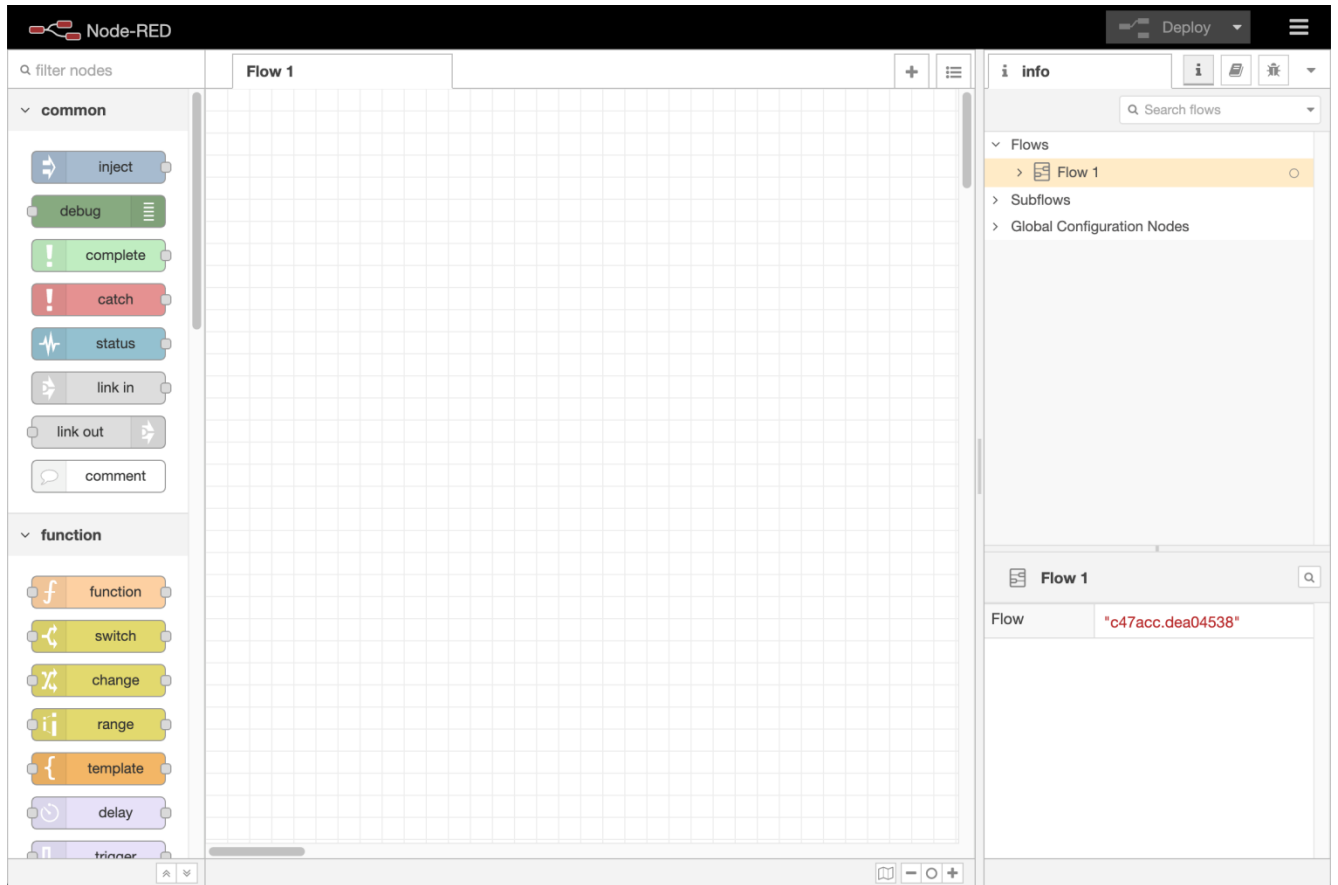


Рисунок 4.5 - Вікно редактора Node-RED

У складі вікна редактора Node-RED розміщені наступні компоненти: палітра ліворуч, що містить вузли, доступні для використання; основний робочий простір посередині, де створюються потоки та бічна панель праворуч.

Палітра містить усі вузли, які встановлені та доступні для використання.

Вони організовані за кількома категоріями, з входами, виходами та функціями вгорі. Якщо є якісь підпотоки, вони з'являються в категорії у верхній частині палітри.

Категорії можна розгорнути або згорнути, клацнувши їх заголовок. Кнопками і в нижній частині палітри можна скористатися для згорання або розгорання всіх категорій.

Над палітрою знаходиться поле, яке можна використовувати для фільтрації списку вузлів.

На рисунку 4.6 показані головні вхідні та вихідні компоненти редактора Node-RED.

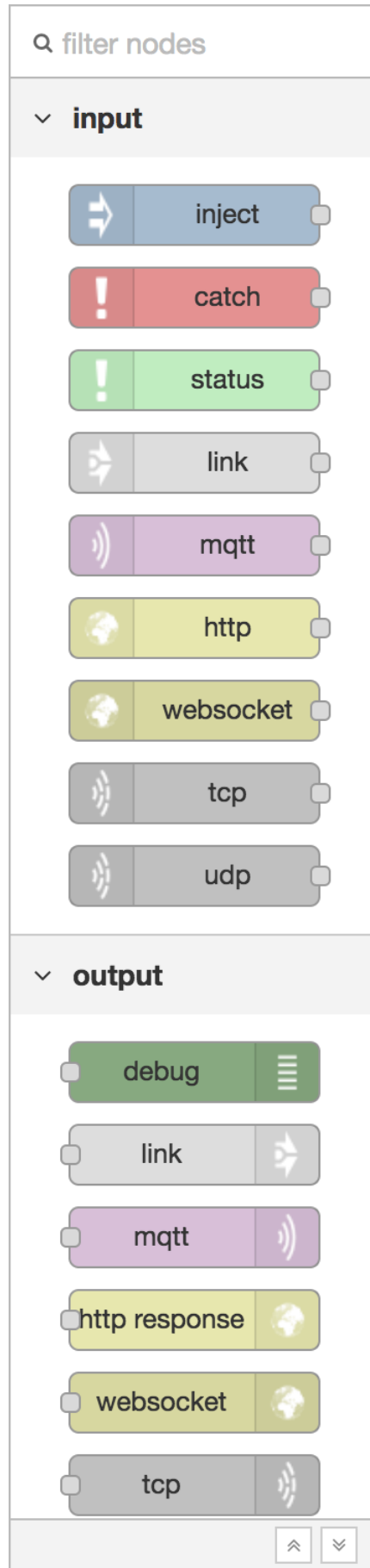


Рисунок 4.6 - Головні вхідні та вихідні компоненти редактора Node-RED

Термін «потік» використовується для неформального опису однієї множини з'єднаних вузлів. Таким чином, ланцюжок (вкладка) може містити кілька потоків (наборів з'єднаних вузлів).

Вузли можуть бути додані до робочого простору одним із таких способів:

- перетягуючи їх з палітри;
- за допомогою діалогового вікна швидкого додавання;
- імпортування з бібліотеки чи буфера обміну.

Вузли з'єднуються між собою проводами через свої порти. Вузол може мати не більше одного вхідний порт і багато вихідних портів. Порт може мати мітку, яка відображається коли миша наведе на нього курсор. Вузол може вказувати мітки, наприклад, Switch node показує правило, яке відповідає порту. Етикетки також можна налаштувати у діалоговому вікні редагування вузла.

