

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет автоматизації і інформаційних технологій
кафедра автоматизації технологічних процесів

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему: "Автоматизоване керування тепловою потужністю модульної котельні з адаптацією параметрів теплоспоживання"

Биковський Дмитро Андрійович

Київ 2024

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**Факультет автоматизації і інформаційних технологій
кафедра автоматизації технологічних процесів**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

„___” _____ 2024 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

"Автоматизоване керування тепловою потужністю модульної котельні з
адаптацією параметрів теплоспоживання"

Виконав студент групи: АКІТм-23

Спеціальність: 174 – Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Спеціалізація: Автоматизоване
управління технологічними процесами
Биковський Дмитро Андрійович

Керівник: Самойленко М.І.

(вчене звання, науковий ступінь)

Київ 2024

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: автоматизації і інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації технологічних процесів

Освітній рівень: магістр за ОПП

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Спеціалізація: Автоматизоване управління технологічними процесами

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____” _____ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Биковський Дмитро Андрійович

(прізвище, ім'я та по батькові студента)

1. Тема роботи: «Автоматизоване керування тепловою потужністю модульної котельні з адаптацією параметрів теплоспоживання»
затверджена наказом ректора КНУБА № __ від «__» _____ 2024 року
2. Керівник роботи
Самойленко Микола Іванович

_____ (прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
 - Р.1. Загальна частина
 - Р.2. Технології та алгоритми регулювання теплоспоживання
 - Р.3. Практична частина
 - Р.4. Методика прогнозування теплового навантаження
 - Р.5. Економічна частина

5. Графічний матеріал за розділами

- P.1. _____
P.2. _____
P.3. _____
P.4. _____
P.5. _____

6. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина;
б) практична частина.

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Загальна частина	14.10.2024
Розділ 2. Технології та алгоритми регулювання теплоспоживання	21.10.2024
Розділ 3. Практична частина	22.10.2024
Розділ 4. Методика прогнозування теплового навантаження	02.11.2024
Розділ 5. Економічна частина	07.11.2024
Остаточне оформлення роботи	09.11.2024
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	10.11.2024
Попередній захист роботи на кафедрі	

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.	Самойленко М.І.		
Розділ 2.	Самойленко М.І.		
Розділ 3.	Самойленко М.І.		
Розділ 4.	Самойленко М.І.		
Розділ 5.	Шевчук К.І.		

8. Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-професійною програмою підготовки «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Автоматизоване керування тепловою потужністю модульної котельні з адаптацією параметрів теплоспоживання» 88 с., 23 рис., 18 табл., 22 джерела.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є модульна котельня з автоматизованою системою управління тепловою потужністю. Предметом є адаптивні алгоритми керування тепловими параметрами системи у відповідь на коливання теплоспоживання. Мета роботи – адаптація керування теплової потужності системи теплопостачання модульної котельні малої потужності. Охарактеризована тепла схема, обґрунтовано вибір основного та допоміжного обладнання. Теплова схема котельні передбачає відпуск теплової енергії споживачам у вигляді гарячої води з температурним графіком 95–70°C. Проєкт виконується з метою економії паливних і фінансових ресурсів опалення з використанням котельної модульної установки. Передбачається порівняння і дослідження традиційного методу фіксованого значення температури на виході та дослідження динамічного регулювання модульної установки за допомогою адаптації параметрів теплоспожива

КЛЮЧОВІ СЛОВА: модульна котельня, енергоефективність, опалення, теплове навантаження, котел, тепла потужність, автоматизація, адаптивне керування, теплоспоживання

ABSTRACT

Master's thesis for obtaining a master's degree under the educational and professional training program "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic: "Automated control of thermal power of a modular boiler room with adaptation of heat consumption parameters" 88 p., 23 figures, 18 tables, 22 sources.

Object and subject of research. The object of the study is a modular boiler house with an automated thermal power management system. The subject is adaptive algorithms for controlling the thermal parameters of the system in response to fluctuations in heat consumption. The purpose of the work is to adapt the control of the thermal power of the heat supply system of a low-power modular boiler house. The thermal scheme is characterized, the choice of the main and auxiliary equipment is justified. The thermal scheme of the boiler room provides for the release of thermal energy to consumers in the form of hot water with a temperature schedule of 95–70°C. The project is carried out with the aim of saving fuel and financial resources for heating with the use of a modular boiler installation. A comparison and study of the traditional method of a fixed value of the outlet temperature and a study of the dynamic regulation of the modular installation using the adaptation of the heat consumption parameters are provided.

KEY WORDS: modular boiler house, energy efficiency, heating, heat load, boiler, heat capacity, automation, adaptive control, heat consumption.

Скорочення

У цій праці використовуються наступні скорочення:

RMSE - Середня квадратична похибка (MW)

MAE - Середня абсолютна похибка (MW)

MAPE - Середня абсолютна похибка у відсотках (%)

ME - Середня похибка (MW)

OLS - Звичайна регресійна модель найменших квадратів

MLP - Багатошарова модель перцептрона

SVR - Модель підтримки векторної регресії

RBF - Ядро функції радіального базису

LSTM - Модель мережі з довгою короткочасною пам'яттю

ІТП – індивідуальний тепловий пункт

ІоТ – інтернет речей

ЗМІСТ

ВСТУП

1. Загальна частина.....	10
1.1 Принцип роботи теплових систем.....	12
1.2 Типи котлів та їх класифікація	15
1.3 Модульні котельні установки	18
1.3.1 Особливості модульних котелень	18
1.3.2 Переваги та недоліки модульних котелень.....	21
1.4 Роль автоматизації в теплових системах	25
2. Технології та алгоритми регулювання теплоспоживання	27
2.1 Адаптивне керування тепловою потужністю	28
2.1.1 Адаптивні системи керування	29
2.2 Сучасні технології регулювання теплоспоживання	37
2.3 Хмарні платформи для регулювання теплоспоживання.....	38
3. Практична частина	40
3.1 Практичне впровадження.....	40
3.1.1 Розробка інтерфейсу	42
3.1.2 Налаштування моделі будівлі.....	44
3.1.3 Результати тестування.....	46
3.1.4 Щоденний аналіз результатів	46
3.1.5 Аналіз місячних результатів.....	47
4. Методика прогнозування теплового навантаження	50
4.1 Аналіз теплоспоживання.....	50
4.2 Дані про погоду	53
4.3 Календарні дані	54
4.4 Дані про відпустку	54
4.5 Дослідження даних	55
4.6 Сценарії даних і попередня обробка.....	57
4.7 Вибір і тестування моделі	58
4.8 Результати.....	60

4.9	Сезонні варіації продуктивності.....	62
4.10	Значення даних календаря та свят.....	66
4.11	Підсумки досліджень.....	67
5.	Економічна частина	69
5.1	Економічна ефективність автоматизації котелень	69
5.2	Розрахунок капітальних вкладень на придбання та монтаж нового обладнання.....	70
5.3	Визначення розрахункової собівартості 1ГДж тепла	71
5.4	Визначення чисельності робітників за категоріями	72
5.5	Розрахунок фонду заробітної плати працюючих	75
5.6	Розрахунок матеріальних та паливно-енергетичних витрат	79
5.7	Розрахунок витрат на утримання та експлуатацію обладнання і цехових витрат.....	81
5.8	Визначення показників ефективності роботи модульної котельні.....	82

Висновок

Список використаних джерел:

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Ця тема є актуальною у світлі сучасних вимог до енергоефективності та сталого використання ресурсів. Значна кількість підприємств на території України відчувають гостру необхідність в модернізації систем контролю та управління основного технологічного обладнання. Сучасні вимоги до ефективного використання енергії, зокрема у галузі теплопостачання, ставлять акцент на необхідності автоматизації та адаптивного керування тепловими системами. У контексті зростання цін на енергоносії та підвищення екологічних стандартів, модульні котельні виступають оптимальним рішенням для підприємств і житлових об'єктів. Однак для забезпечення максимальної ефективності їх роботи потрібні автоматизовані системи керування, що можуть адаптуватися до змін у параметрах теплоспоживання. Це робить тему роботи актуальною як з економічної, так і з технічної точки зору.

Мета дослідження. Основною метою магістерської роботи є розробка системи автоматизованого керування тепловою потужністю модульної котельні, яка здатна адаптуватися до змінних параметрів теплоспоживання. Така система повинна забезпечувати стабільність теплопостачання, підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Наукова новизна. Вперше запропоновано адаптивний підхід до автоматизації управління тепловою потужністю модульної котельні з урахуванням змін у параметрах теплоспоживання, що дозволяє покращити ефективність енерговикористання в умовах коливань потреб.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовано аналітичний метод, моделювання та експериментальну перевірку за допомогою сучасних інструментів аналізу систем керування.

Практична значущість. Результати роботи можуть бути використані при модернізації та проектуванні систем теплопостачання з автоматизованим

управлінням, особливо в умовах, де потрібна мобільність та адаптивність теплової потужності.

У теоретичній частині роботи розглядаються загальні принципи функціонування теплових систем, які забезпечують постійне теплозабезпечення будівель та промислових об'єктів, а також їх ключові параметри та характеристики. Серед них виділяються котельні установки, їх типологія впливає на вибір і ефективність систем керування.

Існує кілька основних типів котельних установок, зокрема водогрійні та парові, кожен з яких має свої специфічні характеристики. Водогрійні котли використовуються для нагріву води, що постачається до системи опалення, тоді як парові котли забезпечують подачу пари, що використовується у різних виробничих процесах або для опалення великих об'єктів. Автоматизація керування котельними установками є необхідною для досягнення високої ефективності, що включає мінімізацію витрат палива та зменшення екологічного впливу через зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Особлива увага у проекті приділяється модульним котельням, які мають ряд важливих переваг у порівнянні з традиційними котельними системами. Основні переваги модульних котелень полягають у їхній гнучкості, здатності до масштабування, підвищеній енергоефективності та оптимізації витрат. Гнучкість системи означає, що кількість модулів котельні може варіюватися в залежності від теплового навантаження, забезпечуючи необхідну теплову потужність саме тоді, коли це потрібно. Це дозволяє не лише знизити витрати на паливо, але й мінімізувати зношення обладнання через уникнення роботи котлів на надлишковій потужності. Також модульні котельні характеризуються вищою енергоефективністю через можливість використання меншої кількості палива для забезпечення тієї ж теплової потужності, що й у традиційних системах.

Однак, окрім переваг, модульні котельні мають і свої недоліки. Один з ключових — це необхідність точного автоматизованого керування. Без застосування сучасних систем автоматизації важко забезпечити стабільну та економічно вигідну роботу котельні, що може призвести до зайвих витрат ресурсів або зниження ефективності. Саме тому автоматизація процесу керування тепловою потужністю є критично важливим завданням для досягнення належного рівня продуктивності та зниження витрат.

Важливим елементом даного проекту є адаптивне керування тепловою потужністю. Зміна потреб у теплоспоживанні, викликана зовнішніми факторами (зміни погоди, сезону) та внутрішніми процесами (зміна навантаження, часу доби), вимагає використання сучасних технологій та підходів до керування. Адаптивне керування дозволяє системі автоматично підлаштовуватися до цих змін, забезпечуючи стабільне теплозабезпечення без надмірного використання ресурсів. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли котельня працює на максимальній потужності тоді, коли реальні потреби значно менші, що призводить до перевитрат палива і збільшення викидів в атмосферу.

Дана магістерська дисертація розроблена в умовах війни і при перспективі буде знаходити вирішення енергетичних проблем нашої країни.

Апробація роботи. Дослідження магістерської дисертаційної роботи доповідалися і отримали позитивні відгуки на науково-практичній конференції:

Биковський Д.А. «АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЮ ПОТУЖНІСТЮ МОДУЛЬНОЇ КОТЕЛЬНОЇ З АДАПТАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ»

*V Міжнародна студентська наукова конференція «МІЖДИСЦИПЛІНАРНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ»
04.10.2024 | Черкаси, Україна. Збірник 192 стор.*

1. Загальна частина

Автоматизація котельних систем є важливим аспектом розвитку сучасної енергетики, оскільки дозволяє значно підвищити ефективність використання енергії та знизити експлуатаційні витрати. В умовах постійного зростання цін на енергоносії, а також загострення екологічних проблем, пошук ефективних рішень у галузі теплопостачання набуває особливого значення. Одним із таких рішень є автоматизоване керування тепловими процесами в котельних установках, зокрема, в модульних котельнях, які широко використовуються як у житлово-комунальному господарстві, так і в промисловості.

Автоматизація дозволяє контролювати та регулювати роботу котельних установок з мінімальною участю оператора, що забезпечує підвищення надійності та точності виконання технологічних процесів. Сучасні системи автоматизації забезпечують постійний моніторинг параметрів роботи котельні, таких як температура, тиск, витрата палива та води, рівень шкідливих викидів тощо. На основі цих даних система автоматично коригує режими роботи обладнання, забезпечуючи оптимальне споживання енергії та підтримуючи необхідний рівень теплопостачання в залежності від потреб споживачів.

Особливої актуальності набуває автоматизація для модульних котельних, оскільки їх перевагою є можливість масштабування та швидка адаптація до зміни теплового навантаження. В залежності від потреб споживачів можна збільшувати або зменшувати кількість активних модулів, що працюють у складі котельні. Автоматизовані системи керування дозволяють оптимізувати цей процес, забезпечуючи ефективний розподіл теплової потужності між модулями та уникати перевантажень або перевитрати енергії.

Застосування автоматизації також сприяє зниженню впливу людського фактора на експлуатацію котельного обладнання. Оператор може контролювати роботу котельні дистанційно, за допомогою спеціалізованих програмних комплексів, що зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій через помилки обслуговуючого персоналу. Крім того, система автоматизації може самостійно виявляти несправності або відхилення в роботі обладнання і повідомляти про це оператора, що дозволяє своєчасно реагувати на проблеми та проводити профілактичне обслуговування, запобігаючи серйозним аваріям.

Однією з ключових переваг автоматизованих котельних систем є можливість адаптації до змін зовнішніх умов та теплових навантажень. Наприклад, в залежності від температури зовнішнього середовища система може автоматично коригувати теплову потужність котельні для забезпечення комфортних умов у будівлях. Це дозволяє уникати перевитрати енергії в періоди низьких температур або недостатнього теплопостачання при підвищенні температури зовні. Така адаптація особливо важлива в системах централізованого теплопостачання, де навантаження на котельню може значно змінюватися протягом доби або залежно від сезону.

Системи автоматизації можуть працювати на основі різних алгоритмів керування. Найпоширенішими є пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, які забезпечують точне і стабільне регулювання теплової потужності за рахунок постійного порівняння фактичних параметрів з встановленими значеннями і коригування відповідно до цього. Однак, у сучасних системах все частіше застосовуються більш складні адаптивні алгоритми керування, що враховують не тільки поточні умови, але й історичні дані про роботу системи, а також прогнози щодо майбутніх навантажень. Це дозволяє ще точніше регулювати теплопостачання і знижувати витрати енергії.

1.1 Принцип роботи теплових систем

Теплові системи — це установки, призначені для генерування теплової енергії з метою забезпечення теплового комфорту або технологічних процесів. Основою таких систем є теплогенератори (котли), що перетворюють енергію палива у теплову, яка використовується для обігріву будівель або для промислових цілей.

Теплові системи призначені для забезпечення комфортних умов у приміщеннях за рахунок підтримання необхідної температури та забезпечення теплового комфорту. Їх основне завдання полягає в компенсації тепловтрат, які виникають через різницю між температурою навколишнього середовища та внутрішньою температурою приміщення. Принцип роботи таких систем базується на перетворенні енергії палива або іншого джерела тепла в корисну теплову енергію, яка використовується для обігріву приміщень або забезпечення гарячого водопостачання.

Основою будь-якої теплової системи є теплогенеруючий елемент – це може бути котел, тепловий насос або інший пристрій, що генерує тепло. Котел, як приклад класичного рішення, може працювати на різних видах палива, таких як газ, тверде паливо, рідке паливо чи електроенергія. Принцип його роботи полягає у спалюванні палива, що спричиняє виділення теплової енергії. Ця енергія передається теплоносію (воді або повітрю), який циркулює через систему і доставляє тепло до різних приміщень.

Теплоносій, наприклад вода, нагрівається в котлі і за допомогою насосів циркулює по трубопроводах системи. У системах з природною циркуляцією теплоносій рухається завдяки різниці густини нагрітої і охолодженої рідини. У приміщеннях тепло передається через радіатори або теплі підлоги, що забезпечують рівномірне розподілення тепла. Сучасні теплові системи можуть також мати компоненти, що дозволяють точніше регулювати тепловіддачу,

такі як терморегулятори на радіаторах, які контролюють подачу гарячої води в залежності від температури в приміщенні.