Деякі вузли відображають повідомлення про статус і значок під вузлом. Це використовується для позначення стан вузла під час виконання - наприклад, вузли MQTT вказують, чи є вони наразі підключено чи ні.

Якщо вузол має будь-які нерозгорнуті зміни, він відображає синє коло над ним. Якщо є помилками з його налаштуванням, він відображає червоний трикутник.

Деякі вузли містять кнопку на лівому або правому краю. Вони дозволяють деяким взаємодія з вузлом зсередини редактора. Вузли Inject і Debug є єдиними основними вузлами, які мають кнопки.

Діалогове вікно «Швидке додавання» надає простий спосіб додати вузол до робочого простору будь-де мишкою, без необхідності перетягувати її з палітри.

Діалогове вікно відкривається утриманням клавіші або при натисканні кнопки Робочої області Ctrl Command.

Діалогове вікно містить повний список усіх вузлів, доступних для додавання. Він показує п'ять основних вузлів ядра у верхній частині списку, за якими слідує будь-які нещодавно додані вузли і, нарешті, повний, алфавітний, список вузлів, що залишилися.

Як і у випадку з основною палітрою, у діалоговому вікні вгорі є поле для фільтрування списку і швидко знайти вузол.

Якщо утримується миша при натисканні на вузол у списку, вузол буде додано, а діалогове вікно швидкого додавання залишиться відкритим для додавання наступного вузла в потоці Ctrl Command.

Якщо під час запуску діалогового вікна натиснути на дріт, доданий вузол буде з'єднано в дротом.

Вузли з'єднуються між собою натисканням лівої кнопки миші на порту вузла, перетягуванням до вузла призначення та відпускання кнопки миші.

Крім того, якщо клавішу утримувати натиснутою, ліва миша можна натиснути (і відпустити) на порту вузла, а потім натиснути на кнопку Призначення. Якщо ключ залишається утримуваним, а пункт призначення щойно з'єднаний вузол має вихідний порт, від цього порту запускається новий провід. Це дозволяє набір вузлів, які потрібно швидко з'єднати між собою.

Вузли можуть бути об'єднані разом, щоб утворити групу. Потім їх можна перемістити або скопіювати як єдиний об'єкт у редакторі. Групам можна надати колір рамки та тла, а також необов'язкову мітку.

Підпотік - це набір вузлів, які згорнуті в один вузол у робочому просторі.

Вони можуть бути використані для зменшення візуальної складності потоку або для упаковки групи вузлів як багаторазовий потік, що використовується в декількох місцях.

Після створення підпотік додається до палітри доступних вузлів. Індивідуальний екземпляр підпотіку може бути доданий в робочу область так само, як і будь-який інший вузол.

Палітра Node-RED включає стандартний набір вузлів, які є базою для створення ланцюжків. Існують наступні вузли.

1. Вводити.
2. Налаштування.
2. Функція.
3. Змінна.

4. Комутатор.

5. Шаблон.

На рисунку 4.7 наведена програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED.



Рисунок 4.7 - Програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED

Програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED розпочинається вузлом Inject із властивостями Timestamp, як зображено на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 - Вузол Inject із властивостями Timestamp

Вузол Inject у програмі експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED використовується для ручного запуску потоку.

Далі запускається програма зчитування значення температури пальника котла за допомогою терморпарі К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С та драйвера MAX6675, яка написана на мові Python 3. На рисунку 4.9 зображено вузол python3/home/pi/GetMAX6675.py.



Рисунок 4.8 - Вузол python3/home/pi/GetMAX6675.py

Отримане значення температури передається на вузол function 1, який зображений на рисунку 4.9.



Рисунок 4.9 - Вузол function 1

Вузол function 1 здійснює розрахунок значення температури в °С, яке далі передається на вузли відображення температури у вигляді графіка зміни температури в часі, у вигляді показу стрілочного індикатора температури та у вигляді цифрового індикатора температури у відповідності до рисунку 4.10.

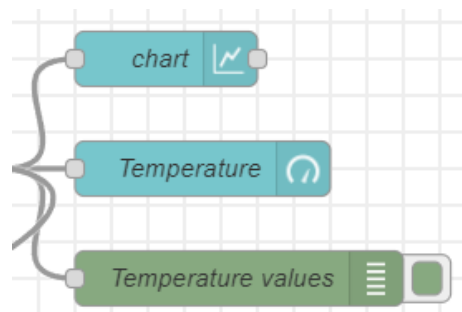


Рисунок 4.10 - Вузли відображення температури

Також значення температури надходить на вузол PID, який виконує функцію PID-регулятора у відповідності до рисунку 4.11.



Рисунок 4.11 - Вузол PID

Вузол PID має 2 виходи, перший - для керування вентилятором газового котла, а другий - для відображення значення сигналу керування у вигляді широтно-імпульсної модуляції (PWM) у відповідності до рисунку 4.12.

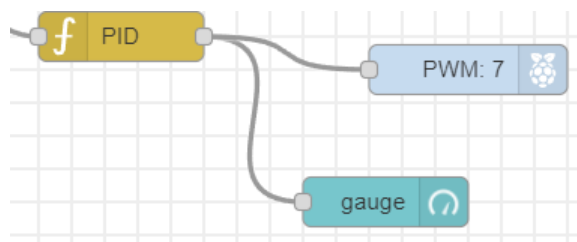


Рисунок 4.12 – Вузли керування вентилятором газового котла PWM та відображення значення сигналу керування gauge

Обидва виходи забезпечують значення з плаваючою комою від 0 до 10.

Вузол приймає наступні значення конфігурації.

Підсилення - % підсилення, яке буде застосовано до різниці між заданим значенням і вхідним значенням.

Ті - час у секундах, протягом якого потрібно застосувати значення підсилення.

Час переобчислення - час у секундах між кожним обчисленням значення.

Задане значення - встановлення заданого значення.

Для підтримки температури пальника регулюємо подачу газу за допомогою швидкості обертання вентилятора котла. Швидкість обертання вентилятора котла визначається через вихід ПІД-регулятора. Час відгуку процесу буде залежати

лише від трьох значень, таких як пропорційне підсилення, інтегральний час і похідний час.

Пропорційний контролер формує керуючий вихід пропорційно похибці. Це значення похибки множиться на пропорційне підсилення, щоб визначити відгук на виході.

Якщо коефіцієнт підсилення встановлений занадто високим, то вихід контролера починає коливатися і стає нестабільним, а якщо коефіцієнт підсилення встановлений на дуже низькому значенні, то вихід контролера не буде реагувати на зміну встановленого значення.

Використання одного лише пропорційного регулятора має великий недолік. Зсув є стійкою помилкою і не може бути усунений лише за допомогою пропорційного контролера. Швидкість спрацьовування збільшується при збільшенні пропорційного підсилення.

У зв'язку з обмеженням пропорційного регулятора присутній безперервний зсув. Інтегральний контролер буде безперервно збільшувати і зменшувати вихід контролера, щоб зменшити похибку.

Якщо значення похибки велике, інтегральний режим буде швидко збільшувати/зменшувати вихід контролера, а якщо значення помилки невелике, інтегральний режим буде сповільнювати функцію.

Для великого інтегрального часу швидкість спрацьовування контролера буде сповільнюватися, а для малого інтегрального часу швидкість відгуку буде швидкою.

Обмеження І-контролера полягає в тому, що він не може передбачити майбутню поведінку помилки. Тому він реагує лише один раз, коли відбувається зміна встановленого значення.

Похідний контролер формує вихід на основі швидкості зміни похибки і буде працювати швидше, ніж РІ-контролер. Якщо похибка не змінюється, то вихід цього контролера дорівнює нулю.

Швидкість спрацьовування збільшується зі збільшенням часу похідної. Якщо значення часу похідної буде занадто великим, то виникнуть коливання і

система стане нестійкою. Для нульового значення похідного часу вихід контролера стане рівним нулю.

Процес установки оптимальних коефіцієнтів підсилення для P , I і D для отримання ідеального відгуку від системи управління називається настройкою. Існують різні методи настройки, про які і піде мова про метод «вгадай і перевіри» і про метод Циглера-Ніколса.

Виграш ПІД-регулятора може бути отриманий методом проб і помилок. Після того, як інженер зрозуміє важливість кожного параметра посилення, цей метод стає відносно простим. У цьому методі доданки I і D спочатку встановлюються на нуль і пропорційний коефіцієнт підсилення збільшується до тих пір, поки вихід петлі не буде коливатися.

Зі збільшенням пропорційного виграшу система стає швидшою, але слід бути обережним, щоб не зробити систему нестабільною. Після того, як P було встановлено для отримання бажаної швидкої відповіді, інтегральний член збільшується, щоб зупинити коливання.

Інтегральний доданок зменшує похибку стаціонарного стану, але збільшує перерегулювання. Для швидкої роботи системи завжди необхідне певне перевищення, щоб вона могла негайно реагувати на зміни. Інтегральний доданок скориговано для досягнення мінімальної похибки стаціонарного стану.

Після того, як P і I були налаштовані на отримання бажаної системи швидкого управління з мінімальною похибкою стаціонарного стану, похідний член збільшується до тих пір, поки цикл не стане прийнятно швидким до заданої точки.

Збільшення терміну похідної зменшує перевищення і дає більш високе підсилення зі стабільністю, але призведе до того, що система буде дуже чутливою до шуму. Часто інженерам доводиться пожертвувати однією характеристикою системи управління на іншу, щоб краще відповідати їхнім вимогам.

Метод Циглера-Ніколса - ще один популярний метод настройки ПІД-регулятора. Він дуже схожий на метод проб і помилок, при якому I і D встановлюються в нуль, а P збільшується до тих пір, поки петля не почне

коливатися. Як тільки починається коливання, критичний коефіцієнт підсилення K_c і період коливань P_c зазначаються. Потім P , I і D коригуються відповідно до табличного стовпця, наведеного нижче.

Крива реакції процесу – називається методологією налаштування Коена-Куна. Тут спочатку формується крива реакції процесу щодо збурення. За допомогою кривої реакції процесу відомі коефіцієнт підсилення, похідна та інтегральний час. Цю криву можна спостерігати, коли система працює в кроковому тесті з відкритим циклом. На цій кривій можна знати значення нахилу, мертвого та часу підйому кривої, а це пропорційні, інтегральні та похідні величини.

Програмне забезпечення – існують різні програмні пакети для оптимізації циклу та налаштування контролера. Ці програмні пакети збирають інформацію та готують відповідні математичні моделі.

Реле – його ще називають технікою налаштування ПІД-контролера Astrom Hugglund. У цьому методі вихід перемикається між двома значеннями керуючих змінних, і ці значення вибираються там, де вони повинні перевищувати задані значення.

Коли значення змінної процесу не перевищує задане значення, то керуючий вихід підтримується на більш високому значенні.

Коли значення змінної процесу перевищує задане значення, то керуючий вихід підтримується на нижчому значенні, і це формує форму вихідного сигналу.

Обчислюється амплітуда та період вихідної форми сигналу, і ці параметри допомагають знати період коливань та граничний коефіцієнт посилення.

Алгоритм PID є універсальним. Він підходить практично для будь-якого виду процесу, якщо бажаного ефекту можна досягти, змусивши змінну процесу рано чи пізно відповідати бажаному значенню. Ось деякі з ключових переваг цієї методики контролю:

PID забезпечує більшу точність, ніж простіші контролери ввімкнення/вимкнення.

Алгоритм більш енергоефективний.

Він не важкий за залізом, тому пристрої з ПД-контролерами в основному дешеві.

Алгоритм може бути реалізований як аналоговою електронікою, цифровою електронікою, так і механічними рішеннями. Сьогодні інженери в основному використовують цифрові ПД-контролери, але існують також пневматичні, гідравлічні та механічні ПД-контролери.

Компоненти P, I і D можуть бути налаштовані інтуїтивно, методом проб і помилок. Навіть якщо для настройки ПД-регулятора в системі управління потрібен фахівець, одного сеансу має вистачити на роки.

Більш просунуті контролери, ймовірно, зажадають зупинки процесу для повторної настройки. Але універсальний ПД-контролер часто можна переналаштувати, поки процес ще запущений, що часто зручніше.

На відміну від більш простих рішень, алгоритм PID може істотно продовжити термін служби виконавчого пристрою.

Хоча просунуті контролери є більш ефективними, їх використання може бути не вартим витрат і зусиль.

На відміну від контролерів, заснованих на моделях, алгоритм PID краще реагує на невимірні збурення завдяки наявності пропорційних і похідних дій.

Алгоритм PID використовується вже понад 70 років, тому інженери знайшли обхідні шляхи для багатьох існуючих проблем.

У той же час бувають ситуації, коли ПД-контролер - не найкращий вибір.

При неправильному налаштуванні алгоритм може зробити систему нестабільною і навіть пошкодити її.

ПД-регулятори підсилюють високочастотний зміст сигналу помилки. Це підвищує шумову складову виходу керування, що дестабілізує систему.

Техніка PID підходить для систем з одним входом і одним виходом (SISO). Але класичні ПД-контролери погано працюють, якщо є необхідність контролювати більше одного параметра.

Інженери, як правило, стикаються з наступними проблемами.

1. У математичній моделі виконавчий пристрій змінює змінну процесу в будь-якому діапазоні значень, визначених керуючим сигналом від ПД-регулятора. Але насправді динамічний діапазон фізичних величин скінченний. Двигун має обмежену потужність, клапан має обмежену пропускну здатність тощо.

2. У реальному житті система управління може бути не в змозі змінити знак маніпульованої змінної. Наприклад, багато систем регулювання температури не мають більш охолоджуючих пристроїв. Так, якщо керуючий сигнал менше нуля, система може тільки відключити обігрівач.

3. Обмежена точність вимірювань вимагає додаткових зусиль для того, щоб операції диференціювання можна було виконувати з допустимою похибкою.

4. Майже будь-яка система має нелінійність: насичення, обмеження швидкості підйому, гістерезис, провисання.

5. Розкид параметрів і випадкові варіації параметрів контролера і установки.

6. Дискретна реалізація контролера.

7. Необхідність безударного перемикавання між режимами управління.

Немодифікований алгоритм PID працює погано, коли затримка між виходом і відповіддю процесу занадто велика. Але проблему можна вирішити, доповнивши механізм додатковим інтелектом.

Багато методів управління можуть служити альтернативою алгоритму PID. Хоча деякі з них пропонують вищу ефективність, такі рішення зазвичай коштують дорожче.

Такою альтернативою є контролери ввімкнення/вимкнення.