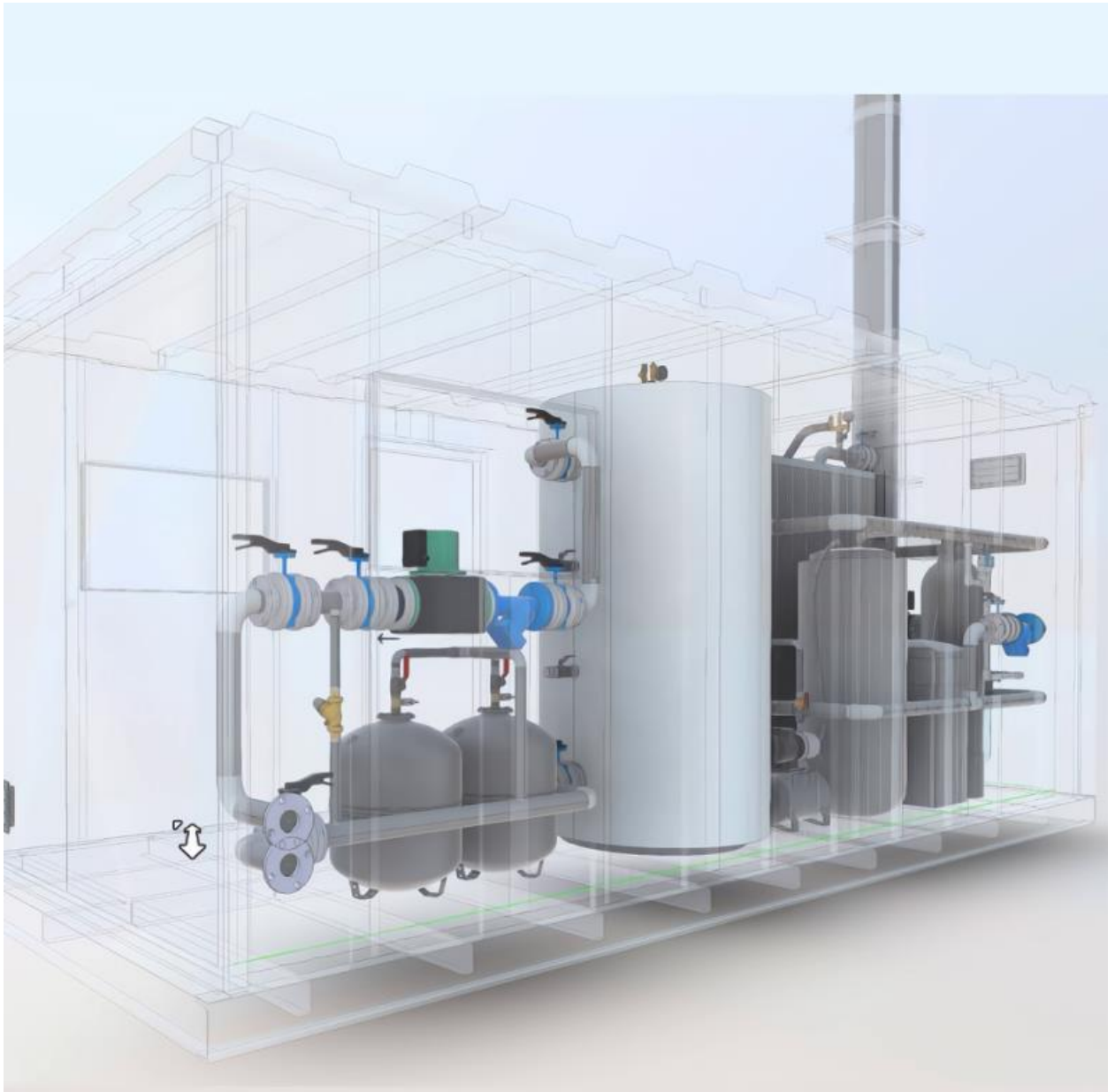


Рис.1.1 вигляд внутрішньої компоновки модульної котельні

Одним з важливих елементів роботи теплових систем є автоматичне регулювання. Сучасні системи оснащені різними датчиками температури, як внутрішньої, так і зовнішньої, що дозволяє системі працювати максимально ефективно. Датчики зовнішньої температури передають інформацію до контролера, який на основі отриманих даних регулює роботу котла та інших елементів системи. Це дозволяє автоматично змінювати інтенсивність роботи

системи залежно від змін зовнішньої температури або теплових втрат, які можуть змінюватися через різні умови.

Наприклад, якщо зовнішня температура підвищується, система автоматично знижує подачу тепла, щоб уникнути перегріву приміщень і зменшити споживання енергії. Якщо ж температура падає, система навпаки підвищує продуктивність, щоб компенсувати збільшені тепловтрати через стіни, вікна або дах будівлі. Це дозволяє досягти високого рівня енергоефективності, адже теплові системи не працюють на повну потужність постійно, а лише тоді, коли це необхідно.

Ще одним важливим елементом теплових систем є системи розподілу тепла, такі як трубопроводи і радіатори. Важливо, щоб тепло розподілялося рівномірно по всіх приміщеннях. У випадку, коли система налаштована неправильно або має технічні несправності, можуть виникати ситуації, коли одні приміщення перегріваються, тоді як в інших відчувається холод. Це не лише знижує комфорт для мешканців, але й призводить до неефективного використання енергії.

Значну роль у сучасних теплових системах відіграють автоматизовані системи керування, що дозволяють знизити втрати енергії і підвищити рівень комфорту. Такі системи контролюють не лише подачу тепла до окремих зон, але й стежать за загальними параметрами системи, такими як тиск в трубопроводах, стан теплоносія, витрати енергії та інші показники. Інтелектуальні системи можуть враховувати навіть прогнози погоди для того, щоб заздалегідь підготувати систему до можливих змін кліматичних умов.

Таким чином, принцип роботи теплових систем полягає в ефективному перетворенні енергії і забезпеченні рівномірного розподілу тепла по приміщеннях.

1.2 Типи котлів та їх класифікація

Котли є основним елементом будь-якої теплової системи, оскільки вони забезпечують процес генерації тепла для опалення приміщень та гарячого водопостачання. Типи котлів та їх класифікація залежать від різних факторів, таких як вид палива, конструкційні особливості, принцип роботи та застосування в різних умовах. У сучасних системах опалення використовується широкий спектр котлів, кожен з яких має свої переваги і недоліки залежно від вимог до системи і умов експлуатації. Котли умовно можна розділити на дві основні групи – це парові та водогрійні.



Рис.1.2 Зовнішній вигляд модульної котельні на твердому паливі

Водогрійні – нагрівають воду, парові – виробляють насичену технологічну пару.

Водогрійні котли бувають як малої так і великої потужності, можуть працювати на різних видах палива: тверде паливо (дрова, щепи, пелети), газ та рідке паливо.

Водогрійні котли малої потужності (25-100кВт) – це котли більш побутового рівня, для наших з вами осель, в залежності від квадратури, наприклад, для котеджу чи готелю 1000 м² потрібен котел потужністю 100 кВт, якщо приміщення 300 м² то достатньо буде котла на 25кВт.

Парові котли виробляють насичену пару тиском вище атмосферного (від 0,07 МПа, та температурою від $t = 115$ °С).

Незалежно від модифікації, промисловий паровий котел призначений для отримання пари високої температури. При цьому тиск води, що знаходиться в газоподібному стані всередині котла, завжди перевищує атмосферний.

Одним з основних критеріїв класифікації котлів є вид палива, яке використовується для генерації тепла. Залежно від цього, котли поділяють на такі типи:

Табл 1.1

- | |
|---|
| <p>1. Газові котли – працюють на природному або зрідженому газі. Це найбільш поширений тип котлів у побутових і комерційних системах опалення, оскільки газ є доступним і відносно недорогим паливом. Газові котли можуть бути атмосферними або конденсаційними. Атмосферні котли використовують для спалювання газу повітря з приміщення, тоді як конденсаційні котли мають вищу ефективність за рахунок використання тепла, що виділяється при конденсації водяної пари в продуктах згоряння.</p> |
| <p>2. Твердопаливні котли – працюють на дровах, вугіллі, пелетах або інших видах твердого палива. Такі котли часто використовуються в регіонах, де немає доступу до природного газу або де є дешеве тверде паливо. Вони можуть бути автоматичними (пелетні котли з автоматичною подачею палива) або ручними (класичні котли на дровах). Твердопаливні котли мають переваги в умовах автономного опалення, проте потребують регулярного обслуговування, такого як завантаження палива та очищення від золи.</p> |

3. Рідкопаливні котли – використовують дизельне паливо або мазут. Це менш поширений тип котлів у порівнянні з газовими, але вони можуть бути необхідними в тих випадках, коли газопостачання неможливе або економічно не вигідне. Рідкопаливні котли мають високу потужність і використовуються, як правило, в промислових або великих комерційних об'єктах. Основним недоліком таких котлів є висока вартість палива та підвищені вимоги до зберігання і безпеки експлуатації.

4. Електричні котли – використовують електричну енергію для нагрівання теплоносія. Вони є екологічно чистими і безпечними, оскільки не виробляють викидів продуктів згоряння. Електричні котли підходять для невеликих приміщень або як резервні джерела тепла в системах з іншими видами котлів. Основний недолік електричних котлів – висока вартість електроенергії, що робить їх менш привабливими для тривалого використання в якості основного джерела тепла.

5. Комбіновані котли – це котли, які можуть працювати на різних видах палива, наприклад, газ/тверде паливо або газ/дизель. Такі котли забезпечують гнучкість і дозволяють використовувати найоптимальніший вид палива залежно від наявності або вартості ресурсів. Вони часто застосовуються в умовах нестабільного газопостачання або в регіонах, де доступ до різних видів палива є сезонним.

1.3 Модульні котельні установки

1.3.1 Особливості модульних котелень

Модульні котельні є одними з найбільш універсальних та сучасних рішень для організації систем тепlopостачання, які отримали значну популярність завдяки своїй ефективності, гнучкості в експлуатації та зручності монтажу. Вони являють собою компактні, заздалегідь зібрані блоки котельного обладнання, які можуть працювати як автономно, так і в складі більших тепlopостачальних комплексів. Основною особливістю модульних котелень є їхня можливість масштабування та швидкої адаптації до конкретних умов роботи, що робить їх ідеальним вибором для широкого спектру об'єктів — від житлових будинків до промислових підприємств.



Рис.1.3 Зовнішній вигляд модульної котельні

Модульна котельня зазвичай складається з одного або кількох теплоенергетичних модулів, кожен з яких оснащений котельним обладнанням, допоміжними системами управління та контролю, і всіма необхідними інженерними комунікаціями. Завдяки цьому модульні котельні можна легко доставити на об'єкт, де вони збираються і підключаються до існуючої системи

теплопостачання. Такий підхід значно скорочує час монтажу, порівняно з будівництвом традиційної котельні, що потребує складних проектних робіт та тривалого будівельного процесу.

Однією з головних переваг модульних котелень є їхня мобільність та можливість швидкого перенесення з одного місця на інше. Це робить такі системи надзвичайно привабливими для тимчасових об'єктів, таких як будівельні майданчики або виробничі площі, що можуть потребувати теплопостачання лише на обмежений час. Після завершення робіт модульну котельню можна демонтувати та перенести на інший об'єкт, що забезпечує високу економічну ефективність і зменшує потребу в будівництві постійних теплових станцій.

Ще одна важлива особливість модульних котелень — їх гнучкість у виборі обладнання. В залежності від потреб замовника, такі котельні можуть оснащуватися різними типами котлів: газовими, твердопаливними, рідкопаливними або навіть електричними. Це дозволяє враховувати різні джерела енергії та специфіку опалювальних об'єктів. Наприклад, у регіонах з доступом до газу найдоцільніше використовувати газові модульні котельні, тоді як у віддалених або автономних зонах, де немає газопостачання, доцільно встановлювати твердопаливні або комбіновані котли.

Модульні котельні також відрізняються високою енергоефективністю завдяки використанню сучасних технологій регулювання і управління процесом виробництва тепла. Вони оснащуються автоматизованими системами керування, що дозволяють точно контролювати температурні режими та ефективно розподіляти теплову енергію залежно від змінних потреб споживачів. Система автоматизації забезпечує не лише безперервний моніторинг параметрів роботи котлів, але й їхнє адаптивне регулювання у відповідь на зміну зовнішніх або внутрішніх умов. Це дозволяє значно знизити витрати на паливо та мінімізувати втрати енергії, забезпечуючи високу економічну ефективність всієї теплової системи.

Крім цього, модульні котельні мають високий рівень надійності завдяки розподілу навантаження між кількома котлами. У випадку виходу з ладу одного з модулів інші продовжують працювати, що гарантує безперебійне постачання тепла. Такий підхід не лише підвищує надійність системи в цілому, але й зменшує ризик повної зупинки роботи котельні. Для великих об'єктів це є критично важливим фактором, оскільки навіть короткочасне припинення теплопостачання може призвести до серйозних наслідків для комфорту та безпеки.

Модульні котельні часто використовуються в умовах, коли потрібно забезпечити поступове нарощування потужностей теплопостачання. Це досягається шляхом додавання додаткових модулів у разі збільшення потреб у теплі або при розширенні об'єкта. Завдяки цьому такі котельні мають високу гнучкість у плануванні й можуть бути оптимізовані відповідно до поточних вимог. Наприклад, при будівництві нового житлового комплексу спочатку може бути встановлена котельня з мінімальним набором модулів, які згодом можуть бути доповнені новими блоками в міру заселення будівлі.

Окрім цього, модульні котельні мають компактні розміри, що дозволяє економити простір на об'єкті. Вони можуть бути встановлені як у внутрішніх приміщеннях, так і на відкритих майданчиках, що надає додаткову гнучкість в плануванні інфраструктури. У випадках, коли необхідно зберегти естетику території або уникнути будівництва великих котельень, модульні рішення стають ідеальним варіантом. Завдяки компактним розмірам та легкості монтажу модулі можуть бути розміщені навіть у складних умовах, де немає можливості будувати традиційні котельні.

Таким чином, модульні котельні мають безліч переваг, таких як мобільність, гнучкість в експлуатації, енергоефективність та надійність. Вони є ідеальним рішенням для об'єктів з різними потребами в теплопостачанні, де необхідно забезпечити швидке, надійне і економічне постачання теплової енергії.

1.3.2 Переваги та недоліки модульних котелень

Модульні котельні стають все більш популярними завдяки своїм численним перевагам, які роблять їх привабливими для використання у різних сферах — від приватних будинків до великих промислових об'єктів. Однак, поряд із перевагами, існують і певні недоліки, які слід враховувати при виборі такого рішення для організації системи тепlopостачання.

Табл.1.2

Переваги модульних котелень:
1. Швидкість монтажу та введення в експлуатацію
Однією з головних переваг модульних котелень є їхня швидка установка та введення в експлуатацію. Оскільки всі основні компоненти котельні попередньо зібрані на виробництві, їх потрібно лише доставити на об'єкт і підключити до існуючих інженерних мереж. Це значно скорочує час монтажу порівняно з традиційними котельнями, які потребують тривалих будівельних робіт і складання на місці. Для об'єктів, де важлива оперативність запуску системи тепlopостачання, це є надзвичайно вагомою перевагою.
2. Мобільність та гнучкість використання
Модульні котельні легко демонтуються та можуть бути переміщені на інший об'єкт без значних втрат ресурсів. Це робить їх ідеальним рішенням для тимчасових або змінних об'єктів, таких як будівельні майданчики, мобільні виробничі об'єкти або військові бази. Крім того, модульна конструкція дозволяє легко збільшувати або зменшувати потужність котельні залежно від поточних потреб, додаючи або відключаючи окремі модулі. Це забезпечує високу гнучкість системи та можливість адаптації до змінних умов експлуатації.

3. Енергоефективність та автоматизація
<p>Сучасні модульні котельні оснащені передовими системами автоматизації, що дозволяє ефективно керувати процесом виробництва тепла. Автоматизовані системи керування контролюють параметри роботи котлів, оптимізують використання палива та мінімізують теплові втрати. Це підвищує загальну ефективність котельні, знижуючи витрати на паливо та обслуговування. Крім того, багато модульних котелень підтримують дистанційне управління та моніторинг, що дозволяє здійснювати контроль за роботою котлів навіть на віддалених об'єктах.</p>
4. Висока надійність та безперебійність роботи
<p>Модульні котельні забезпечують високу надійність роботи завдяки можливості розподілу навантаження між кількома котлами. Якщо один з модулів виходить з ладу, інші продовжують працювати, забезпечуючи безперервне теплопостачання. Це особливо важливо для великих об'єктів, де навіть короткочасне припинення подачі тепла може спричинити значні збитки або дискомфорт для користувачів. Така особливість модульних котелень робить їх надзвичайно надійними і стійкими до несправностей.</p>
5. Компактність та економія простору
<p>Модульні котельні мають компактні розміри і не потребують великої площі для установки. Вони можуть бути розміщені як на відкритому майданчику, так і в невеликих технічних приміщеннях. Це особливо важливо в умовах обмеженого простору на об'єкті, де немає можливості будувати великі котельні або інші теплові станції. Компактність і легкість у встановленні дозволяють використовувати модульні котельні в урбаністичних умовах або в обмежених територіях промислових об'єктів.</p>

Недоліки модульних котелень:**1. Висока початкова вартість**

Незважаючи на численні переваги, модульні котельні часто мають вищу початкову вартість у порівнянні з традиційними стаціонарними котельнями. Це пов'язано з використанням передових технологій, високоякісних матеріалів та автоматизованих систем керування. Для невеликих об'єктів або в умовах обмеженого бюджету така висока початкова вартість може стати стримуючим фактором для вибору модульної котельні. Проте в довгостроковій перспективі ця інвестиція може окупитися за рахунок зниження експлуатаційних витрат та економії на паливі.

2. Обмеження потужності

Модульні котельні, як правило, мають певні обмеження щодо максимальної потужності. Для об'єктів з дуже великими потребами в теплі модульні рішення можуть бути недостатніми, що вимагатиме додаткового проектування або встановлення більш потужних традиційних котелень. Це особливо стосується промислових підприємств або великих комерційних комплексів, де потреби в теплопостачанні значно перевищують можливості стандартних модульних котелень.

3. Залежність від зовнішніх умов

Модульні котельні, встановлені на відкритих майданчиках, можуть бути чутливими до погодних умов. Хоча вони зазвичай проектуються з урахуванням можливості роботи в різних кліматичних умовах, екстремальні температури, висока вологість або снігові навантаження можуть негативно впливати на їхню ефективність та довговічність. Це може вимагати додаткових заходів для захисту котельні, таких як спеціальні укриття або утеплення, що підвищує загальні витрати на експлуатацію.

4. Необхідність регулярного технічного обслуговування

Модульні котельні, як і будь-яке інше котельне обладнання, потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення їхньої безперебійної роботи. Незважаючи на високу автоматизацію, деякі процеси все ж потребують втручання оператора. Для збереження ефективності котельні необхідно періодично проводити огляди, очищення та заміну зношених частин, що може бути додатковим тягарем для невеликих об'єктів з обмеженими ресурсами.