Вони можуть виконувати тільки два типи виходів: повністю включений (коли змінна процесу не досягається) і повністю вимкнений (коли похибка дорівнює нулю або від'ємному). Такі рішення дешеві та прості, але мають низьку точність. Вони часто не можуть утримати змінну процесу на певному рівні через інерцію. Параметр буде весь час йти вище і нижче заданої точки (цей ефект називається «полванням»). А ось контролери включення-виключення підходять для систем, де точне управління не потрібно.

На рисунку 4.13 наведено інтерфейс користувача програми дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED.

За допомогою інтерфейсу користувача відображується коефіцієнт ШІМ регулятора для керування вентилятором котла та температура полум'я в котлі.

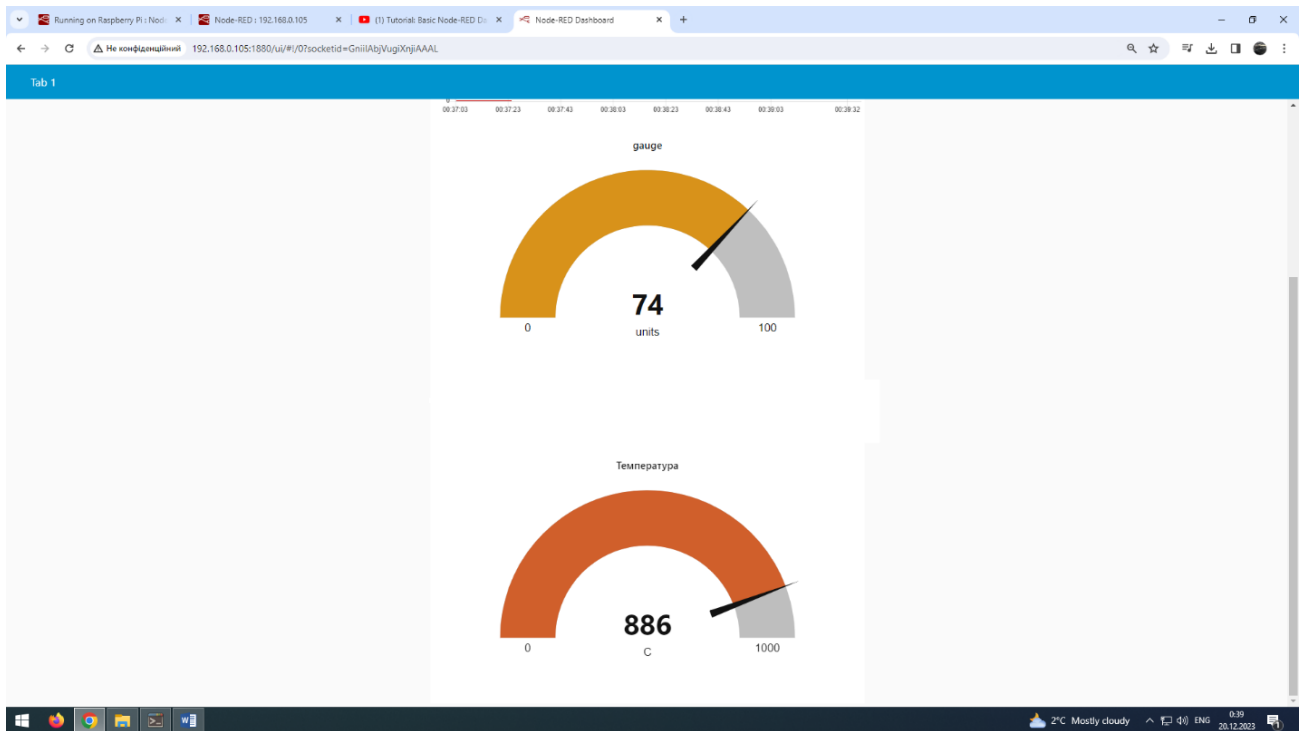


Рисунок 4.13 - Інтерфейс користувача для відображення коефіцієнта ШІМ регулятора для керування вентилятором котла та температури полум'я в котлі

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Для реалізації удосконаленого методу керування котлом використано термопару К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С. Для вимірювання температури за допомогою термопари К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С використовується спеціалізований драйвер МАХ6675.

2. В якості пристрою керування для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом використаємо одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Легке середовище виконання побудоване на Node.js, повною мірою

використовуючи переваги його моделі, керованої подіями, без блокування. Це робить його ідеальним для роботи на периферії мережі на недорогому обладнанні, такому як Raspberry Pi, а також у хмарі.

3. Маючи понад 225 000 модулів у репозиторії пакетів Node, легко розширити діапазон вузлів палітри, щоб додати нові можливості. Скрипт інсталяції для Pi також налаштовує його на запуск як служби. Це означає, що може працювати у фоновому режимі та автоматично запускатися під час завантаження.

4. Для підтримки температури пальника регулюємо подачу газу за допомогою швидкості обертання вентилятора котла. Швидкість обертання вентилятора котла визначається через вихід ПІД-регулятора. Час відгуку процесу буде залежати лише від трьох значень, таких як пропорційне підсилення, інтегральний час і похідний час.

5. Виграш ПІД-регулятора може бути отриманий методом проб і помилок. Після того, як інженер зрозуміє важливість кожного параметра посилення, цей метод стає відносно простим. У цьому методі доданки I і D спочатку встановлюються на нуль і пропорційний коефіцієнт підсилення збільшується до тих пір, поки вихід петлі не буде коливатися.

ВИСНОВКИ

1. Конденсаційні комбіновані котли працюють у середньому на 15% ефективніше, ніж звичайні котли, оскільки вони використовують значну частину тепла димових газів у процесі нагрівання.

2. Ефективність котла залежить не лише від температури димових газів, але й від співвідношення газу та повітря, яке також відіграє вирішальну роль у процесі згоряння, впливаючи на ефективність і викиди.

3. Лямбда є зручним параметром для представлення співвідношення газ/повітря при згорянні відносно стехіометричного горіння. Якщо лямбда дорівнює 1 до 1, то це призводить до стехіометричного горіння. Якщо лямбда більше одиниці, то це призводить до збідненого горіння, а якщо менше одиниці, то це призводить до збагаченого горіння.

4. Розроблено імітаційну модель удосконаленого методу керування котлом в середовищі Matlab/Simulink та виконано імітаційне моделювання роботи опалювальної системи будинку. Показано, що використання удосконаленого методу керування котлом дозволяє значно підвищити ефективність опалювальної системи будинку.