1.4 Роль автоматизації в теплових системах

Автоматизація котельної установки може вирішувати різні завдання залежно від її конкретного призначення та потреб користувачів. Основні завдання, які можуть бути вирішені завдяки автоматизації котельної установки, включають:

Табл 1.4

<p>1. Забезпечення оптимальної роботи котельної установки з максимальною ефективністю. Автоматизація котельної установки дозволяє відслідковувати та контролювати різні параметри, такі як температура повітря, температура води, тиск, рівень палива тощо, що дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи котельної установки та мінімізувати витрати на енергію.</p>
<p>2. Підтримка оптимального кліматичного режиму у приміщенні. Завдяки автоматичному контролю температури в приміщенні, система опалення може автоматично регулювати роботу котла, щоб забезпечити оптимальний кліматичний режим у приміщенні, що забезпечує комфорт користувачів та економію енергії.</p>
<p>3. Моніторинг та діагностика стану котельної установки. Автоматизовані системи дозволяють відслідковувати стан різних компонентів котельної установки, таких як тиск, температура, витрати палива тощо, та вчасно виявляти можливі несправності та необхідність їх ремонту або заміни.</p>
<p>4. Забезпечення безпеки в роботі котельної установки. Автоматизація дозволяє контролювати роботу котла та інших компонентів котельної установки, що забезпечує безпеку користувачів та запобігає можливим аваріям.</p>

Автоматика котельні забезпечує високу безпеку. Обов'язковою вимогою при будівництві будь якої котельні є наявність в неї системи автоматики

безпеки. Перевищення концентрації чадного газу або витік газу може стати фатальним для персоналу і для котельні в цілому. Тому, для своєчасного визначення таких проблем встановлюються автоматичні системи з датчиками, виконуючими механізмами (для відключення/перекривання) та пристроями звуко- і світло- сповіщення.

Збільшення ефективності роботи системи – це, по суті, зниження витрат на об’єкті. Зниження витрат палива, зниження експлуатаційних витрат, зменшення витрат на обслуговуючий персонал. Без використання сучасних інструментів автоматизації результату не досягнути.

Керування котельні або технологічним процесом виконується персоналом котельні або цеху за допомогою щитів керування, які, як правило, розташовуються безпосередньо у приміщенні котельні. Найбільш затребувані операції у котельні – це зміна температури теплоносія для різних контурів системи опалення. Також персоналом виконується коригування тиску пари (для парової котельні). У сучасних щитах керування такі операції виконуються на інтерактивному меню через інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс. Оператор може:

Табл 1.5

<i>змінити температуру на виході котельної установки,</i>	<i>ввімкнути або вимкнути насоси,</i>	<i>відкоригувати температуру у змішувальних клапанах (для різних контурів).</i>
---	---------------------------------------	---

2. Технології та алгоритми регулювання теплоспоживання

Технології та алгоритми регулювання теплоспоживання відіграють ключову роль у сучасних системах теплопостачання, зокрема в контексті автоматизованих та адаптивних систем керування тепловою потужністю. Вони забезпечують можливість ефективного використання енергоресурсів, підвищують комфорт для кінцевих споживачів та мінімізують втрати тепла. Розвиток таких технологій пов'язаний із потребою в енергоощадних рішеннях та високій варіативності умов експлуатації теплових систем. Сучасні алгоритми дозволяють не тільки регулювати потужність котлів, але й прогнозувати зміни теплоспоживання, що робить їх надзвичайно важливими для модульних котелень.

Основним завданням систем регулювання теплоспоживання є підтримання оптимальних параметрів температури в системах опалення, що дозволяє забезпечити споживачам комфортні умови і водночас мінімізувати витрати енергії. Одним із ключових принципів є автоматичне регулювання температури теплоносія відповідно до температури зовнішнього повітря. Сучасні системи використовують методи компенсації температури, що дозволяє котельням автоматично знижувати температуру теплоносія при підвищенні температури навколишнього середовища, і навпаки, збільшувати її під час похолодання. Такі підходи суттєво підвищують енергоефективність систем і знижують витрати на паливо, особливо в умовах змінних кліматичних умов.

2.1 Адаптивне керування тепловою потужністю

Адаптивне керування тепловою потужністю — це сучасний підхід до керування тепловими системами, який дозволяє автоматично налаштовувати параметри роботи котельні залежно від змінних умов споживання тепла. Його основною метою є забезпечення максимальної ефективності використання енергії, мінімізація витрат на паливо та забезпечення стабільної роботи системи навіть за умов змінного навантаження.

Основні принципи адаптивного керування

- Аналіз поточних умов

Адаптивне керування базується на постійному моніторингу параметрів системи теплопостачання та навколишнього середовища. Система аналізує такі показники, як зовнішня температура, поточне теплове навантаження, кількість активних споживачів та їх теплові потреби. Ці дані використовуються для динамічної оцінки того, скільки тепла необхідно виробити в поточний момент часу.

- Регулювання роботи котлів

На основі аналізу вхідних даних система автоматично регулює роботу котлів. Наприклад, коли температура зовнішнього повітря підвищується, адаптивне керування може зменшити потужність котлів, щоб уникнути перегріву приміщень і непотрібних витрат на паливо. Якщо ж навантаження зростає (наприклад, збільшується кількість активних споживачів), система підвищує потужність, щоб забезпечити необхідний рівень теплопостачання.

- Використання прогнозів

Адаптивні системи можуть враховувати прогнози зовнішньої температури або теплового навантаження для попереднього налаштування роботи котельні. Це дозволяє оптимізувати виробництво тепла з урахуванням очікуваних змін в умовах експлуатації, що підвищує загальну ефективність системи. Наприклад, якщо очікується різке похолодання, система може підготуватися до збільшення теплового навантаження заздалегідь, що знижує ризик дискомфорту для споживачів.

2.1.1 Адаптивні системи керування

Вирішення проблеми енергозбереження у сфері житлово-комунального господарства полягає в розробці та впровадженні високоякісних систем автоматизованого управління опаленням та теплозабезпеченням будівель. Це пояснюється тим, що автоматизація дозволяє економити тепло завдяки врахуванню (зазвичай опосередкованому) факторів, облік яких методами проектних розрахунків або неможливий, або доволі складний: вплив сонячної радіації, тепловиділення від обладнання та людей, надлишкова потужність системи опалення при певній зовнішній температурі, оперативний облік коливань температури зовнішнього повітря, швидкості та напрямку вітру, а також інші зовнішні збурення; хаотичність режиму роботи вентиляційних систем тощо.

Одним із найбільш ефективних підходів є створення адаптивних систем управління тепловим режимом будівель, програмне забезпечення яких враховує як реальні теплозахисні властивості будівлі, так і фактичні теплотехнічні характеристики її системи опалення (рис.2.1).

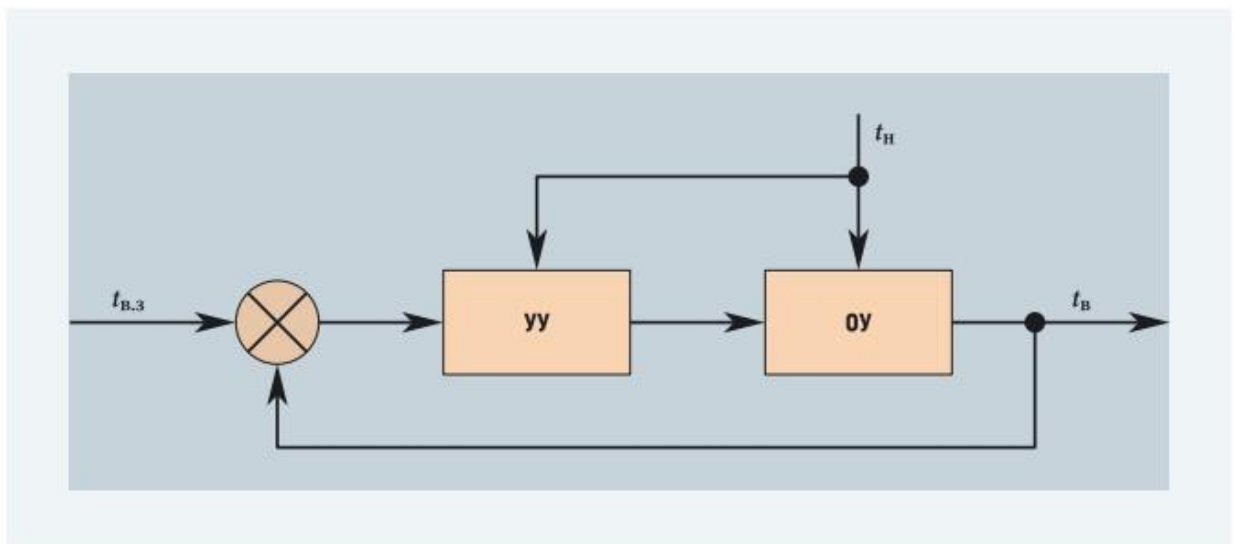


Рис.2.1 Структурна схема системи управління ($t_{в.з}$, $t_{в}$ – задане і фактичне значення температури внутрішнього повітря, $t_{н}$ – температура навколишнього повітря, уу-управління, оу- об'єкт управління)

Раціональний принцип управління тепловим режимом будівлі полягає у використанні комбінованого підходу, коли у систему включається канал компенсації основного збурення (температури зовнішнього повітря) та одночасно застосовується зворотний зв'язок щодо температури повітря у так званих "репрезентативних приміщеннях" будівлі (рис.2.1).

Завдяки зворотному зв'язку компенсуються збурення теплового режиму, такі як тепло надходження від людей, обладнання, сонячної радіації, збільшення втрат тепла через вітер, а також усі похибки реалізації каналу компенсації основного збурення — зовнішньої температури. Однак відомо, що швидкодія контуру зворотного зв'язку помітно нижча, ніж у каналу компенсації.

Ефективність застосування принципу компенсації значною мірою залежить від точності моделі, що відображає вплив збурень на вихідну величину об'єкта управління, тобто від характеристик каналу "зовнішня температура — регульована температура". Також відомо, що ці характеристики можуть змінюватися, наприклад, через старіння будівлі та її системи опалення або накопичення вологи в огорожувальних конструкціях.

З огляду на це, для побудови високоякісної системи управління необхідно своєчасно відстежувати зміни цих характеристик, вирішуючи завдання ідентифікації моделі каналу. Наразі на практиці застосовуються системи управління, що виконують тільки компенсацію основного збурення — температури зовнішнього повітря, які називаються погодними регуляторами температури (погодними компенсаторами).

Зворотний зв'язок за температурою внутрішнього повітря в таких системах часто не використовується, через проблеми, пов'язані з вимірюванням цієї величини. У зв'язку з цим пропонуються системи управління за температурою фізичної моделі будівлі, що нібито дозволяє отримати інформацію про внутрішню температуру простішим способом.

Завдання погодним регуляторам температури теплоносія, що подається до системи опалення, обчислюється або за відомою кривою Є. Я. Соколова, або за кривою, визначеною замовником, залежно від температури зовнішнього повітря.

Представляючи тепловтрати будівлі рівнянням Н. С. Єрмолаєва, а потужність системи опалення відомою моделлю, та використовуючи рівняння теплового балансу, можна показати, що алгоритм компенсації основного обурення температурного режиму будівель (температури зовнішнього повітря) матиме такий вигляд:

$$t_{co} = t_{в.з} \left[1 + q_B V \left(\frac{0,5}{c G_{co}} + \frac{1}{(kF)_{co}} \right) \right] - t_n q_B V \left(\frac{0,5}{c G_{co}} + \frac{1}{(kF)_{co}} \right), \quad (2.1)$$

де t_{co} і G_{co} - температура та масова витрата води на вході системи опалення, відповідно; $(kF)_{co}$ — параметр, що підлягає визначенню при ідентифікації моделі системи опалення та являє собою добуток коефіцієнта теплопередачі k на площу поверхні теплообміну F для всієї системи опалення (всю систему представляємо еквівалентним опалювальним приладом); c - питома теплоємність теплоносія; q_B - питома тепла характеристика будівлі; V – його обсяг.

Вибір t_{co} як керована змінна обумовлений тим, що алгоритм компенсації, представлений у такому вигляді, може бути застосований як за наявності автономної системи тепlopостачання будівлі, так і при централізованому тепlopостачанні. В останньому випадку на індивідуальному тепловому пункті (ІТП) будівлі повинен бути встановлений регульований вузол змішування, що дозволяє домагатися необхідного значення t_{co} , або застосована незалежна схема підключення до теплових мереж з відповідною системою управління.

Оскільки у кожної опалювальної будівлі проблемні параметри q_B і $(kF)_{co}$ мають свої власні значення і змінюються вони теж лише індивідуальним чином, то алгоритм може і повинен бути реалізований тільки на ІТП об'єкта управління, причому для його налаштування на «реальний процес» необхідна розробка процедур оцінки q_B та $(kF)_{co}$ за експериментальними даними.

Розроблено та апробовано за експериментальними даними алгоритм спільної оцінки параметрів $(kF)_{co}$ і q_B , при цьому при розробці останнього алгоритму рівняння представлялося у вигляді загальновідомого лінійного співвідношення $y = a + bx$, в якому використовувалися такі позначення:

$$y = \frac{t_{co} - t_B}{t_B - t_H}; x = \frac{1}{G_{co}};$$

$$a = q_B V \frac{1}{(kF)_{co}}; b = q_B V \frac{0,5}{c}.$$
(2.2)

Адаптивний та неадаптивний алгоритми ідентифікації параметрів такої залежності досить добре відомі фахівцям та їх реалізації не викликає будь-яких труднощів. Після того, як значення a і b встановлені, значення параметрів, що шукаються, визначаються за співвідношенням:

$$q_B = \frac{bc}{0,5V}; (kF)_{co} = \frac{q_B V}{a}.$$
(2.3)

Якість апроксимації експериментальних даних для y та x , представлена в роботі, залежністю $y = a + bx$ ілюструється на рис. 2.2.

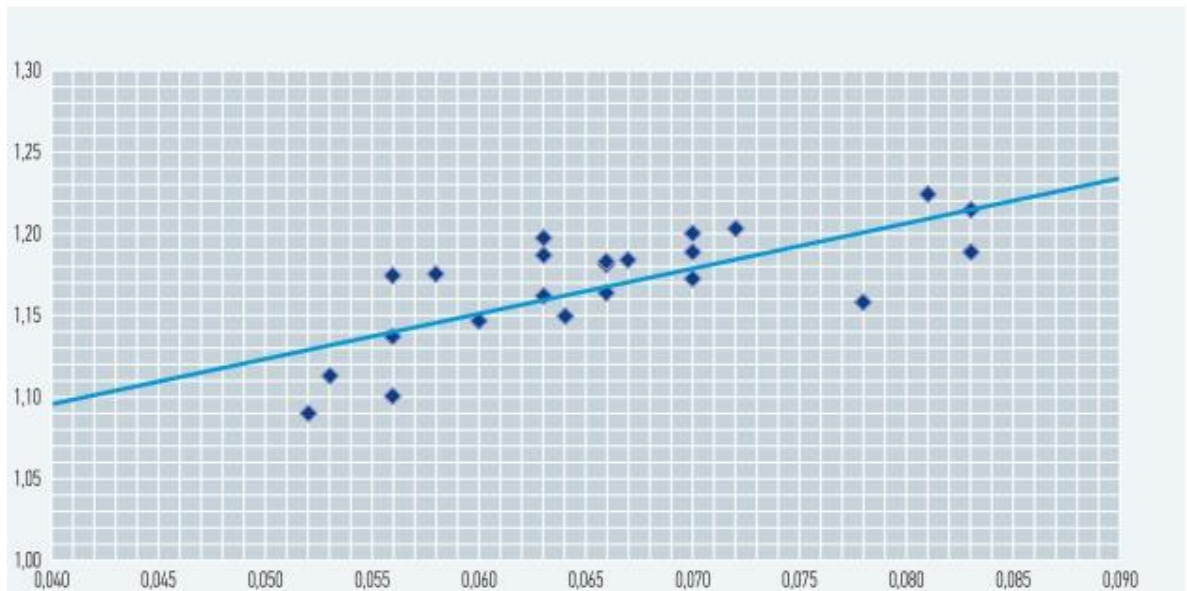


Рис.2.2 Апроксимація експериментальних даних

Як видно, точність апроксимації є цілком задовільною. Середня квадратична похибка апроксимації експериментальних даних для y у цьому випадку становила 0,0225 умовних одиниць, а коефіцієнт кореляції R_{yx} , що оцінює тісноту лінійного зв'язку між y і x , дорівнював $R_{yx} = 0,727$. Алгоритм, налаштований за експериментальними даними для одного з п'ятиповерхових будинків серії 1-464Д-105, мав такий вигляд:

$$t_{co} = t_{в.з} + 50413,76 \times \left(\frac{0,5}{cG_{co}} + \frac{1}{63381,27} \right) (t_{в.з} - t_n). \quad (2.4)$$

У даному виразі витрата теплоносія слід підставляти в [т/год]. За допомогою даного виразу обчислили, якою повинна бути температура теплоносія на вході системи опалення для того, щоб температура повітря всередині контрольних приміщень при витраті G_{co} , що мала місце, дорівнювала 21 °С. Графіки розрахованої кривою і тією кривою, яка мала місце у реальних умовах, наведено на рис. 2.3.

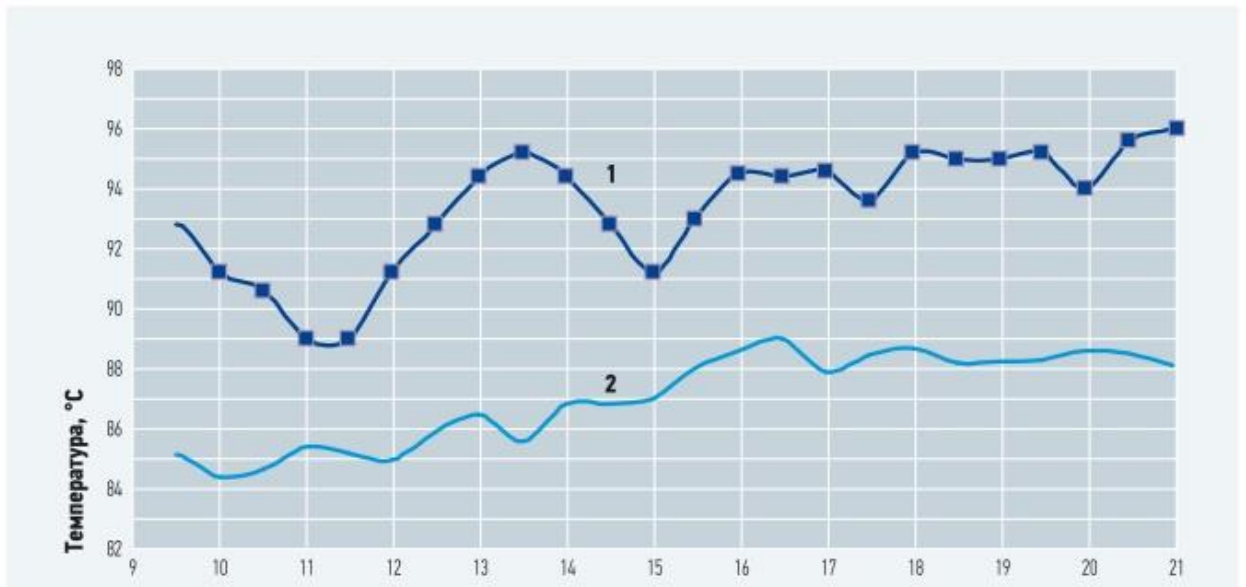


Рис.2.3 Зміна температури теплоносія

На рис. 2.3 крива 1 вказує фактичну температуру теплоносія на вході системи опалення, а крива 2 — температуру теплоносія, достатню для виконання умови $t_{в.з} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$ при тій його витраті, яка мала місце в реальних умовах. В реальних умовах температура внутрішнього повітря контрольних приміщень даної будівлі (система опалення даної будівлі не автоматизована) змінювалася в діапазоні від 23 до 25 $^\circ\text{C}$.



Рис.2.4 Зміна витрати теплоносія

З рис. 2.3 видно, що необхідна за умовою $t_{в.з} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$ температура $t_{со}$ помітно нижче фактичної. На рис. 2.4 наведено графік фактичної витрати води на систему опалення $G_{со}$ (крива 1) та графік такої витрати теплоносія (крива 2), при якому за фактичного значення $t_{со}$ забезпечується температура $t_{в.з} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$. Як видно із рис. 4, необхідний за умовою $t_{в.з} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$ витрата води $G_{со}$ також помітно нижче фактичного, отже, застосування даного способу управління ТРЗ дозволить суттєво скоротити витрати теплоти на опалення.

Розроблено також структурну схему адаптивної системи управління тепловим режимом будівель, що реалізує комбінований принцип управління з налаштуванням погодного компенсатора за експлуатаційними даними. Схема системи представлена рис. 2.5. У блоці ідентифікації БІ визначаються реальні числові значення параметрів погодного компенсатора, що настраюються, а в блоці компенсації БК за поточною температурою зовнішнього повітря t_n і заданим значенням температури внутрішнього повітря $t_{в.з}$ формується сигнал компенсації відповідно до формули (2.1) — обчислюється задане значення температури води на вході опалювальної системи $t_{со.з}$.

Це значення відпрацьовується регулятором $t_{со}$, крім того, завдання цьому регулятору коригується також і регулятором температури внутрішнього повітря, що отримує сигнал зворотного зв'язку про фактичне значення $t_{в}$. На схемі, що представлена на рис. 2.5, передбачається регульований вузол змішування. Регулятор $t_{со}$ керує цим вузлом так, щоб фактична температура води на вході системи опалення дорівнювала заданому значенню, що обчислюється БК.

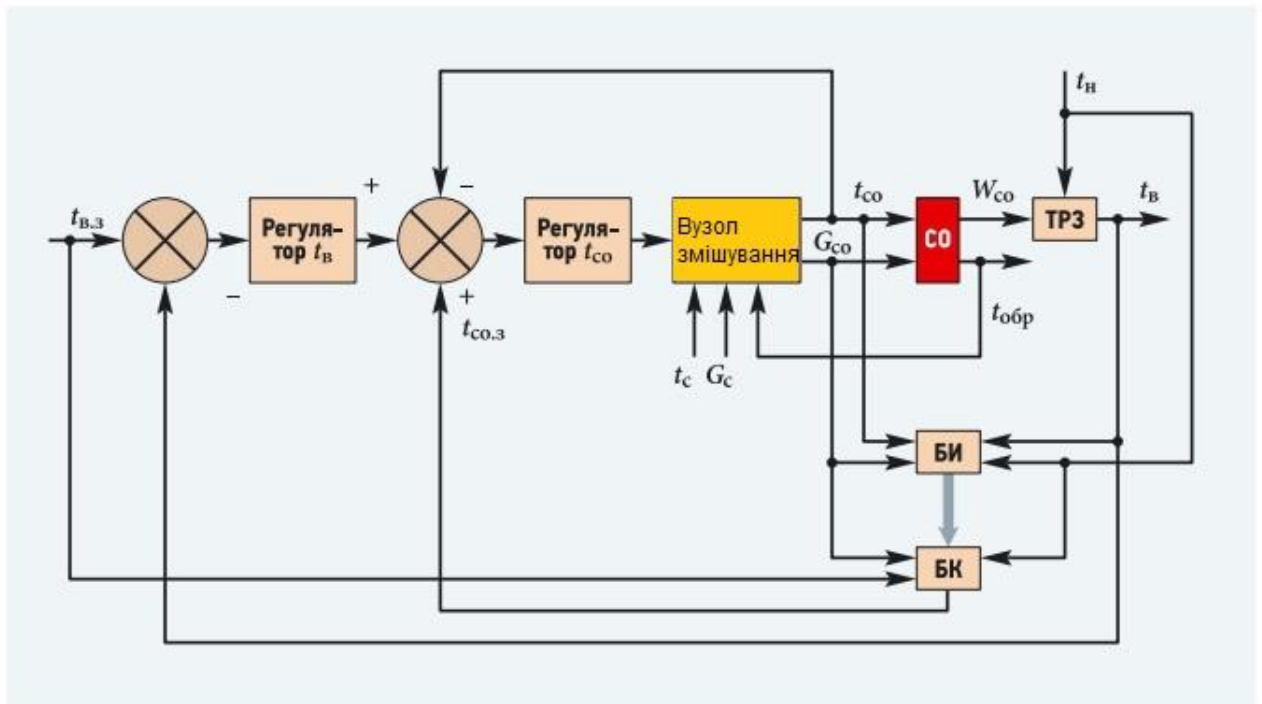


Рис.2.5 Структура адаптивної системи керування (ТРЗ – тепловий режим будівлі, СО – система опалення, БИ – блок ідентифікації, БК- блок компенсації)

Неважко бачити, що все вищевикладене придатне і для незалежної схеми приєднання систем опалення до теплових мереж. В цьому випадку регулятор $t_{со}$ підтримує на заданому БК рівні температури води на вході системи опалення, змінюючи витрату мережної води через первинний контур теплообмінника вузла приєднання. Отже, розроблено процедуру налаштування алгоритму компенсації основного збурення для температурного режиму будівель (температури зовнішнього повітря) на реальні теплотехнічні характеристики будівель та їх систем опалення.

Показано ефективність застосування цього алгоритму з метою енергозбереження. Розроблено структурну схему адаптивної системи управління, що реалізує комбінований принцип управління, і включає, зокрема, зазначений алгоритм та процедуру його налаштування на реальні теплотехнічні характеристики будівель та їх систем опалення.

2.2 Сучасні технології регулювання теплоспоживання

Основним завданням систем регулювання теплоспоживання є підтримання оптимальних параметрів температури в системах опалення, що дозволяє забезпечити споживачам комфортні умови і водночас мінімізувати витрати енергії. Одним із ключових принципів є автоматичне регулювання температури теплоносія відповідно до температури зовнішнього повітря. Сучасні системи використовують методи компенсації температури, що дозволяє котельням автоматично знижувати температуру теплоносія при підвищенні температури навколишнього середовища, і навпаки, збільшувати її під час похолодання. Такі підходи суттєво підвищують енергоефективність систем і знижують витрати на паливо, особливо в умовах змінних кліматичних умов.



Рис.2.6 Ескіз концепції: Оптимізація процесів систем теплогенерації

2.3 Хмарні платформи для регулювання теплоспоживання

Ключовою технологією, яка активно впроваджується у сучасні системи теплопостачання, є використання хмарних платформ для моніторингу та керування теплоспоживанням. На хмарні платформи покладаються великі надії у підвищенні ефективності теплоспоживання, особливо в системах, які потребують гнучкого та автоматизованого підходу до керування, таких як модульні котельні. Принцип роботи таких платформ базується на можливостях Інтернету речей (IoT) і машинного навчання, що дозволяє не лише віддалено контролювати параметри, але й прогнозувати потреби, адаптуючись до зміни умов у реальному часі.

Загальні принципи функціонування хмарних платформ для управління теплоспоживанням

1. *Моніторинг та управління параметрами:* Завдяки сенсорам, інтегрованим у котельні та інші об'єкти інфраструктури, платформи збирають дані про температуру, вологість, швидкість нагріву і охолодження, споживання енергії тощо. Ці дані зберігаються та обробляються на хмарних серверах, що дозволяє налаштовувати оптимальні параметри функціонування системи і приймати швидкі рішення.

2. *Прогнозування та адаптація до змінних умов:* Використання моделей машинного навчання та алгоритмів для прогнозування попиту на тепло залежно від часу доби, погоди, завантаження об'єктів тощо дозволяє не лише оптимізувати роботу системи, але й попередити нераціональні витрати ресурсів. Наприклад, хмарні платформи можуть регулювати роботу модульних котелень на основі історичних даних і короткострокових прогнозів.

3. *Енергозбереження і сталий розвиток:* Однією з важливих функцій хмарних платформ є підтримка сталого розвитку. Завдяки автоматизованому управлінню тепловими ресурсами та оптимізації їх використання, такі системи

дозволяють зменшити споживання енергії, знизити витрати і обмежити викиди CO₂, що позитивно впливає на екологію.

Переваги використання хмарних платформ для модульних котелень

- Гнучкість та масштабованість: Хмарні платформи дозволяють легко адаптуватися під конкретні потреби будівель або районів, що дуже зручно для систем опалення, які можуть потребувати різного рівня теплопостачання залежно від зовнішніх умов.
- Інтеграція з іншими системами: Хмарні платформи дають змогу об'єднувати різні системи контролю та управління, наприклад, з електричними мережами, щоб забезпечити оптимальну взаємодію між різними джерелами енергії.
- Зниження витрат на технічне обслуговування: Дистанційне керування та можливість автоматично діагностувати і попереджати технічні несправності допомагають значно зменшити витрати на обслуговування.

Виклики впровадження хмарних платформ

Незважаючи на очевидні переваги, є й виклики, зокрема безпека даних, забезпечення надійності та стабільності системи в умовах збільшення навантаження на інфраструктуру. Також важливою є інтеграція таких платформ у вже існуючі системи, що може потребувати додаткових ресурсів та технічної підтримки.

3. Практична частина

3.1 Практичне впровадження

Для практичного впровадження системи опалення можна розглянути використання хмарних технологій для збору та обробки даних з датчиків в реальному часі, що дозволить масштабувати рішення на будь-які об'єкти, де встановлені модульні котельні. Хмарна платформа також забезпечить можливість швидкого доступу до аналітичних даних для оптимізації роботи всіх елементів системи.

Для цього дослідження основними критеріями вибору програмного забезпечення були можливість імітувати моделі будівель і розраховувати споживання енергії, а також дозволяти вторинну обробку зовнішніх інтерфейсів. У цьому документі вибрано модель Energy Plus для використання системи IoT.

Створення системи Інтернету речей. На рисунку 3.1 показано систему IoT, яка є проміжною ланкою між апаратним забезпеченням нижнього рівня та програмним забезпеченням верхнього рівня, відіграючи роль контролю та передачі інформації. Вона підключається до різних датчиків і систем опалення котлів знизу та до хмарного сервера для симуляції Energy Plus зверху. Система IoT у цьому дослідженні має багато функцій, таких як збір даних, їхнє керування та інтелектуальне керування.

Функція збору даних. Незважаючи на велику кількість будівель, для керування та збору даних з кількох вузлів достатньо побудувати лише одну систему IoT. Кожен вузол збору може реалізувати точний збір даних про споживання енергії кожною частиною великої будівлі в реальному часі. Вузли надсилають зібрані дані про споживання енергії, номер вузла та інші інформаційні дані в систему IoT через Wi-Fi або Bluetooth.

Функція керування даними. Система IoT використовує TCP/IP та інші засоби через шлюз для завантаження даних на хмарний сервер IoT і

збереження їх у хмарній базі даних. Менеджери можуть отримати доступ до динамічної вебсторінки через веб-браузери у будь-який час та в будь-якому місці. Вони можуть переглядати інформацію, що зберігається в базі даних, у режимі реального часу та налаштовувати параметри вручну.

Система IoT також інтегрує такі функції, як системні журнали та сигнали про помилки, на додаток до трьох основних функцій, згаданих вище.

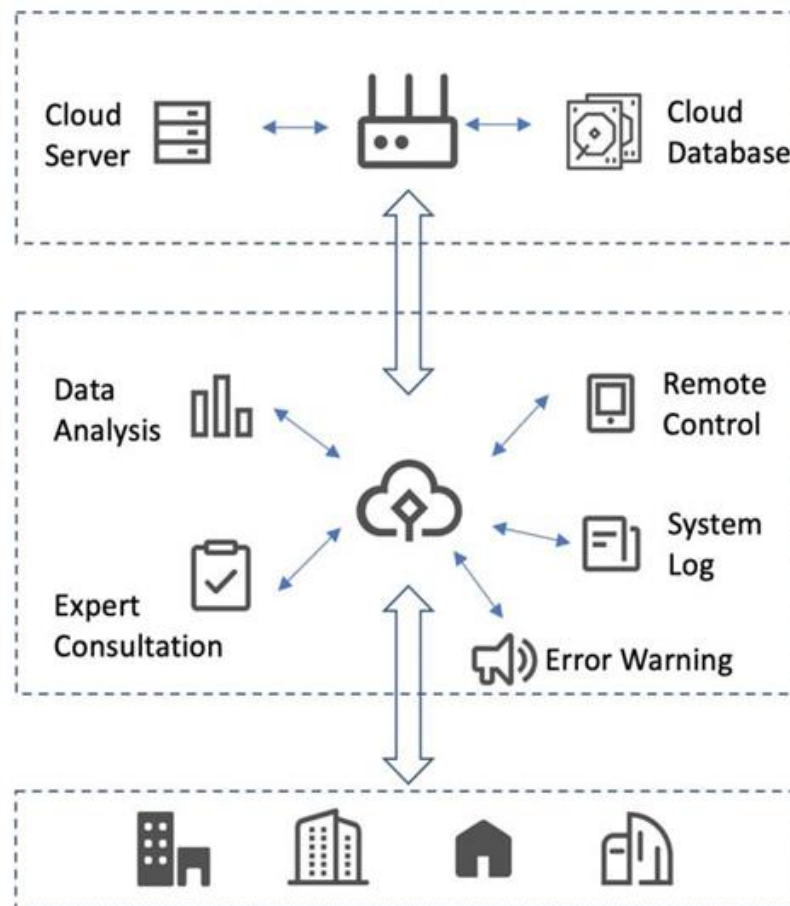


Рис.3.1 Структура системи IoT

3.1.1 Розробка інтерфейсу

На додаток до вищезазначених функцій, система IoT, запропонована в цій роботі, може забезпечити інтелектуальне керування, але для цього потрібно розробити інтерфейс. Система IoT може підключатися до Energy Plus через інтерфейс. Він може імітувати та оптимізувати загальне споживання енергії будівлю, а потім використовувати віддалену конфігурацію для налаштування системи котла з метою досягнення енергозбереження. На рисунку 3.2 показано інтерфейс, який використовується для координації системи IoT і Energy Plus на хмарному сервері.

Система IoT збирає в режимі реального часу зовнішню температуру та погодні умови, цільові параметри, робочий стан котла, зміни кількості людей у будинку й через інтерфейс перетворює ці дані на ті, які Energy Plus може розпізнавати та використовувати. Модель будівлі й параметри огороження повинні бути налаштовані заздалегідь.

Потім хмарний сервер запускає моделювання Energy Plus, результати якого показують навантаження та енергоспоживання реальної системи, а також відповідність між кімнатною температурою та температурою на виході з котла. Нарешті, хмарний сервер генерує та передає назад до системи IoT параметри котла, які можна розпізнати та використовувати для досягнення найбільш комфортної, енергоефективної та економічної роботи.