5. Розроблено програму керування котлом в середовищі Node-Red, яка реалізує удосконалений метод керування котлом. Node-RED - це інструмент потокового програмування, спочатку розроблений командою IBM Emerging Technology Services, а зараз є частиною OpenJS Foundation.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Визначення та типи комбінованих котлів. Режим доступу:
https://www.alarko-carrier.com.tr/ebulten/YeniUrun/images_2/KombiTipleri.pdf
2. Каталітичний нагрівач. Режим доступу:
<https://xata.in.ua/ua/p1709663853-obogrevatel-gazovyj-keramicheskij.html>
3. Котел типу В з відкритим димоходом. Режим доступу:
<https://hounsfildboilers.co.uk/products/flue-options/conventional-open-flue-options/>
4. Схеми комбінованих котлів з герметичним димоходом. Режим доступу:
https://www.the50plus.co.uk/tech_support/Modern-Central-Heating/condense3.jpg
5. Технічний паспорт. Режим доступу:
https://staticmarket.104.ua/pub/media/productattach/v/i/viessmann_vitopend_100-w_a1jb_kombi_12_24_.pdf
6. Ham J. Performance of High-Efficiency Gas Boilers. Batiment International / J. Ham, H. Dubbeld // Building Research and Practice, 1985, V. 13. - P. 85-93.
7. John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988. - 915p.
8. North American Combustion Handbook, Volume 1, 3rd edition, North American Mfg Co., 1986. - 457 p.
9. Zaporozhets, Artur & Babak, Vitaliy & Nazarenko, Oleg. (2015). Improving the efficiency of fuel combustion in boilers up to 3.5 MW using an α -probe / Підвищення ефективності спалювання палива в котлах потужністю до 3,5 МВт з використанням α -зонду. Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/326519899_Improving_the_efficiency_of_fuel_combustion_in_boilers_up_to_35_MW_using_an_alpha-probe
[Pidvisenna efektivnosti spaluvanna paliva v kotlah potuznistu do 35 MVt z vikoristannam a-zondu](https://www.researchgate.net/publication/326519899_Improving_the_efficiency_of_fuel_combustion_in_boilers_up_to_35_MW_using_an_alpha-probe/Pidvisenna_efektivnosti_spaluvanna_paliva_v_kotlah_potuznistu_do_35_MVt_z_vikoristannam_alpha-zondu)
10. Razak A.M.Y. Industrial Gas Turbines. Performance and Operability, 2007, 602.
11. Kara M. Experimental investigation of a combi boiler heat exchanger: master thesis / M. Kara // İzmir Institute of Technology, 2018. - 91 p.

12. T. Hägglund and K.J. Åström. An industrial adaptive pid controller. IFAC Proceedings Volumes, 23(1):251–256, 1990. ISSN 1474-6670.
13. Elisha Joseph and O OlaiyaO. Cohen-coon pid tuning method: A better option to ziegler nichols-pid tuning method. Computer Engineering and Intelligent Systems, 9: 33–37, 2018.
14. S. Levy, S. Korotkin, K. Hadad, A. Ellenbogen, M. Arad, and Y. Kadmon. Pid autotuning using relay feedback. In 2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, pages 1–4, 2012.
15. Sigurd Skogestad and Chriss Grimholt. The simc method for smooth pid controller tuning. Advances in Industrial Control, pages 147–175, 01 2012.
16. K.J. Åström, T. Hägglund, C.C. Hang, and W.K. Ho. Automatic tuning and adaptation for pid controllers - a survey. IFAC Proceedings Volumes, 25(14):371–376, 1992. ISSN 1474-6670.
17. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy Review 2020: The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions. 2020.
18. Shao Y, Agarwal RK, Jin B, Wang X. Review of Computational Fluid Dynamics Studies on Chemical Looping Combustion. J Energy Resour Technol 2021.
19. Strakey PA. Oxy-Combustion Modeling for Direct-Fired Supercritical CO2 Power Cycles. J Energy Resour Technol 2019.
20. Rahman RK, Barak S, Manikantachari KRV (Raghu), Ninnemann E, Hosangadi A, Zambon A, et al. Probing the Effects of NOx and SOx Impurities on Oxy-Fuel Combustion in Supercritical CO2: Shock Tube Experiments and Chemical Kinetic Modeling. J Energy Resour Technol 2020.
21. Riaza J, Gil M V, Álvarez L, Pevida C, Pis JJ, Rubiera F. Oxy-fuel combustion of coal and biomass blends. Energy 2012.
22. Aliyu M, Abdelhafez A, Said SAM, Habib MA, Nemitallah MA, Mansir IB. Characteristics of Oxyfuel Combustion in Lean-Premixed Multihole Burners. Energy & Fuels 2019.

23. Yin C, Yan J. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: Combustion fundamentals and modeling. *Appl Energy* 2016.
24. Said SA, Aliyu M, Nemitallah MA, Habib MA, Mansir IB. Experimental investigation of the stability of a turbulent diffusion flame in a gas turbine combustor. *Energy* 2018.
25. Liu CY, Chen G, Sipöcz N, Assadi M, Bai XS. Characteristics of oxy-fuel combustion in gas turbines. *Appl Energy* 2012.
26. Hu X, Yu Q, Liu J, Sun N. Investigation of laminar flame speeds of CH₄/O₂/CO₂ mixtures at ordinary pressure and kinetic simulation. *Energy* 2014.
27. Abdelhafez A, Nemitallah MA, Rashwan SS, Habib MA. Adiabatic Flame Temperature for Controlling the Macrostructures and Stabilization Modes of Premixed Methane Flames in a Model Gas-Turbine Combustor. *Energy & Fuels* 2018.
28. Abdelhafez A, Rashwan SS, Nemitallah MA, Habib MA. Stability map and shape of premixed CH₄/O₂/CO₂ flames in a model gas-turbine combustor. *Appl Energy* 2018.
29. A. E. S. Green, B. A. S. Green, and J. C. Wagner, Radiation enhancement in oil/coal boilers converted to natural gas, United States Patent 5048433, 1990.
30. R. Viskanta, and M. P. Mengü, Radiation heat transfer in combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 1987.
32. E.P. Keramidaa, H.H. Liakosa, M.A. Fountib, A.G. Boudouvisa, and N.C. Markatos, Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces, *J. Heat and Mass Transfer*, 2000.
33. D. Riechelmann, F. Toshiro, and H. Yasunori, Low NO_x Combustion with Highly Preheated Air, *Ishikawajima Harima Engineering Review*, 2000.
34. W.B. Kim, D.H. Chung, J.B. Yang, and D.S. Noh, An Experimental Study on High Temperature and Low Oxygen Air Combustion, *J. of Thermal Science*, 2001, 9, 169–175.
35. J. S. Yang, G. Choi, D. Kim, and M. Katsuki, Prediction of flame formation in highly preheated air combustion, *J. of Mechanical Science and Technology*, 2008.

36. Astrom, K., & Bell, R. (1987). Dynamic Models for Boiler-Turbine-Alternator Units: Data Logs and Parameter Estimation for a 160 MW Unit. Lund. Sweden: Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology.
37. Pellegrinetti, G., & Bentsman, J. (1996). Nonlinear Control Oriented Boiler Modeling - A Benchmark Problem for Controller Design. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4.
38. Visioli, A. Practical PID control. London : Springer-Verlag, 2006.
39. Advances in PID Control. / T. K. Kiong, W. Qing-Guo, H. C. Chieh, T. J. Hägglund. London : Springer-Verlag, 1999.
40. Svrcek, Y. W., Mahoney, P. D., Young, R. B. A Real-Time Approach to Process Control. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2006.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі (подана в 1 номер ВОРТТІ, 2024р.)

МАРТИНЮК Валерій
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-5758-4244
e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com
СЕЛЬСЬКИЙ Андрій
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0002-7373-0472
e-mail: andriy.saa@gmail.com
КОТЛЯРСЬКА Валерія
Хмельницький національний університет
e-mail: valeriakotlarska2018@gmail.com

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ КОТЛОМ

У статті розглядається удосконалений метод керування котлом для забезпечення повного згорання природного газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшити витрати природного газу для опалення та нагрівання води за допомогою контролю температури полум'я. Для реалізації удосконаленого методу керування котлом використано терморпару К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С. Для вимірювання температури за допомогою терморпару використовується спеціалізований драйвер МАХ6675. В якості пристрою керування для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом використано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Розроблено програму керування котлом в середовищі Node-Red, яка реалізує удосконалений метод керування котлом.