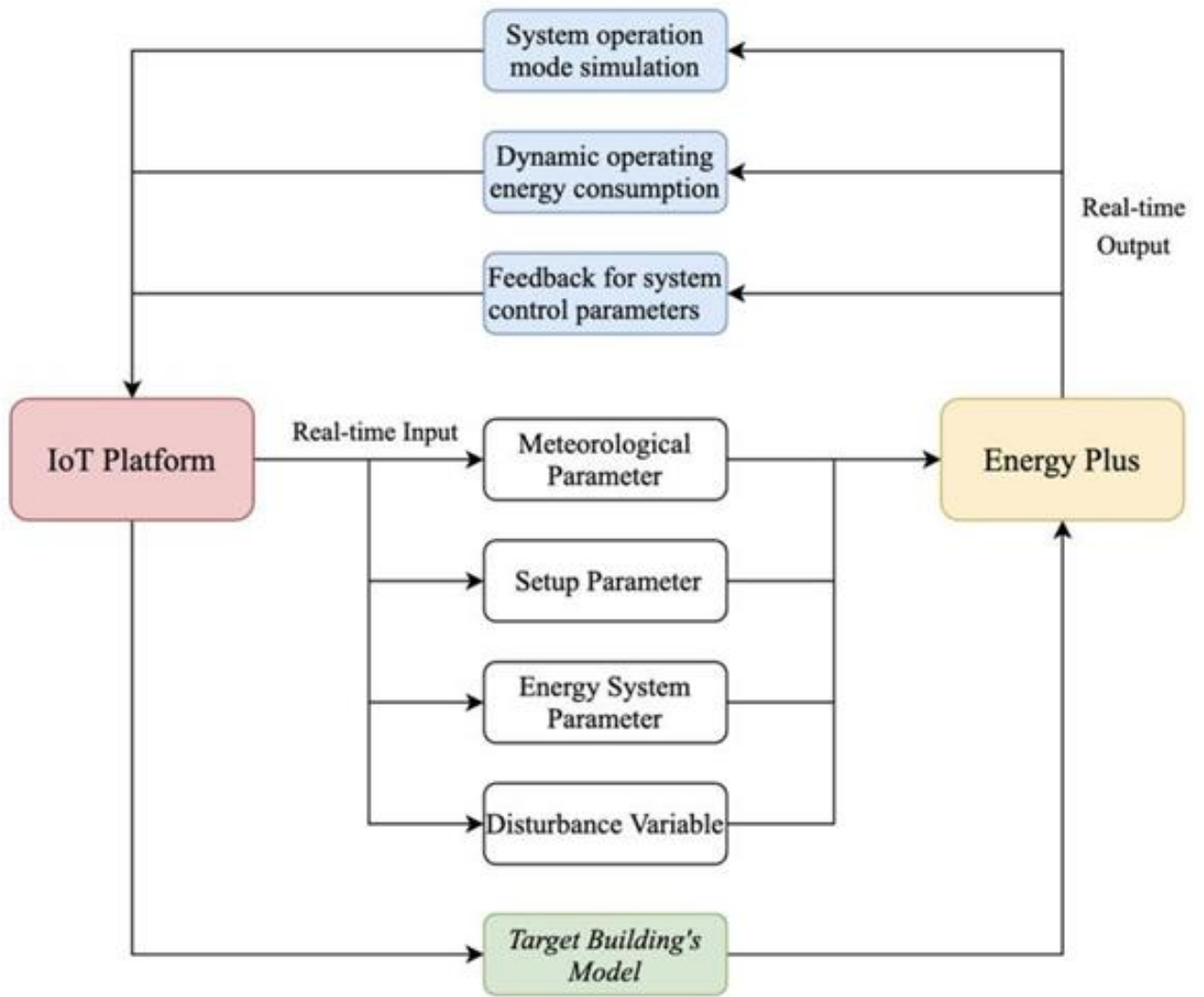


Рис. 3.2. Комбінація системи IoT і Energy Plus

3.1.2 Налаштування моделі будівлі

У цьому дослідженні типова будівля початкової школи в Києві використовується як об'єкт дослідження для перевірки продуктивності запропонованого оптимального методу керування. Зовнішні параметри взято з даних київського типового метеорологічного року. Геометрична модель будується за допомогою Design Builder, а потім імпортується в Energy Plus для розрахунку. Загальна площа забудови — 4072,84 м². Модель має п'ять поверхів і 14 теплових зон на кожному поверсі. Класні кімнати завдовжки 10 метрів і завширшки 6 метрів із співвідношенням вікон до стін 0,3 розташовані зліва та справа на кожному поверсі. Ширина коридору — 3 м. Будівля має 60 м у довжину та 15 м у ширину на кожному поверсі, як показано на рисунку 3.3.

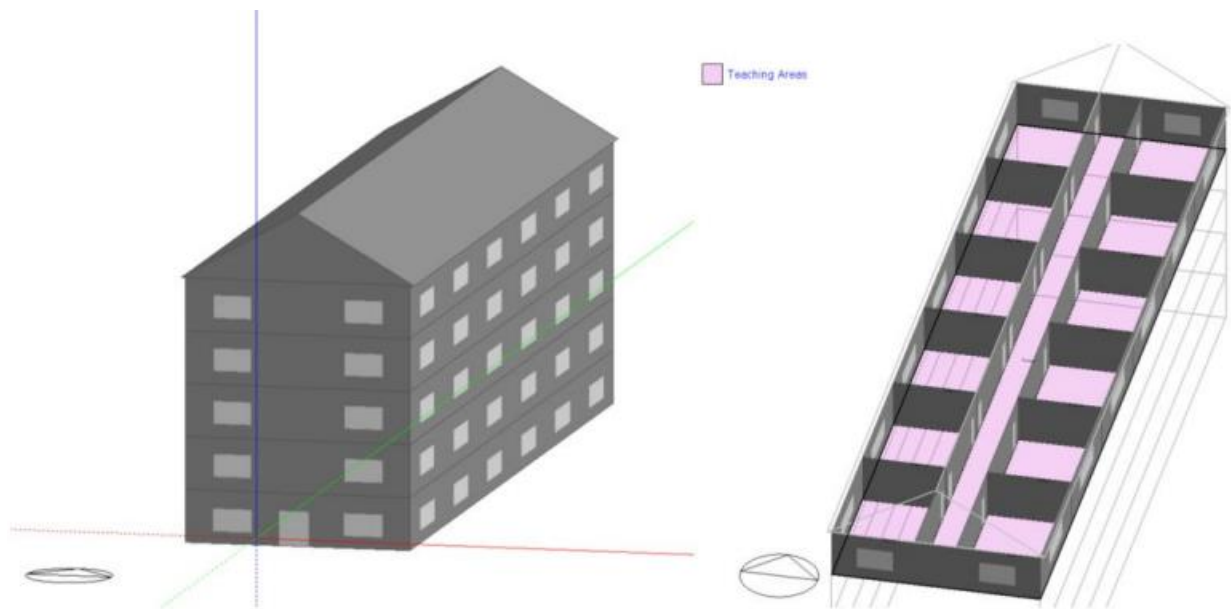


Рис.3.3 Створення моделі в Design Builder

Стандарт проектування котельних систем та сценаріїв для енергоефективності громадських будівель поділяє міста на регіони з сильним холодом, холодні регіони, регіони з жарким літом і холодною зимою, регіони з жарким літом і теплою зимою та регіони з помірним кліматом. Київ — холодний регіон, тому додаткове опалення слід розглядати взимку.

Порівняно з вугільними котлами, газові котли є більш ефективними та мають менше викидів забруднюючих речовин. У цьому дослідженні вибрано

створення самостійно побудованої системи опалення з газовим котлом і радіаційним теплообмінним нагрівачем у кінці системи. Річний опалювальний сезон визначається з 1 жовтня по 31 березня. Відповідно до норм, встановлена температура опалення взимку становить 20 °С.

Energy Plus моделює вплив на енергоспоживання будівлі за допомогою двох різних стратегій управління та відображає значення інтелектуального керування. Перевірений сценарій є базовим сценарієм, налаштованим у цьому документі. Перевірений сценарій А імітує ситуацію, коли IoT збирає зовнішні дані в режимі реального часу та використовує моделювання Energy Plus для точного контролю вихідної температури води, щоб вихідне тепло завжди відповідало фактичному тепловому навантаженню. Базовий сценарій В імітує звичайну модель роботи котла, де температура та швидкість потоку води на виході фіксуються після ввімкнення котла, а зовнішні умови не впливають на роботу котла. Обидва сценарії мають однакову зовнішню оболонку, однакову присутність персоналу та конкретні параметри системи опалення котла, наведені в таблиці 3.1.

Табл.3.1

Опалення радіаторів, ГВП, Природна вентиляція	Сценарій А	Сценарій В
Проектна температура на виході	Автоматичне керування	80°C
Різниця температур на звороті	10°C	10°C
Тип потоку	Постійний потік	Постійний потік
Тип теплоносія	Вода	Вода
Тип палива	Природний газ	Природний газ
Коефіцієнт розміру	1,00	1,00
Насос контуру подачі	Постійний потік	Постійний потік
Час доступності	7:00-18:00	7:00-18:00
Цільові температури	20°C	Відсутні

3.1.3 Результати тестування

Типові моделі класних кімнат за наведеними вище різними формами роботи котла встановлюються в Design Builder. Параметри його структури оболонки, метеорологічні параметри, погодинні параметри встановлюються відповідно. Нарешті, ми розраховуємо температуру на виході з котла, витрату води, загальне споживання газу в опалювальному сезоні та вартість газу.

3.1.4 Щоденний аналіз результатів

Взявши за основу дані зовнішньої температури за сухим термометром у Києві 24 січня 2020 року, найнижча температура дня становила $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а найвища $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час випробування температура води на виході та витрата води на виході реєструвалися кожну годину. Швидкість потоку води в обох сценаріях А і В становила $4,7\text{ кг/с}$. Температура за сценарієм А коливалася в межах $75\text{-}79\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура сценарію В фіксувалася на рівні $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, як показано на рисунку 3.4. Цей результат доводить ефективність нашої системи контролю та закладає основу для подальшого аналізу.

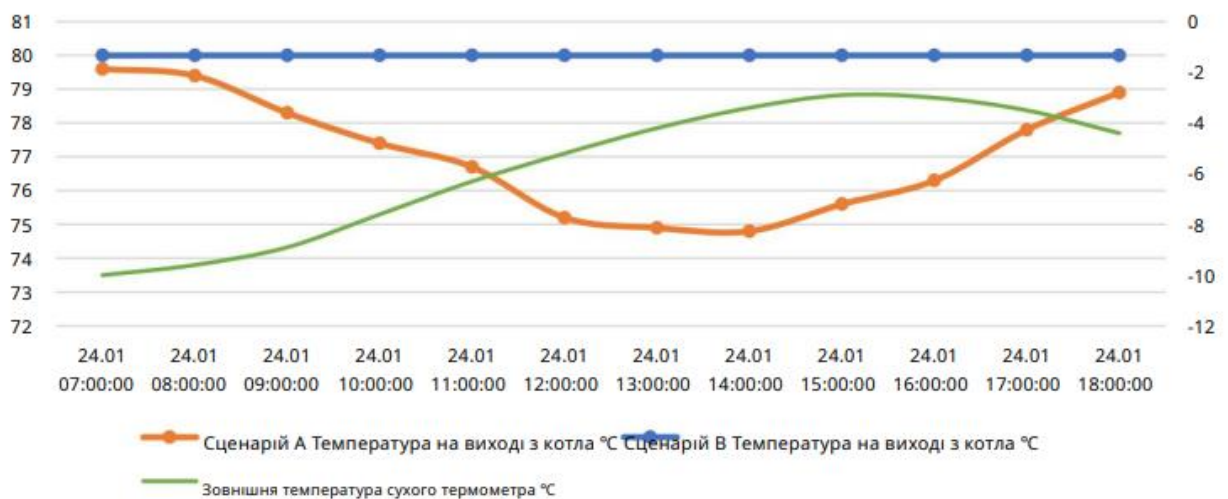


Рис.3.4 Експериментальні результати сценарію А і В

3.1.5 Аналіз місячних результатів

На рисунку 3.5 показано незначну різницю між двома стратегіями контролю в жовтні та березні, а загальне споживання енергії залишається низьким. Це пов'язано з тим, що температура в ці місяці в Києві все ще відносно прийнятна, і приміщення може підтримувати прийнятну температуру без використання системи опалення. Споживання газу починає значно зростати з листопада і досягає свого максимуму в січні. Різниця в споживанні теплової енергії між двома сценаріями досягає 14%.



Рис. 3.5 Порівняння місячного споживання

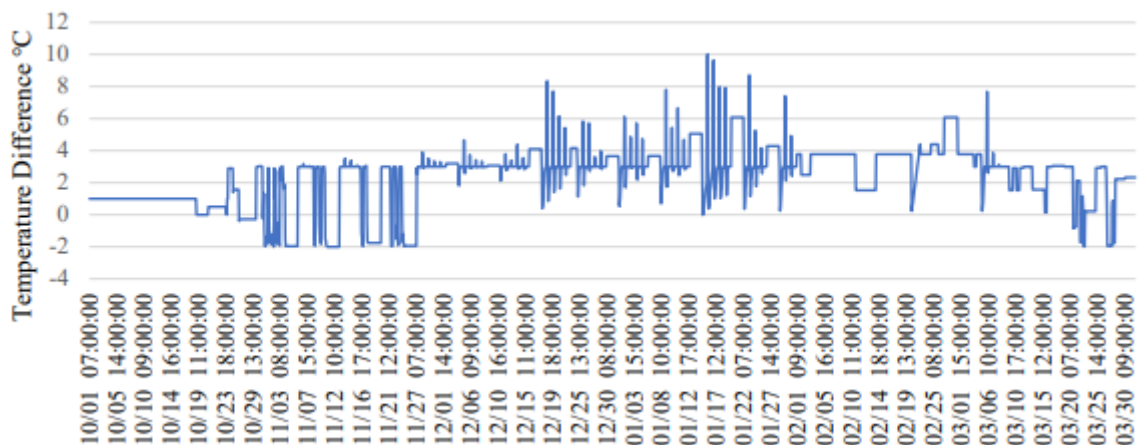


Рис.3.6 Різниця температур на виході

На рисунку 3.6 показана різниця температур на виході між двома сценаріями. У більшості випадків температура на виході в сценарії В значно вища, ніж у сценарії А. Різниця може досягати 10 градусів за Цельсієм, але коливається в межах 2-4°C більшу частину часу. Це свідчить про те, що інтелектуальне керування може знизити температуру на виході, адаптуючись до зовнішніх факторів та умов у приміщенні, зменшуючи загальне споживання енергії системою при постійній швидкості потоку. Водночас, в окремі дні температура води на виході за сценарієм А вища, ніж за сценарієм В. Це означає, що в ці дні зовнішня температура була відносно низькою, і система IoT наказує трохи підвищити температуру води, щоб відповідати вимогам до температури у приміщенні.

Сценарій В, навпаки, має слабший ефект нагрівання і не завжди дозволяє досягти встановленої цільової температури в 20°C у приміщенні. На рисунку 3.7 показано загальне споживання газу за весь опалювальний сезон. Сценарій А дозволяє заощадити майже 15% від загального споживання газу, що підтверджує значний енергозберігаючий вплив інтелектуального керування на основі платформи Інтернету речей у будівлях.

Якщо конвертувати споживання газу в ціну, відповідно до поточної ціни на природний газ в Україні, яка становить 7,99 гривень за м³, то сценарій В коштуватиме 479 601 грн, а сценарій А — 407 397 грн. Це означає, що за один опалювальний сезон у початковій школі інтелектуальна система керування дозволяє заощадити 9000 кВт·год природного газу, що еквівалентно економії 72 000 грн. Якщо цю стратегію застосувати в 20 школах Києва, то за один опалювальний сезон можна заощадити 1, 440 000 мільйона гривень.

Якщо розрахувати викиди вуглекислого газу, то сценарій А викидає 9580 кг CO₂, тоді як сценарій В викидає 11278 кг CO₂.



Рисунок 3.7 Загальне споживання природного газу

4. Методика прогнозування теплового навантаження

4.1 Аналіз теплоспоживання

Іншим важливим аспектом є алгоритми прогнозування теплового навантаження. Ці алгоритми засновані на зборі даних про поточні та попередні режими роботи системи, зовнішні кліматичні умови, часові інтервали найбільшого теплоспоживання та інші змінні фактори. Непросто спрогнозувати попит на централізоване опалення в часових масштабах, які є актуальними для торгівлі на ринку електроенергії на добу наперед. На загальне теплове навантаження в системі централізованого опалення впливає кілька факторів — головним чином, погода, масивність забудови міста та поведінка споживачів тепла. Холодна і вітряна погода збільшує потребу в теплі, а тепла і сонячна – зменшує. Структура масиву будівлі впливає на те, як теплове навантаження реагує на зміни погоди. Поведінка людини часто є фактором, який часто забувають, і, особливо влітку, потреба в теплі залежить від споживання гарячої води, а не від опалення приміщення. Поведінка споживачів може значно змінюватися щодня, а теплове навантаження в особливих випадках, наприклад, напередодні Нового року, як відомо, важко точно передбачити.

Шкільні канікули часто плануються на місці, а деякі релігійні свята, наприклад, Великдень, щороку припадають на різні дати. Тому загальних даних календаря недостатньо для моделювання подій, які залежать від місцевих свят. Споживачі тепла поведуться по-різному у святкові дні та змінюють структуру споживання, тому включення даних про місцеві святкові дні в моделі прогнозу теплового навантаження може підвищити точність прогнозу.

Новизна цієї теми полягає в застосуванні нових джерел даних, зокрема даних про місцеві свята, для створення моделей прогнозування теплового навантаження, які точніше фіксують поведінку споживачів. Наскільки нам відомо, дані про шкільні канікули раніше не використовувалися для прогнозування теплового навантаження. Ми виділяємо вплив використання даних про місцеві свята, використовуючи моделі машинного навчання, які в минулому довели свою ефективність для прогнозування теплового навантаження. Крім того, ми базуємо наше моделювання на дуже великій кількості даних. Сім років щогодинного теплового навантаження та даних про погоду, доповнених даними про національні свята, пам'ятні дати та шкільні канікули, допомагають моделям прогнозу фіксувати рідкісні події навантаження.

Прогнозування теплового навантаження широко досліджено в науковій літературі. Успішне застосування простих лінійних моделей надихнуло використовувати звичайну модель найменших квадратів (OLS) як просту модель бенчмаркінгу. Статистичні моделі часових рядів, такі як моделі SARIMA (сезонна авторегресійна інтегрована ковзаюча середня) і моделі сірого ящика, що поєднують фізичне розуміння зі статистичним моделюванням, є природними способами обробки тимчасової природи прогнозування навантаження. Ці моделі, як правило, лінійні і борються з множинною сезонністю. У дослідженнях автори порівняли низку алгоритмів машинного навчання, включаючи просту нейронну мережу прямого зв'язку, опорну векторну регресію (SVR) і OLS. Вони дійшли висновку, що модель SVR працює найкраще. Сильні можливості прогнозування моделей SVR також були продемонстровані в іншому дослідженні, де попит на тепло було спрогнозовано на основі споживання природного газу. Нейронні мережі знайшли широке застосування для прогнозування навантаження. Кілька досліджень застосовують прості мережі прямого зв'язку з одним прихованим шаром, такі як багат шаровий перцептрон (MLP).

Головною метою тут є створення прогнозів теплового навантаження, які є актуальними на часовому горизонті ринку електроенергії на добу наперед. Тому щоранку о 10:00 потрібно створювати прогноз на кожну годину наступного дня. Цей графік, показаний на рисунку 4.1, дає час для спілкування між різними учасниками виробничої системи та для планування виробництва тепла на наступний день відповідно до заявок на ринку електроенергії на добу наперед.

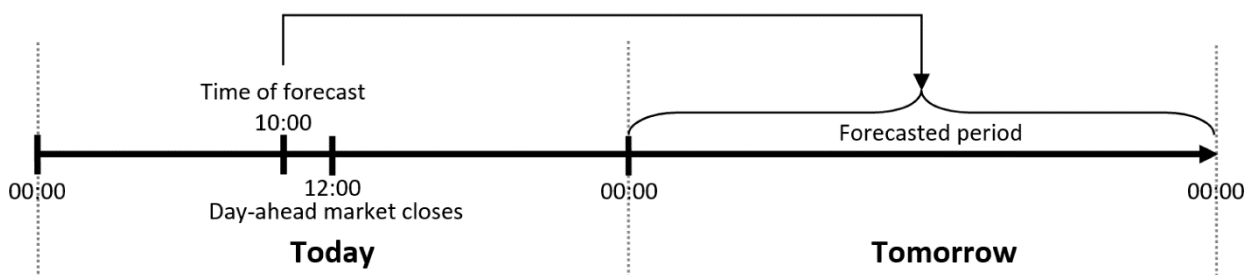


Рис. 4.1 Графік для прогнозу теплового навантаження, який має значення для прийняття торгових рішень на ринку електроенергії на добу наперед. Щодня о 10:00 складається прогноз на кожну годину наступного дня.

Аналіз базується на семирічних даних щодо загального погодинного теплового навантаження Орхуса, Данія. Використано 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 та 2016 роки. На жаль, дані про теплове навантаження за 2011 рік нам недоступні. Теплове навантаження в годину t позначимо через P_t .

4.2 Дані про погоду

Потреба в теплі сильно залежить від погоди. Погодинна температура зовнішнього повітря, швидкість вітру та сонячне опромінення за сім років були отримані з іншого дослідження. Використовувалися дані про погоду з географічної точки N 56°2'42.24", E 9°59'59.95" у південній частині Орхуса. Прогнози погоди щодо зовнішньої температури, швидкості вітру та сонячного випромінювання були надані Датським метеорологічним інститутом (DMI) і використані для перевірки ефективності прогнозів теплового навантаження якомога реалістичніше. Ці прогнози погоди базувалися на HIRLAM (модель обмеженої зони високої роздільної здатності), чисельній системі прогнозування погоди, розробленій консорціумом європейських метеорологічних інститутів з метою надання найсучасніших короткострокових прогнозів погоди, для чисельного прогнозу погоди, мали горизонт прогнозу до 54 годин і поширювалися чотири рази на день. Ми позначаємо зовнішню температуру, швидкість вітру та сонячне опромінення T_t поза, v_t вітер і I_t сонце, відповідно.

4.3 Календарні дані

Попит на тепло має сильний соціальний компонент, який залежить від поведінки людини. Соціальна складова є частиною причин добової та тижневої структури теплового навантаження. Різні профілі навантаження в будні та вихідні також можна пояснити поведінкою споживачів. Для того, щоб моделі прогнозу враховували варіації навантаження, які прив'язані до конкретних днів, сезонів і часу доби, певні календарні дані були включені як вхідні змінні. Зокрема, як вхідні дані використовувалися година доби, день тижня, вихідні та місяць року. Як календарні дані були закодовані та включені в моделі, описано в розділі 4.5 .

4.4 Дані про відпустку

Окрім загальних календарних даних, також використовували більш конкретні місцеві дані про особливі дні, які можуть впливати на структуру споживання тепла. Система централізованого теплопостачання міста Орхус, Данія, слугувала цим практичним дослідженням. Тому ми використали дані про датські національні свята, пам'ятні дати та місцеві шкільні канікули. До національних свят відносяться Новий рік, Різдво Христове, Великдень і т. д., які складають 11 днів на рік. Святкування включають, наприклад, Святвечір і День Конституції та становлять шість днів на рік. Інформація про муніципальні шкільні канікули була зібрана з місцевих шкіл в районі Орхуса і становить у середньому 96 днів на рік. Треба зауважити, що всі державні свята є також і шкільними. Зрозуміло, що цей тип інформації є дуже локальним і що збір таких даних, порівняно зі загальними даними календаря, є складнішим. Наступний аналіз висвітлить, чи включення цих даних суттєво покращує прогнози теплового навантаження, чи достатньо доступних типів даних.

4.5 Дослідження даних

На рисунку 4.2 показано середньогодинне теплове навантаження для прикладу 2010 року. Зверніть увагу, наскільки теплове навантаження змінюється протягом року як за величиною, так і за дисперсією. Збільшена вставка на графіку показує коливання теплового навантаження протягом тижня в березні. Можна спостерігати чітку денну картину з різким ранковим піком між 7:00 і 8:00 у будні вранці. Ранковий пік є добре відомим явищем у спільноті централізованого тепlopостачання, і спричинений тим, що багато людей щоранку приймають душ приблизно в один і той же час. У вихідні дні ранкові піки можна спостерігати пізніше вранці і, як правило, менш різкі порівняно з будніми днями. Зі вставки видно, що щоденна схема навантаження суттєво змінюється протягом лише одного тижня.

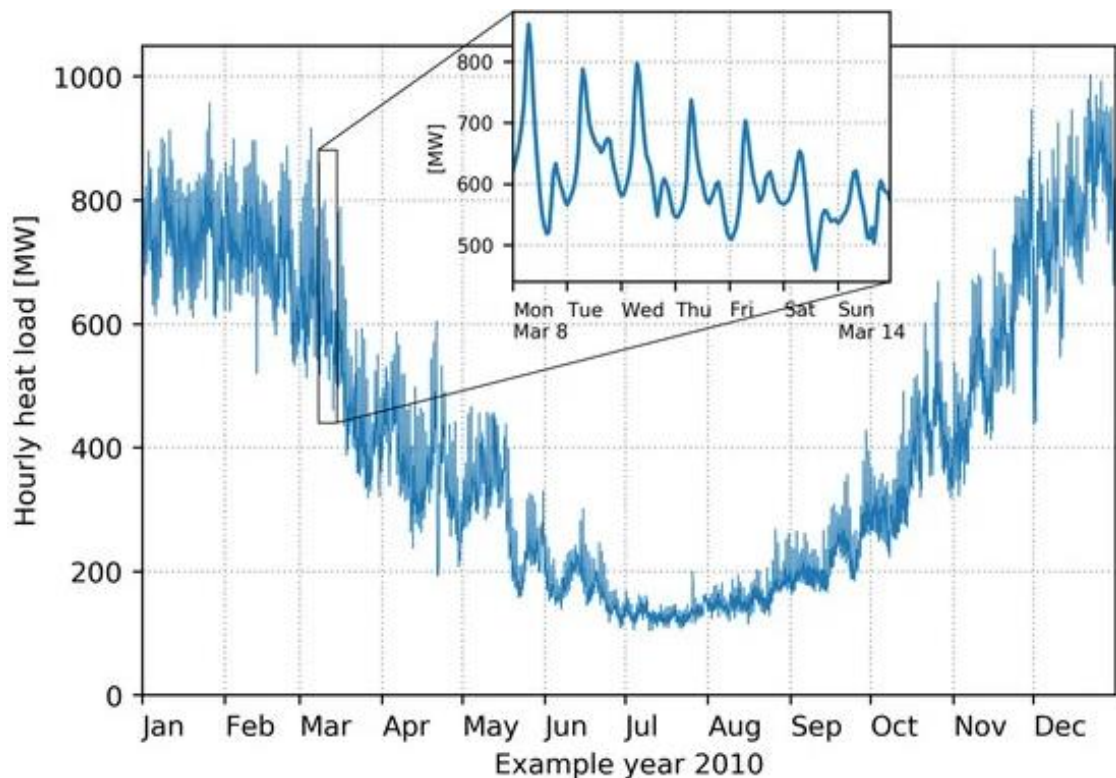


Рисунок 4.2 Часовий ряд для погодинного теплового навантаження в 2010 році. На вставці показано масштабування тижня в березні.

Попит на тепло має піки у функції автокореляції в 24 години, 48 годин, 72 години і так далі. Це пов'язано з сильною денною структурою. Існує також

помітний пік у 168 годин (один тиждень). Щоб зафіксувати цю поведінку, значення теплового навантаження з відставанням використовувалися як вхідні змінні в моделюванні. Зокрема, було включене теплове навантаження з відставанням на 24 години, 48 годин і 168 годин. Дивлячись на рисунок 2.7, можна побачити, що горизонт прогнозу коливається від 15 до 38 годин. Теплове навантаження в першу годину доби можна прогнозувати за найкоротшим горизонтом, а останню годину кожного дня прогнозують за найдовшим горизонтом. При прогнозуванні годин з горизонтом прогнозу 24 години або менше можна використовувати теплове навантаження з відставанням на 24 години. При прогнозуванні годин із довшим горизонтом, ніж 24 години, замість цього слід використовувати теплове навантаження з відставанням на 48 годин. Аналіз спектру потужності підтвердив сильні піки на частотах $1/12 \text{ год}^{-1}$ і $1/24^{-1}$, але 12 год є коротшим за найкоротший горизонт прогнозу, тому його було відкинуто. Було включено два лаги, які найкраще відобразили щоденну та тижневу структуру теплового навантаження. Позначимо відстале теплове навантаження через $P_t - 24$, $P_t - 48$ і $P_t - 168$ відповідно.

Найважливішою погодною змінною при моделюванні навантажень централізованого теплопостачання є зовнішня температура, оскільки існує сильна негативна кореляція між потребою в теплі та зовнішньою температурою. Залежно від конкретної системи централізованого теплопостачання, сонячне опромінення та швидкість вітру також можуть бути значущими факторами прогнозування теплового навантаження. Через теплову масу будівель у системі централізованого теплопостачання існує певна інерція теплового навантаження, коли відбуваються зміни погоди. На рівні окремої будівлі ця інерція дуже детально розглядається в літературі з цивільного будівництва. Оскільки прогнозується теплове навантаження цілого міста, підемо більш спрощено.

У Орхуській системі централізованого опалення теплове навантаження найсильніше корелює із зовнішньою температурою із затримкою на 4 години порівняно з іншими часовими затримками температури. Теплове навантаження також найсильніше корелює з сонячним опроміненням із запізненням на 4 години. Здавалося, відставання швидкості вітру не приносило користі. Лише включення двох конкретних лагів, звичайно, є спрощенням динаміки системи, але результати їх включення були значно кращими, ніж просто використання одночасних (відставання 0 год) погодних змінних. Підсумовуючи, у моделювання були включені наступні п'ять погодних змінних: $T_t^{\text{поза}}$, $v_t^{\text{вітер}}$, $I_t^{\text{сонце}}$, $T_{t-4}^{\text{поза}}$, і $I_{t-4}^{\text{сонце}}$.

Зовнішня температура i , як наслідок, теплове навантаження суттєво змінюється з року в рік. Середні річні температури в нашому наборі даних охоплювали діапазон 2,5 °C. Порівняно із середнім навантаженням для всього набору даних (за винятком 2016 року), середньорічне теплове навантаження було на 15% вище в найхолодніший рік і на 11% нижче в найтепліший рік.

4.6 Сценарії даних і попередня обробка

Щоб оцінити ефект від включення різних типів вхідних даних для прогнозування теплового навантаження, було визначено три різні сценарії даних. Ми називаємо ці сценарії: «Лише дані про погоду», «Погода та календар» і «Погода, календар і свята». Таблиця 4.1 докладно описує вхідні дані, які використовуються в кожному сценарії.

Щоб досягти найкращої продуктивності моделей, вхідні дані були масштабовані та закодовані наступним чином. Усі безперервні змінні (теплове навантаження з відставанням і погода) були стандартизовані, щоб мати середнє значення 0 і стандартне відхилення 1. Календарні дані та дані про відпустки були включені як так звані фіктивні змінні. Фіктивні змінні — це спосіб представлення категоріальних змінних у вигляді двійкових змінних. Наприклад, чи припадає дана година на шкільні канікули, можна закодувати як двійкову змінну (0 або 1). День тижня можна закодувати як шість двійкових

змінних: одна змінна вказує, чи це понеділок, друга вказує, чи вівторок, тощо. Лише шість змінних потрібні для кодування семи днів, тому що якщо це не жоден із днів від понеділка до субота, тоді має бути неділя. За допомогою подібних фіктивних змінних було включено всі дані календаря та свят. Кодування категоріальних даних як фіктивних змінних є стандартним методом машинного навчання.

Таблиця 4.1. Вхідні змінні, що використовуються в трьох сценаріях даних.

		Тільки дані про погоду	Погода та календар	Погода, календар і свята
Відстале теплове навантаження	P_{t-2} або P_{t-48}	✓	✓	✓
	P_{t-168}	✓	✓	✓
Дані про погоду	$T_t^{\text{позд}}$	✓	✓	✓
	$v_t^{\text{вітер}}$	✓	✓	✓
	$I_t^{\text{сонце}}$	✓	✓	✓
	$T_{t-4}^{\text{позд}}$	✓	✓	✓
	$I_{t-4}^{\text{сонце}}$	✓	✓	✓
Календарні дані	Година дня		✓	✓
	День тижня		✓	✓
	Вихідні		✓	✓
	Місяць року		✓	✓
Дані про відпустку	Національне свято			✓
	Дотримання			✓
	Шкільне свято			✓

4.7 Вибір і тестування моделі

Хороша модель прогнозу – це та, яка добре працює на раніше невідомих даних. Це узагальнююча здатність моделі. Щоб точно виміряти ефективність узагальнення моделей, ми розділили повний набір даних (семирічні погодинні дані) на набір для навчання та перевірки та тестовий набір. Весь відбір і навчання моделей проводилися в період з 2009 по 2015 роки (2011 рік не враховується). Це набір для навчання та перевірки. Весь 2016 рік

використовувався як набір сліпих тестів для оцінки ефективності узагальнення прогнозів.

Було обрано три моделі та налаштовано їхні гіперпараметри на основі шестикратної перехресної перевірки за 2009, 2010, 2012, 2013, 2014 та 2015 роки. Використання шести згорток гарантувало, що кожна згортка містила цілий рік i , таким чином, представляла повну річну варіацію теплове навантаження. Під час перехресної перевірки різні моделі та сценарії даних оцінювалися відповідно до середньоквадратичної помилки за годину (RMSE).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_t (\hat{P}_t - P_t)^2} \quad (4.1)$$

де P_t – прогнозоване теплове навантаження на годину t , N – кількість годин.

Усі результати, представлені в наступному розділі, були отримані за допомогою сліпого тестування 2016 року. Цей рік не використовувався для навчання, дослідження даних або вибору моделі. У розділі «Результати» ми використовуємо дві інші метрики помилок прогнозу, окрім RMSE. Середня абсолютна похибка (MAE) також є показником абсолютної похибки (тут в одиницях МВт), але вона менш чутлива до великих похибок порівняно з середньоквадратичним значенням помилки. MAE визначається як

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_t |\hat{P}_t - P_t| \quad (4.2)$$

Нарешті, ми використовуємо метрику відносної похибки, середню абсолютну похибку у відсотках (MAPE), щоб полегшити порівняння між різними системами централізованого тепlopостачання. MAPE визначається як

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_t \left| \frac{\hat{P}_t - P_t}{P_t} \right| \quad (4.3)$$

4.8 Результати

Теплове навантаження в системі централізованого теплопостачання було спрогнозовано за допомогою трьох різних моделей машинного навчання, описаних у попередньому розділі: OLS, MLP і SVR. Продуктивність цих моделей перевірено, дозволивши їм скласти прогноз на наступний день, використовуючи вхідні дані, доступні щодня о 10:00 ранку. Моделі навчалися виключно на даних до тестового 2016 року, щоб мати можливість точно оцінити їх продуктивність узагальнення. На рисунку 4.3 наведено приклад прогнозів, зроблених на 4 травня. Лише теплове навантаження до моменту прогнозу використовувалося як вихідні дані для створення прогнозу. Справжні прогнози погоди використовувалися як дані про погоду на 4 травня, на відміну від історичних даних про погоду, які використовувалися для навчання. Зрозуміло, як три моделі прогнозу створюють подібні, але різні прогнози. 4 травня модель MLP дає найкращий прогноз, особливо вранці.

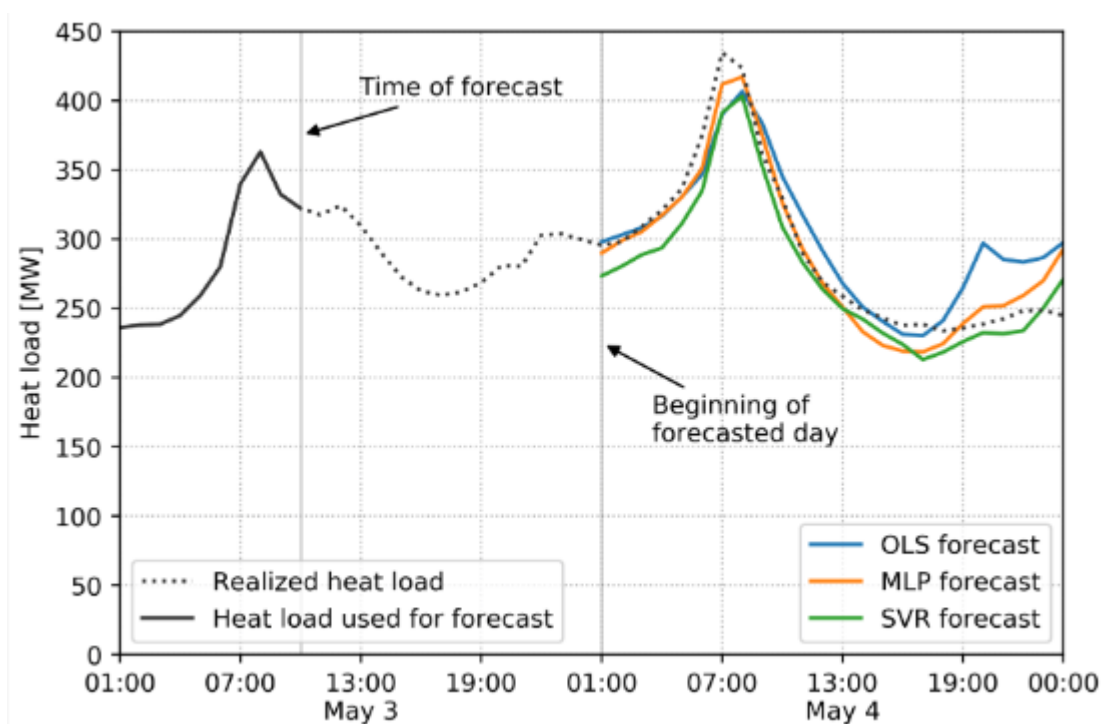


Рисунок 4.3 Приклади прогнозів на 4 травня 2016 року. Прогнози були зроблені 3 травня о 10:00 і базувалися на реальних прогнозах погоди, календарі та даних про свята.