Ключові слова: удосконалений метод керування котлом, повне згорання природного газу, підвищення коефіцієнта корисної дії котла, терморпара, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi.

MARTYNYUK Valeriy, SELSKYI Andrii, KOTLARSKA Valeria
Khmelnitsky national university, Ukraine

IMPROVED BOILER CONTROL METHOD

The article discusses an improved boiler control method to ensure complete combustion of natural gas, increase boiler efficiency, and reduce natural gas consumption for heating and water heating by flame temperature control. To implement the improved boiler control method, a K-type TXA chromel-alumel thermocouple with a temperature of up to 1250 °C was used. A specialized MAX6675 driver is used to measure temperature using a thermocouple. A Raspberry Pi single-board computer was used as a control device for the experimental study of the improved boiler control method. A boiler control program has been developed in the Node-Red environment, which implements an improved boiler control method.

To maintain the temperature of the burner, we regulate the gas supply using the speed of rotation of the boiler fan. The speed of rotation of the boiler fan is determined through the output of the PID regulator. The response time of the process will depend on only three values such as proportional gain, integral time and derivative time. It is shown that the use of an improved method of controlling the boiler allows to significantly increase the efficiency of the heating system of the house.

Keywords: improved boiler control method, complete combustion of natural gas, increasing boiler efficiency, thermocouple, Raspberry Pi single-board computer.

Постановка проблеми

Основною функцією котла є задоволення необхідних потреб в обігріві приміщення. За бажанням користувача, пристрій забезпечує подачу гарячої води. Найважливішим фактором, що визначає характеристики горіння, є те, що кількість повітря, необхідна для горіння, є або низькою, або дуже високою, або необхідною.

Повне згорання - це випадок, коли в результуючій частині рівняння згорання відсутній горючий газ. Відсутність CO в димових газах є ознакою повного згорання. Як правило, загальна кількість CO в димових газах близька до нуля, а співвідношення CO₂ знаходиться на рівні 12-13%. Також у димохідному газі присутній азот.

Оскільки фактичні умови не збігаються з ідеальними умовами горіння, для забезпечення повного згорання використовується надлишок повітря, але у цьому випадку тепловіддача нижча, ніж в процесі повного згорання природного газу. Горіння з надлишком повітря збільшує витрати природного газу для опалення та нагрівання води.

Тому, забезпечення повного згорання природного газу та підвищення коефіцієнта корисної дії котла та зменшення витрат природного газу для опалення та нагрівання води, є дійсно актуальною задачею. Удосконалений метод керування газовим котлом, який дозволяє підвищити ефективність згорання палива, за рахунок вимірювання температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

Аналіз останніх джерел

Комбіновані котли – це нагрівальні прилади, які використовуються в закритих приміщеннях для задоволення потреб у опаленні та забезпеченні гарячою водою. Комбіновані котли поділяються на кілька типів відповідно до їх властивостей [1]. На відміну від звичайних котлів, комбіновані котли конденсаційного типу не мають відкритої камери згоряння. Камера згоряння комбінованого котла конденсаційного типу мають форму герметичної закритої камери, як зображено на рис. 1 [2].

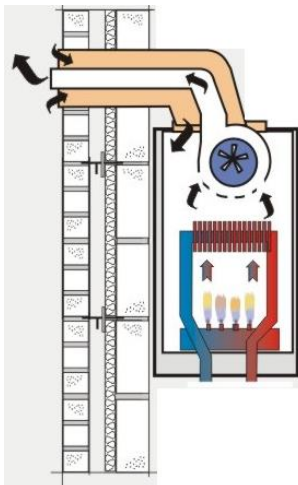


Рис. 1. Схема конденсаційного комбінованого котла з герметичним димоходом [2]

Конденсаційні комбіновані котли працюють у середньому на 15% ефективніше, ніж звичайні котли, оскільки вони використовують значну частину тепла димових газів у процесі нагрівання. Ефективність котла залежить не лише від температури димових газів, але й від співвідношення газу та повітря, яке також відіграє вирішальну роль у процесі згоряння, впливаючи на ефективність і викиди. Температура точки роси продуктів згоряння залежить від співвідношення газ/повітря, як зображено на рис. 2 [3].

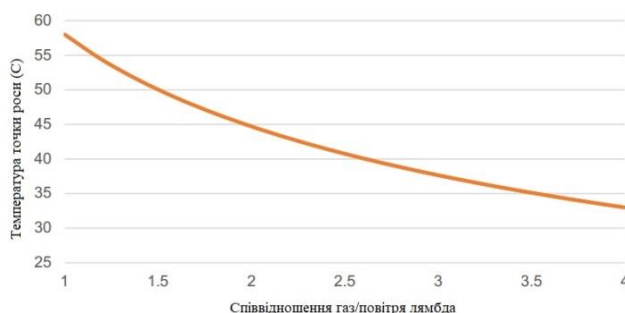


Рис. 2. Температура точки роси димового газу як функція співвідношення газ/повітря лямбда [3]

Дані, які зображені на рис. 2, дійсні для стехіометричного горіння з хімічно ідеальним співвідношенням газ/повітря. Лямбда є зручним параметром для представлення співвідношення газ/повітря при згорянні відносно стехіометричного горіння.

Якщо лямбда дорівнює 1 до 1, то це призводить до стехіометричного горіння. Якщо лямбда більше одиниці, то це призводить до збідненого горіння, а якщо менше одиниці, то це призводить до збагаченого горіння. Відхід від стехіометричного спалювання до збідненого газу знижує температуру точки роси, тим самим знижуючи потенціал ефективності. Перехід до збагаченого газом має свої недоліки, оскільки підвищує ризик неповного згоряння та викидів CO, що створює ризик для безпеки.

З додаванням витяжних вентиляторів зі змінною швидкістю потоку та газових клапанів з декількома витратами потоку було введено певний ступінь модуляції, але це відбулося лише після спільних нововведень попереднього змішування газу/повітря перед пальником і більшого або вторинного теплообмінника, щоб котли могли реалізувати свій потенціал ефективності.

Хоча на перший погляд це може свідчити про те, що газові котли є термодинамічно простою та надійною формою опалювальної технології, з точки зору факторів, що сприяють роботі та ефективності, реальність, як завжди, складніша, і постійний розвиток котлів відображає це.

Виклад основного матеріалу

Для складання рівнянь горіння дуже важливо знати вміст кисню в повітрі. Як відомо, повітря в основному складається з атомів азоту (78%) та кисню (21%). Аргон містить 0,9% і є найбільшим компонентом з решти 1% газів. Усі інші гази в повітрі містять всього лише 0,1%.

Спалювання в комбінованих котлах відбувається в камері згоряння. Спалювання в конденсаційному комбінованому котлі відбувається в теплообміннику, тоді як згоряння в звичайному комбінованому котлі відбувається в камері згоряння під первинним теплообмінником.

У комбінованих котлах в якості палива зазвичай використовується природний газ. Природний газ в основному складається з метану. Через це в рівняннях метан використовується як паливо для загального відображення рівняння горіння природного газу, тоді як співвідношення компонентів повітря прийнято приблизно як 20% кисню та 80% азоту.

Стехіометричне співвідношення повітря до палива для природного газу визначається по масі, за об'ємом та відсотком палива за масою. Стехіометричне співвідношення повітря до природного газу:

- по масі 17,2/1 [3];
- за об'ємом 9,7/1 [5];
- відсотком палива за масою 5,8% [5].

Температура адіабатичного полум'я - це температура, досягнута полум'ям в ідеальних умовах. Це верхня межа температури, яка досягається в реальних процесах. Припускаючи початкові атмосферні умови (1 бар і 20 °С), для природного газу температура адіабатичного полум'я складає $T=1960$ °С [8].

Аналіз стехіометричного співвідношення повітря до палива для природного газу, яке визначається по масі, за об'ємом та відсотком палива за масою і наведене в [7, 8], визначає оптимальне по масі співвідношення між повітрям і природним газом 17,2/1.

У сучасних комбінованих котлах використовується співвідношення між повітрям і природним газом в діапазоні 25/1-30/1. Це не відповідає оптимальному по масі співвідношенню між повітрям і природним газом 17,2/1. В наслідок цієї невідповідності виникають великі втрати теплоти через димохід із вихідними газами [9].

Метою спалювання палива в камері згорання є підвищення температури газового потоку, і температура полум'я є одним із факторів, оскільки вона впливає на швидкість реакції горіння. Іншим параметром, який впливає на швидкість реакції, є тиск горіння. За відсутності зовнішнього теплообміну досягнута температура називається адіабатичною температурою полум'я. На практиці завжди існує деяка теплопередача, і температура, досягнута під час горіння, завжди нижча за справжню адіабатичну температуру полум'я.

Співвідношення паливо-повітря, що відповідають стехіометричному відношенню, мають коефіцієнт еквівалентності, що дорівнює одиниці. На рис. 3 [6] показано адіабатичну температуру полум'я для метану, яка змінюється залежно від коефіцієнта еквівалентності. На рисунку також показано відхилення фактичної адіабатичної температури полум'я від теоретичного значення внаслідок ефектів дисоціації.



Рис. 3. Адіабатична температура полум'я для метану, яка змінюється залежно від коефіцієнта еквівалентності [6]

Максимальна фактична адіабатична температура полум'я виникає у злегка насичених сумішах (наприклад, $\phi=1,05$). Адіабатична температура для палива з вищим вмістом вуглецю буде вищою, а коефіцієнт еквівалентності, де спостерігається максимальна адіабатична температура полум'я, також збільшується.

Пропонується удосконалений метод керування газовим котлом, який дозволяє підвищити ефективність згорання палива, за рахунок вимірювання температури полум'я пальника, а не вимірювання кількості кисню, яка знаходиться в вихлопних газах за допомогою кисневого датчика (лямбда-зонду).

За допомогою цього методу, давач вимірює температуру полум'я в пальнику котла. Після цього система керування може регулювати подачу палива та повітря в камеру згорання, щоб забезпечити оптимальні умови для ефективного згорання. Контроль температури полум'я дозволяє підтримувати оптимальну температуру для згорання палива і, таким чином, забезпечує оптимальну ефективність котла.

Цей метод допомагає зменшити викиди шкідливих речовин, підвищити ефективність опалення і зменшити споживання палива, що може призвести до зменшення витрат енергії та витрат на опалення в цілому.

Впровадження удосконаленого методу керування опалювальним котлом базується на використанні компонентів сучасного конденсаційного котла, які забезпечують згорання природного газу та виведення димових газів із котла.

Для реалізації удосконаленого методу керування котлом використано термопару К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С. Для вимірювання температури за допомогою термопари К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С використовується спеціалізований драйвер МАХ6675. В якості пристрою керування для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом використовуємо одноплатний комп'ютер Raspberry Pi.

Розробку програми для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом виконано в середовищі Node-RED. Node-RED - це інструмент програмування для з'єднання апаратних пристроїв, API та онлайн-сервісів новими та цікавими способами. Він надає редактор на основі браузера, який дозволяє легко з'єднувати потоки за допомогою широкого спектру вузлів у палітрі, які можна розгорнути в його середовищі виконання.

Легке середовище виконання побудоване на Node.js, повною мірою використовуючи переваги його моделі, керованої подіями, без блокування. Це робить його ідеальним для роботи на периферії мережі на недорогому обладнанні, такому як Raspberry Pi, а також у хмарі. На рис. 4 наведена програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED.

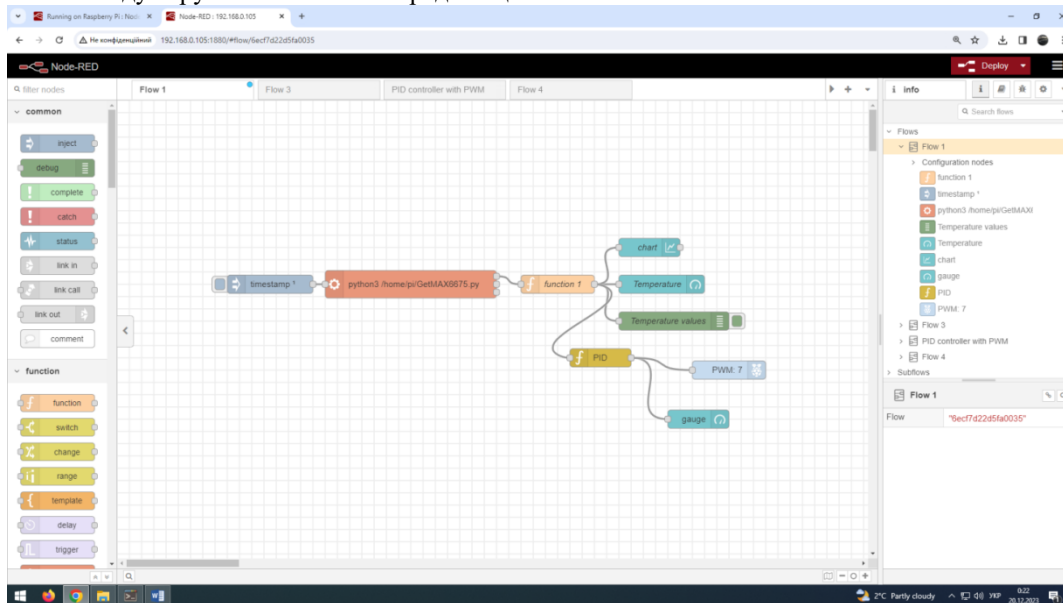


Рис. 4. Програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED

Програма експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED розпочинається вузлом Inject із властивостями Timestamp. Вузол Inject у програмі експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом в середовищі Node-RED використовується для ручного запуску потоку.

Далі запускається програма зчитування значення температури пальника котла за допомогою термопари K-типу TXA хромель-алюмель з температурою до 1250 °C та драйвера MAX6675, яка написана на мові Python 3. Отримане значення температури передається на вузол function 1. Вузол function 1 здійснює розрахунок значення температури в °C, яке далі передається на вузли відображення температури у вигляді графіка зміни температури в часі, у вигляді показу стрілочного індикатора температури та у вигляді цифрового індикатора температури.

Також значення температури надходить на вузол PID, який виконує функцію PID-регулятора. Вузол PID має 2 виходи, перший - для керування вентилятором газового котла, а другий - для відображення значення сигналу керування у вигляді широтно-імпульсної модуляції (PWM). Обидва виходи забезпечують значення з плаваючою комою від 0 до 10.

Вузол приймає наступні значення конфігурації.

Підсилення - % підсилення, яке буде застосовано до різниці між заданим значенням і вхідним значенням.

Ti - час у секундах, протягом якого потрібно застосувати значення підсилення.