На рисунку 4.4 узагальнено продуктивність трьох моделей у трьох різних сценаріях даних. Верхня панель показує продуктивність прогнозу, якої можна було б досягти, якби прогнози погоди були 100% точними, змодельованими з використанням історичних даних погоди. Нижня панель показує продуктивність з використанням реальних прогнозів погоди. Порівнюючи три сценарії даних, ми бачимо переваги включення різних типів даних у моделювання. У першому сценарії лише дані про теплове навантаження та погоду використовуються як вхідні дані. У другому сценарії також включено загальні дані календаря, а в третьому сценарії також включено місцеві урочистості, національні свята та шкільні канікули як вхідні дані для моделі. Включення даних календаря значно покращує продуктивність порівняно з використанням лише даних про погоду. Розширення вхідних даних даними про свята також призводить до додаткового, але невеликого покращення порівняно з використанням лише загальних даних календаря. Набагато простіше застосувати ці моделі до широкого спектру систем централізованого теплопостачання по всьому світу, якщо це можна зробити без збору даних про місцеві вихідні.

На рисунку 4.4 також можна порівняти продуктивність трьох моделей машинного навчання. Модель OLS виділяється тим, що працює значно гірше, ніж дві інші моделі в усіх сценаріях. Модель OLS має середньоквадратичну похибку 38,9 МВт у порівнянні з 31,1 МВт і 29,3 МВт для двох інших моделей при використанні реальних прогнозів погоди, даних календаря та святкових днів (нижня панель). Низьку продуктивність моделі OLS можна пояснити її лінійною структурою. Зв'язок між зовнішньою температурою і тепловим навантаженням в умовах помірного клімату є нелінійним. Це призводить до поганої роботи лінійної моделі влітку через недооцінку теплового навантаження та переоцінку його дисперсії. Дві нелінійні моделі, MLP і SVR, працюють однаково в цих сценаріях. Модель SVR має найменшу похибку, і в

решті статті буде зосереджено увагу на моделі SVR, яка використовує дані про погоду, календар і свята.

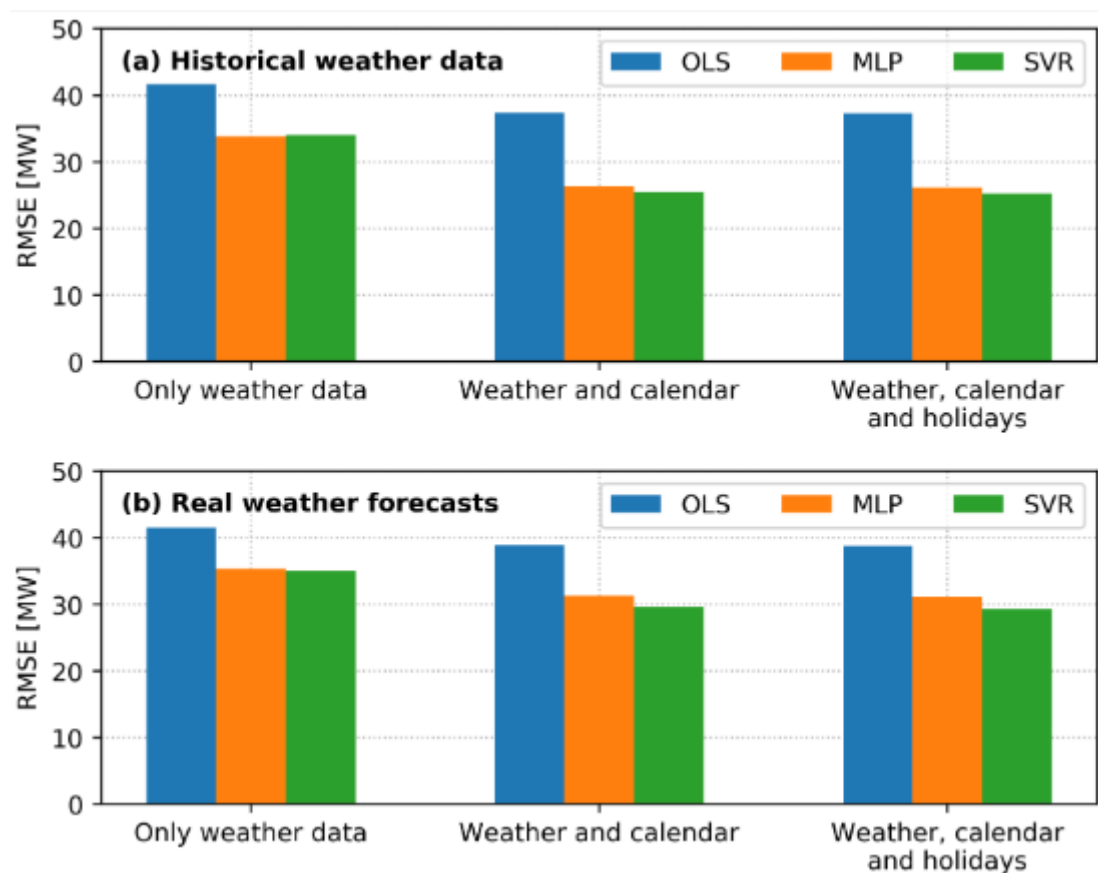


Рис 4.4 Середньоквадратична похибка трьох моделей прогнозу OLS, MLP і SVR на 2016 рік. Верхня панель (а) показує похибку з використанням історичних даних про погоду для імітації 100% точних прогнозів погоди. Нижня панель (б) показує помилку з використанням реальних прогнозів погоди.

4.9 Сезонні варіації продуктивності

Теплове навантаження значно змінюється протягом року як за величиною, так і за дисперсією, як показано на рисунку 4.2 . Для однієї моделі може бути важко адекватно спрогнозувати як зимові, так і літні теплові навантаження. Тому актуальним є подальше дослідження продуктивності моделі протягом року. Похибка прогнозу найкращої моделі, SVR з використанням даних про погоду, календар і свята, проілюстрована на рисунку 4.5 . Показано три різні метрики помилок: на лівих осях RMSE (синій)

і MAE (жовтий) показано в MW; на правій осі показано MAPE (червоний) у відсотках. Горизонтальні осі показують годину доби для прогнозованої години, а кожен підграфік зображує місяць у році. Це дає змогу побачити, чи важче прогнозувати ранковий пік і чи впливає горизонт прогнозу на точність. Мати на увазі, що 1 година має найкоротший горизонт прогнозу (15 год), а 24 година має найдовший горизонт (38 год), оскільки прогнози створюються о 10:00 попереднього дня.

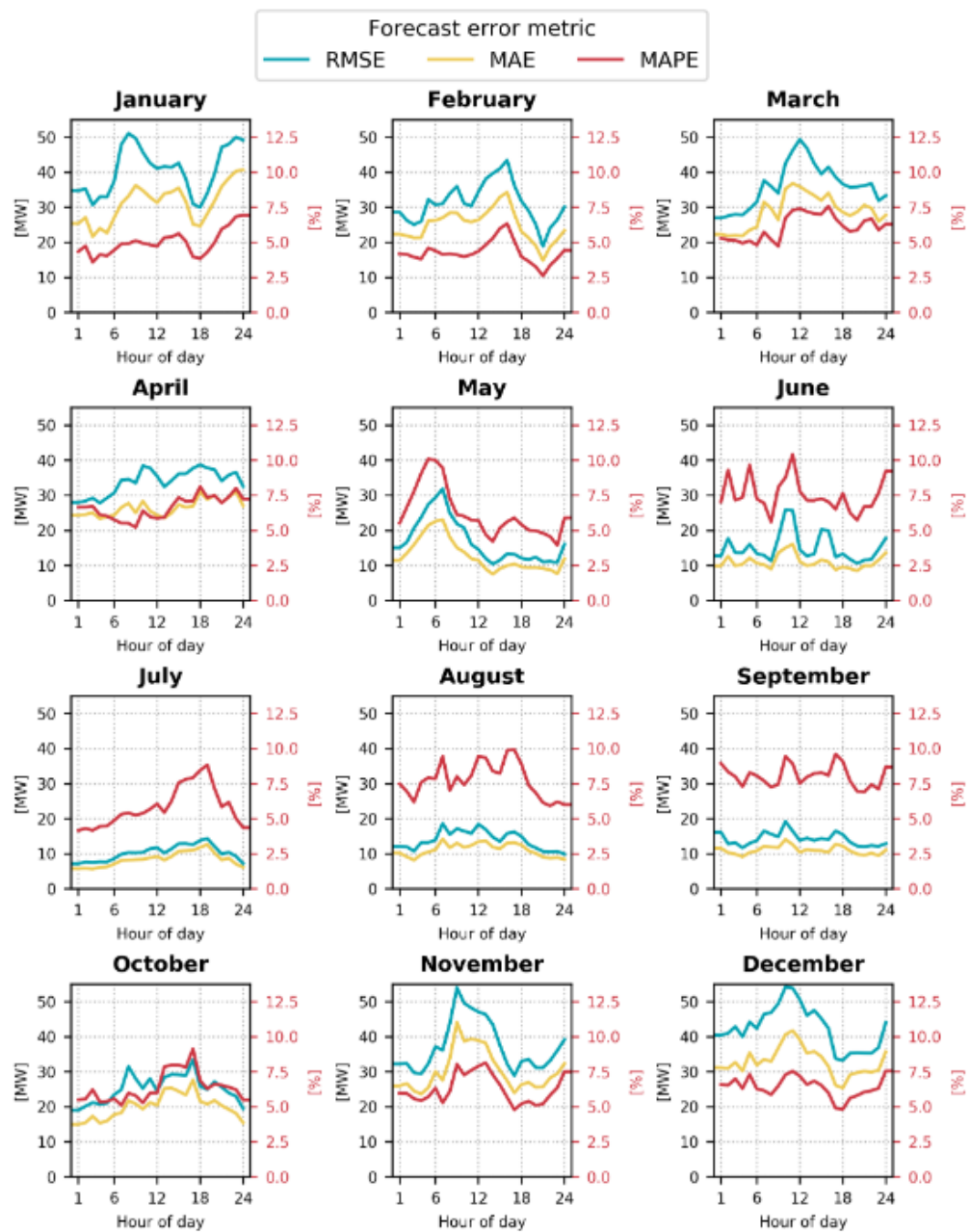


Рис. 4.5 Ефективність моделі SVR у 2016 році з використанням реальних прогнозів погоди, даних календаря та свят. Для кожного місяця року показано

три різні показники помилок. Похибка прогнозу змінюється в залежності від часу доби, відображеного на горизонтальних осях. RMSE (синій) і MAE (жовтий) показані одиниці МВт на лівих осях. MAPE (червоний) показано у відсотках на правих осях.

Переглядаючи рисунок 4.5, видно, що вимірювання абсолютної похибки RMSE і MAE найбільші взимку і найменші влітку. Це є відображенням річного профілю теплового навантаження та великого навантаження з великою дисперсією протягом зими. Пізньої осені та взимку RMSE може перевищувати 50 МВт за кілька годин, тоді як за кілька годин у липні він може бути нижче 10 МВт. Метрика відносної помилки MAPE поводить протилежним чином. Відносна похибка менша в зимові місяці та більша в літні місяці, але вона залишається між 2,5% і 10,5%. Це є наслідком того, що річні коливання навантаження є більшими, ніж річні коливання абсолютної похибки.

Немає чіткої закономірності зміни похибки протягом дня. Здається, модель не гірше працює між 7:00 і 8:00 ранку, на який припадає ранковий пік. Виняток із цього правила – листопад і травень. У багатьох програмах похибка моделі прогнозу зростає разом із горизонтом прогнозу (тут година доби). Загальної тенденції зростання похибки з годиною доби ми не спостерігаємо. Це вказує на те, що прогнози погоди, які використовуються як вхідні дані для створення прогнозу, не є значно гіршими на найдовшому горизонті порівняно з найкоротшим горизонтом. Це також може бути пов'язано з тим, що точність прогнозу погоди має незначний вплив на помилку прогнозування теплового навантаження, як ми бачимо на рисунку 4.4. Якби ми збільшили горизонт прогнозу далі, помилка прогнозу, швидше за все, збільшилася б.

Помилка прогнозу значно змінюється протягом року, але сукупні показники помилок, такі як RMSE, MAE або MAPE, не дають повної інформації. Максимальні помилки можуть мати значення для зобов'язань одиниці при плануванні виробництва та для оцінки ризику щодо торгівлі на ринку електроенергії. На рисунку 4.6. показано гістограми для погодинної

похибки для кожного місяця 2016 року сліпого тестування. Квантілі 10% і 90% були вказані на кожному графіку. Зрозуміло, що ширина розподілу помилок суттєво змінюється від місяця до місяця. Влітку похибка прогнозу досить обмежена, але розподіл розширюється пізньої осені та стає найширшим у грудні.

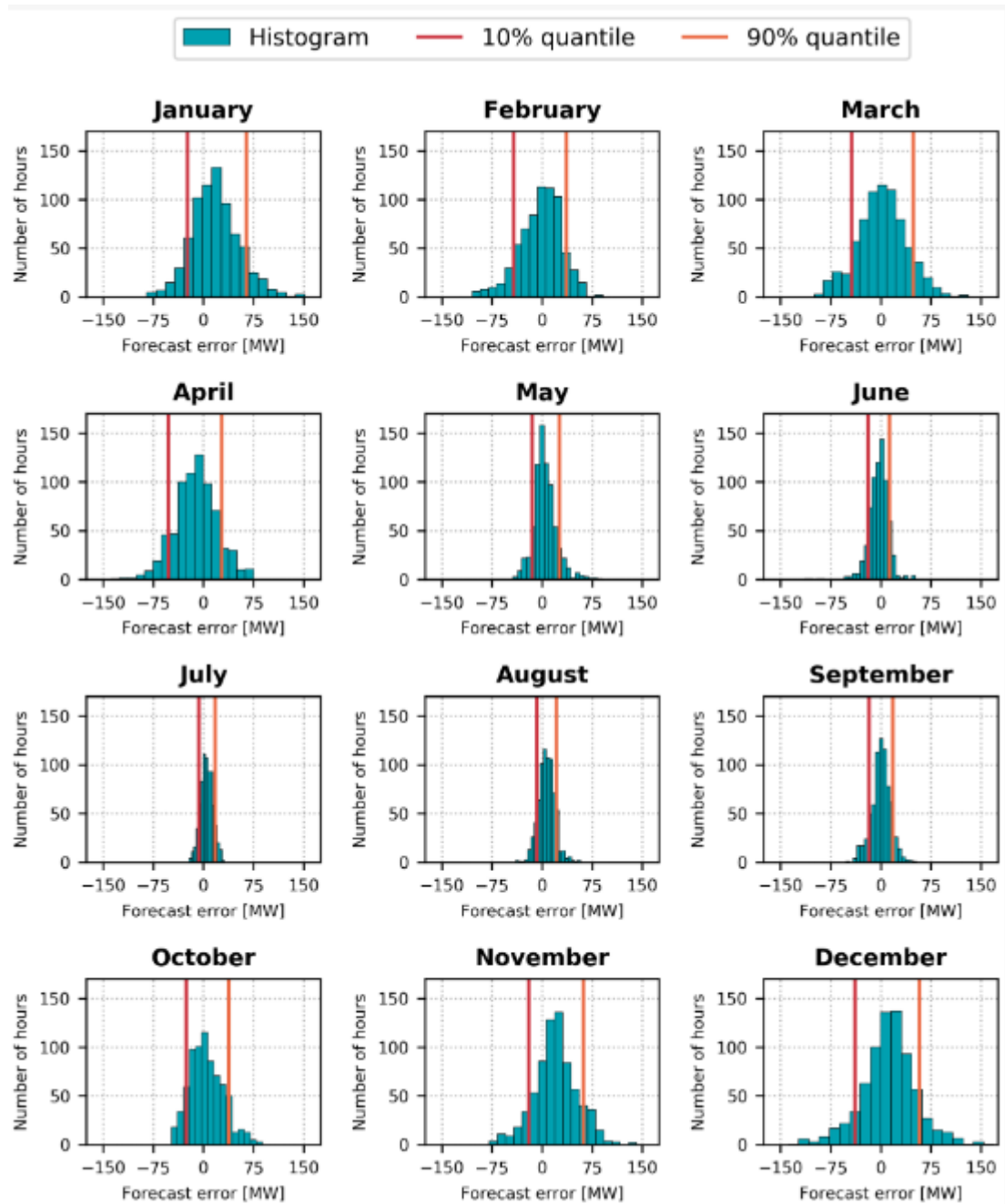


Рисунок 4.6 Гістограми похибки прогнозу моделі SVR на 2016 рік з використанням реальних прогнозів погоди, календарних і святкових даних.

Розподіл похибки прогнозу зображено для кожного місяця в році разом із квантилями 10% і 90%.