Час переобчислення - час у секундах між кожним обчисленням значення.

Задане значення - встановлення заданого значення.

Для підтримки температури пальника регулюємо подачу газу за допомогою швидкості обертання вентилятора котла. Швидкість обертання вентилятора котла визначається через вихід ПІД-регулятора. Час відгуку процесу буде залежати лише від трьох значень, таких як пропорційне підсилення, інтегральний час і похідний час.

Пропорційний контролер формує керуючий вихід пропорційно похибці. Це значення похибки множиться на пропорційне підсилення, щоб визначити відгук на виході.

Якщо коефіцієнт підсилення встановлений занадто високим, то вихід контролера починає коливатися і стає нестабільним, а якщо коефіцієнт підсилення встановлений на дуже низькому значенні, то вихід контролера не буде реагувати на зміну встановленого значення.

Використання одного лише пропорційного регулятора має великий недолік. Зсув є стійкою помилкою і не може бути усунений лише за допомогою пропорційного контролера. Швидкість спрацьовування збільшується при збільшенні пропорційного підсилення.

У зв'язку з обмеженням пропорційного регулятора присутній безперервний зсув. Інтегральний контролер буде безперервно збільшувати і зменшувати вихід контролера, щоб зменшити похибку.

Якщо значення похибки велике, інтегральний режим буде швидко збільшувати/зменшувати вихід контролера, а якщо значення помилки невелике, інтегральний режим буде сповільнювати функцію.

Для великого інтегрального часу швидкість спрацьовування контролера буде сповільнюватися, а для малого інтегрального часу швидкість відгуку буде швидкою.

Обмеження І-контролера полягає в тому, що він не може передбачити майбутню поведінку помилки. Тому він реагує лише один раз, коли відбувається зміна встановленого значення.

Похідний контролер формує вихід на основі швидкості зміни похибки і буде працювати швидше, ніж PI-контролер. Якщо похибка не змінюється, то вихід цього контролера дорівнює нулю.

Швидкість спрацьовування збільшується зі збільшенням часу похідної. Якщо значення часу похідної буде занадто великим, то виникнуть коливання і система стане нестійкою. Для нульового значення похідного часу вихід контролера стане рівним нулю.

Висновки

У даній статті було представлено удосконалений методу керування котлом, в якому використано термопару К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С. Для вимірювання температури за допомогою термопар К-типу ТХА хромель-алюмель з температурою до 1250 °С використовується спеціалізований драйвер МАХ6675.

В якості пристрою керування для експериментального дослідження удосконаленого методу керування котлом використаємо одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Розроблено програму керування котлом в середовищі Node-Red, яка реалізує удосконалений метод керування котлом. Node-RED - це інструмент потокового програмування, спочатку розроблений командою IBM Emerging Technology Services, а зараз є частиною OpenJS Foundation.

Запропоновано структурну схему регулятора співвідношення повітря/газ. Контроль температури на виході газового котла з одночасним збереженням безпечного співвідношення повітря та палива є головним пріоритетом. Щоб досягти цього, схема контролю надлишкового кисню повинна працювати правильно без будь-яких коливань і повинна швидко усувати збурення. Основні перешкоди виникають через потік живлення, температуру живлення на вході, калорійність паливного газу або тиск паливного газу в колекторі.

Показано, що використання удосконаленого методу керування котлом дозволяє значно підвищити ефективність опалювальної системи будинку. Фактична річна економія споживання газу залежить від кількох робочих параметрів, таких як швидкість спалювання, температура вихлопу, вартість природного газу і кількість робочих годин газового котла на рік. Економія енергії коливається від 5% для низькотемпературного процесу до 20% для високотемпературного процесу шляхом контролю надлишку повітря до мінімально допустимого рівня.

Література:

1. Визначення та типи комбінованих котлів. Режим доступу: https://www.alarko-carrier.com.tr/ebulten/YeniUrun/images_2/KombiTipleri.pdf
2. Схеми комбінованих котлів з герметичним димоходом. Режим доступу: https://www.the50plus.co.uk/tech_support/Modern-Central-Heating/condense3.jpg
3. John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988. - 915p.
4. Kara M. Experimental investigation of a combi boiler heat exchanger: master thesis / M. Kara // İzmir Institute of Technology, 2018. - 91 p.
5. North American Combustion Handbook, Volume 1, 3rd edition, North American Mfg Co., 1986. - 457 p.
6. Razak A.M.Y. Industrial Gas Turbines. Performance and Operability, 2007, 602.

References

1. Definition and types of combined boilers. Access mode: https://www.alarko-carrier.com.tr/ebulten/YeniUrun/images_2/KombiTipleri.pdf
2. Schemes of combined boilers with a sealed chimney. Access mode: https://www.the50plus.co.uk/tech_support/Modern-Central-Heating/condense3.jpg
3. John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988. - 915p.
4. Kara M. Experimental investigation of a combi boiler heat exchanger: master thesis / M. Kara // İzmir Institute of Technology, 2018. - 91 p.
5. North American Combustion Handbook, Volume 1, 3rd edition, North American Mfg Co., 1986. - 457 p.
6. Razak A.M.Y. Industrial Gas Turbines. Performance and Operability, 2007, 602.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломниця: Котлярська Валерія Віталіївна

Тема: Удосконалений метод керування котлом

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 16 Кількість сторінок записки 74

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу керування котлом. Алгоритм та програмна реалізація удосконаленого методу керування котлом. Дослідження удосконаленого методу керування котлом. Висновки.
 2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
 3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі були розглянуті наступні питання: будова і принцип роботи конденсаційного котла. У другому розділі розроблено математичну модель процесу горіння та запропоновано удосконалений метод керування котлом. У третьому розділі досліджено алгоритм та програмну реалізацію удосконаленого методу керування котлом. У четвертому розділі проведені експериментальні дослідження удосконаленого методу керування котлом.
 4. Позитивні сторони роботи: розробка програми керування котлом в середовищі Node-Red, яка реалізує удосконалений метод керування котлом.
-

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється розробці математичного апарату процесу горіння природного газу в котлі.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (4,75/A)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Клюш Дрій Павлович, к.т.н., доцент, зав. кафедрою кібербезпеки

"19" грудня 2023 р.

_____ (підпис)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Удосконалений метод керування котлом

Автор: Котлярська Валерія Віталіївна

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 3,85% і адресується до 176 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 29.12.2023р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Котлярська В.В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2023р.

дата



підпис

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 7%

ID: 124879 Назва: МКР Удосконалений метод керування котлом Додано в БД: 2023-12-27 Автора: Валерія КОТЛЯРСЬКА Керівник: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	83415	689	2503 (3%)	28 (4%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:
Кафедра АКІПІТК

ID перевірки:
1016037996

Дата перевірки:
27.12.2023 11:39:52 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
27.12.2023 11:59:47 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Котлярська_кваліфікаційна_робота_остаточна

Кількість сторінок: 80 Кількість слів: 12194 Кількість символів: 94336 Розмір файлу: 3.92 MB ID файлу: 1015731166

1358 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

3.85% Схожість

Найбільша схожість: 1.16% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12844/1/%d0%93>).

2.34% Джерела з Інтернету

128

Сторінка 82

2.65% Джерела з Бібліотеки

48

Сторінка 83

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Не знайдено жодних посилань

0.04% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

0.04% Вилучення з Інтернету

1

Сторінка 84

0% Вилученого тексту з Бібліотеки

2

Сторінка 84

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Змінені символи

4