4.10 Значення даних календаря та свят

На рисунку 4.7 показано ефективність моделі SVR у трьох сценаріях даних у різні набори днів протягом року. «Свята» стосуються всіх святкових днів, національних свят або шкільних канікул. «Будні» включають усі будні дні, які також не є святковими, а «вихідні» включають усі вихідні дні, не включені у святкові дні. У 2016 році був 201 робочий день, 65 вихідних, 100 святкових днів.

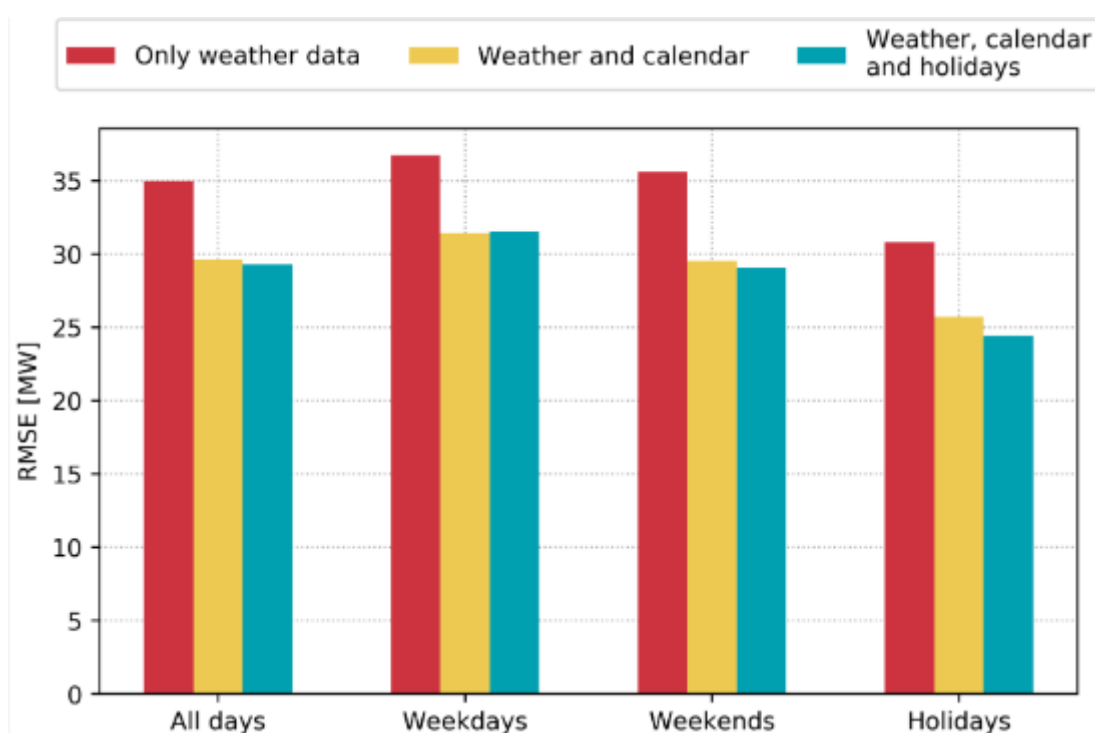


Рисунок 4.7 Прогнозна продуктивність моделі SVR на 2016 рік з використанням реальних прогнозів погоди, календаря та святкових даних. Друга і третя група ящиків відносяться до будніх і вихідних днів, які також не входять до святкових днів. Свята стосуються всіх святкових днів, національних свят або шкільних канікул.

Існує значна перевага включення загальних даних календаря в моделі прогнозу для всіх типів днів. У робочі дні включення даних про місцеві свята не покращує продуктивність. Похибка прогнозу у вихідні може бути зменшена

на 0,5 МВт. Не дивно, що найбільший приріст продуктивності можна спостерігати у святкові дні. Помилка відпустки зменшується на 1,3 МВт при доповненні моделювання місцевими даними про відпустку. Помилка свята зазвичай менша, ніж помилка для інших типів днів. Це пов'язано з тим, що серед канікул переважають літні шкільні канікули, а влітку похибка зазвичай менша. Підсумовуючи, включення даних про місцеві свята в середньому лише трохи покращує прогнози. Найбільше покращення спостерігається у свята, коли помилку можна зменшити на 5% порівняно з використанням лише загальних даних календаря.

4.11 Підсумки досліджень

В ході дослідження було протестовано прогнози теплового навантаження з горизонтом від 15 до 38 годин, актуальні для планування виробництва централізованого опалення з урахуванням ринку електроенергії на добу наперед. Робота базувалася на семирічних даних про теплове навантаження та погоду для великої системи централізованого тепlopостачання міста Орхус, Данія. Щоб виміряти ефективність прогнозу, яку реально можна відчутти в реальній роботі, ми використовували сліпе тестування на цілий рік із реальними прогнозами погоди.

Було перевірено три моделі машинного навчання: звичайна модель найменших квадратів, багатосаровий персептрон і регресійна модель опорного вектора. Модель SVR виявилася найкращою, перевершивши модель OLS із великим відривом і модель MLP з невеликим відривом. Усі моделі тренувалися на даних про теплове навантаження із запізненням і даних про погоду. Ефективність прогнозу можна значно покращити, включивши загальні дані календаря, наприклад місяць, день тижня та годину доби. Меншого покращення прогнозів можна отримати, якщо надати моделям дані про місцеві свята, включаючи пам'ятні дати, національні свята та шкільні канікули. Це покращення було найбільш значним у святкові та вихідні дні. Отримання даних про місцеві свята може бути складним і трудомістким, але просте

включення даних із запізненим тепловим навантаженням, погодою та загальних даних календаря може забезпечити хорошу загальну продуктивність прогнозу.

Модель SVR, яка використовує дані про погоду, календар і свята, показала найкращу продуктивність. Середня квадратична похибка становила 29,3 МВт, а середня абсолютна відсоткова похибка становила 6,4%. Ця модель прогнозу перевершила всі інші моделі, які ми бачили для Орхуської системи. Система комерційного прогнозування, яка наразі працює в системі централізованого опалення Орхуса, мала середньоквадратичну середню потужність 41,9 МВт і MAPE 8,3% у тестовий рік.

Включення даних про місцеві свята показало лише незначне загальне покращення продуктивності прогнозу, а включення нових типів даних у моделі прогнозу вимагає ретельної оцінки компромісу між точністю прогнозу та надійністю джерела даних. У оперативних системах прогнозування надійність високо цінується, і введення даних у простішу модель може спрацювати для створення більш надійної системи. Таким чином, додаткові функції не завжди є перевагою, якщо підвищення точності недостатнє, щоб виправдати додаткові витрати на впровадження та обслуговування.

Початкові експерименти з використанням мереж довготривалої короткочасної пам'яті не показали помітного покращення в порівнянні з результатами, досягнутими за допомогою моделі SVR. Однак у майбутніх роботах слід продовжити дослідження цього типу моделі, оскільки вона має потенціал для спрощення процедури вибору функцій і полегшення передачі цих результатів у широкий спектр систем централізованого теплопостачання по всьому світу.

5. Економічна частина

5.1 Економічна ефективність автоматизації котелень

Автоматизація котельних систем має значний економічний потенціал, оскільки дозволяє знижувати витрати на паливо та обслуговування обладнання. Завдяки точному регулюванню теплової потужності система працює лише на необхідному рівні, що дозволяє уникати перевитрати ресурсів. Це особливо важливо в умовах постійного зростання цін на енергоносії, коли кожен відсоток економії може суттєво вплинути на загальні витрати підприємства або організації.

Також важливо зазначити, що автоматизовані системи дозволяють знизити витрати на обслуговування та ремонт котельного обладнання. Оскільки система контролює параметри роботи в реальному часі, вона може виявляти можливі проблеми ще на ранніх стадіях, що дозволяє проводити профілактичні заходи та уникати серйозних аварій. Це, у свою чергу, знижує витрати на аварійне обслуговування та мінімізує втрати від простою обладнання.

Крім того, автоматизація зменшує необхідність у великій кількості обслуговуючого персоналу. Завдяки дистанційному контролю та можливості програмування систем, одна особа може контролювати роботу декількох котелень або великих тепломереж. Це знижує витрати на заробітну плату, що є ще одним вагомим економічним аргументом на користь автоматизації.

5.2 Розрахунок капітальних вкладень на придбання та монтаж нового обладнання

Для розрахунку автоматизованої системи модульної котельні в першу чергу розглядаються процеси розширення виробництва та техніко-економічного вдосконалення в галузі теплової енергетики, що значною мірою залежать від обсягів капітальних вкладень.

Вихідні дані:

- 1) Загальна потужність котельні – $0,8 \text{ МВт} = 2,88 \text{ ГДж}$
- 2) Річний відпуск теплоти – $2,88 \cdot 24 \cdot 189 = 13063 \text{ ГДж}$;
- 3) Вартість палива – 1300 грн за 1 м³
- 4) Витрати електроенергії – 86250 кВт·год в рік
- 5) Вартість води – 55 грн за м³;
- 6) Річні витрати води $G_v = 74280 \text{ м}^3$;
- 7) Вартість електроенергії: тариф на електроенергію – 6,07 грн за кВт·год;

Капітальні вкладення - це інвестиції в основний капітал, який включає в себе різноманітні матеріальні активи, такі як будівлі, обладнання, транспортні засоби та інші об'єкти, призначені для довгострокового використання у виробничій, комерційній або іншій господарській діяльності.

Вартість робіт по монтажу обладнання приймаємо 30-40% вартості обладнання. Витрати капітальних вкладень на придбання та монтаж нового обладнання розраховано у таблиці 5.1.

Розрахунок капітальних вкладень на придбання та монтаж нового обладнання

Табл 5.1

№ п/п	Назва обладнання	Одиниці виміру	Кількість	Вартість, грн	
				Одиниці	Всього
1	Котел Vitocrossal 300	шт.	2	250000	500000
2	Насос Grundfos TPE2 40-140/2	шт.	1	49000	49000
3	Насос Grundfos TP 50-60/2		1	52000	52000
4	Насос Grundfos TP TP 65-160/2	шт	2	65000	130 000
5	Насос Grundfos CM 1-2	шт	2	25000	50000
6	Буферна ємність 1000л	шт	1	7800	7800
7	Установка пом'якшення води FU-1018-cab	шт	1	42800	42800
8	Бак запасу підживлюючої води V=0.5 м3	шт	1	6500	6500
9	Розширювальний бак 1000л, 99°C	шт	1	43600	43600
10	Бойлер ГВП, 100л	шт	1	9300	9300
	Всього				891000
	Вартість робіт по монтажу обладнання (30%)				374000
	Разом				1265000

Отже, сумарна вартість капіталовкладень складе 1 265 000 грн.

5.3 Визначення розрахункової собівартості 1ГДж тепла

Собівартість продукції - це виражені в грошовій формі сумарні витрати підприємства на виготовлення та реалізацію продукції.

Собівартість теплової енергії складається з наступних витрат:

$$\sum S = S_{\text{п}} + S_{\text{в}} + S_{\text{ел}} + S_{\text{з.п}} + S_{\text{а}} + S_{\text{р}} + S_{\text{ів}}, \quad (5.1)$$

де $S_{\text{п}}$. - витрати на паливо, грн.,

$S_{\text{в}}$. - витрати на воду, грн.,

$S_{\text{ел}}$. - витрати на електроенергію, грн.,

$S_{\text{з.п}}$. - витрати на заробітну плату, грн.,

$S_{\text{а}}$. - амортизаційні відрахування, грн.,

$S_{\text{р}}$. - витрати на ремонт, грн.,

Сів. - інші витрати, грн.

5.4 Визначення чисельності робітників за категоріями

Визначення потреби у всіх категоріях працівників, потрібних для забезпечення безперебійного виробничого процесу й виконання виробничих планів. При цьому треба забезпечити раціональне використання трудових ресурсів, оптимальне співвідношення різних категорій персоналу. Для цього розрахунки необхідно здійснювати за категоріями персоналу.

Усіх працівників підприємства розподіляють на дві групи:

- *персонал основної діяльності* (промислово-виробничий персонал);
- *персонал неосновної діяльності* (непромислових організацій, які перебувають на балансі підприємства).

Під час планування чисельності працівників підприємства розрізняють явочну, облікову та середньооблікову чисельність.

Явочну чисельність — кількість робітників, які повинні для забезпечення нормального процесу виробництва щодня перебувати на робочих місцях — визначають під час планування робітників.

Облікова чисельність охоплює загальну кількість усіх працівників підприємства (постійних, сезонних, тимчасових), у тому числі фактично працюючих працівників, які перебувають у відрядженні, у відпустках, хворіють, виконують державні обов'язки, відсутні на роботі з дозволу адміністрації тощо.

Баланс робочого часу робітників на 2024 рік

Таблиця 5.2

<i>Показники</i>	<i>Безперервне виробництво</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
1. Календарні дні	365
2. Вихідні та святкові дні	21
3. Номінальний фонд часу (F _н)	344
4. Планові невиходи на роботу	73
4.1. Чергові та додаткові відпустки	25
4.2. Відпустки за навчанням	13
4.3. Відпустки, пов'язані з вагітністю	-
4.4. За хворобою	23
4.5. Виконання державних обов'язків	12
5. Дійсний (ефективний) фонд часу в днях (F _д)	271
6. Тривалість робочої зміни	8
7. Дійсний (ефективний) фонд часу в годинах	2168

При складанні балансу робочого часу робітника враховують режим роботи підприємства чи підрозділу (перервний, безперервний), тривалість робочого дня, особливості даного підприємства.

Відпустка (24, 18, 15 днів) та інші невиходи на роботу складають 1,5 – 2,5% номінального фонду часу або за даними підприємства.

Загальна чисельність виробничого персоналу цеху (відділення, дільниці), що проектується, складається з чисельності основних робітників, допоміжних робітників, спеціалістів та службовців.

Чисельність кожної групи працюючих визначається окремо. Чисельність основних робітників визначають від кількості робочих місць з врахуванням ступеня завантаження робочих місць, норм обслуговування обладнання одним робітником, прийнятого режиму роботи.

Облікова чисельність основних робітників визначається від явочної чисельності:

$$R_{\text{обл.}} = R_{\text{яв}} \times K_{\text{пер}}, \quad (5.2)$$

$$R_{\text{обл.}} = 8 \times 1,27 = 10 \text{ люд.}$$

де : $K_{\text{пер}}$ - коефіцієнт переведу явочної чисельності в облікову ;

$$K_{\text{пер}} = F_{\text{н}} / F_{\text{д}} ; \quad (5.3)$$

$$K_{\text{пер}} = 344/2168 = 1,27$$

$$R_{\text{яв}} = S I \times K_{\text{зм}} / N_{\text{обс}} ; \quad (5.4)$$

$$R_{\text{яв}} = (3 \times 3)/1,2 = 8$$

$S I$ - кількість технологічного обладнання і – ого виду;

$K_{\text{зм}}$ - кількість змін роботи ;

$N_{\text{обс}}$ - норма обслуговування обладнання одним робітником.

Чисельність допоміжних робітників (слюсарів, наладчиків, ремонтників та ін.) складає 35-40 % від чисельності основних робітників.

Чисельність спеціалістів (технологів, механіків, контролерів та ін.) та службовців (начальник цеху чи відділення, майстер) складає 8-10 % від загальної чисельності основних та допоміжних робітників.

Відомість чисельності працюючих

Таблиця 5.3

Професія	Розряд	Н _{обс}	Чисельність за змінами			Разом (Р _{яв})	Облікова чисельність (R _{обл.})
			I	II	III		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
Основні робітники							
<i>Слюсар КВП і А</i>	V	1,2	3	4	3	-	10
Допоміжні робітники							
<i>Наладчик</i>	III	1,2	2	1	1	-	4
Спеціалісти та службовці							
<i>Бухгалтер</i>	-	1,2	1	-	-	-	1
Загальна кількість			6	5	4		15

5.5 Розрахунок фонду заробітної плати працюючих

Під час розрахунку фонду заробітної плати визначається обсяг та трудомісткість робіт, рівень кваліфікації і склад персоналу.

Загальний річний фонд заробітної плати розраховується за формулою основної (Фз.о.) та додаткової заробітної плати (Дз):

$$\text{Фз.р.} = \text{Фз.о.} + \text{Дз}; \quad (5.5)$$

$$\text{Фз.р.осн} = \text{Фз.о.осн} + \text{Дз осн} = 520320 + 62438 = 582758 \text{ грн}$$

$$\text{Фз.р.доп} = \text{Фз.о.доп} + \text{Дз доп} = 187315,2 + 22473,82 = 209793 \text{ грн}$$

$$\text{Фз.р.служ} = \text{Фз.о.служ} + \text{Дз служ} = 41625 + 4995 = 46620 \text{ грн}$$

Фонд основної заробітної плати враховує фонд заробітної плати (Фз.пр.) за відпрацьований час згідно з тарифом, а також включає премії та доплати (ПД):

$$\text{Фз.о.} = \text{Фз.пр.} + \text{ПД}; \quad (5.6)$$

$$\text{Фз.о.осн} = \text{Фз.пр.} + \text{ПД} = 433600 + 86720 = 520320 \text{ грн}$$

$$\Phi\text{з.о.доп} = \Phi\text{з.пр.} + \text{ПД} = 156096 + 31219 = 187315 \text{ грн}$$

$$\Phi\text{з.о.спец} = \Phi\text{з.пр.} + \text{ПД} = 34688 + 6937 = 41625 \text{ грн}$$

$$\Phi\text{з.пр.} = T_{\text{ст.}} \times F_{\text{д}} \times R_i ; \quad (5.7)$$

$$\Phi\text{з.пр.осн} = T_{\text{ст.}} \times F_{\text{д}} \times R_i = 20 \times 2168 \times 10 = 433600 \text{ грн}$$

$$\Phi\text{з.пр.доп} = T_{\text{ст.}} \times F_{\text{д}} \times R_i = 18 \times 2168 \times 4 = 156096 \text{ грн}$$

$$\Phi\text{з.пр.спец} = T_{\text{ст.}} \times F_{\text{д}} \times R_i = 16 \times 2168 \times 1 = 34688 \text{ грн}$$

де : $T_{\text{ст}}$ – тарифна ставка за годину згідно з розрядом робіт, грн. ;

$F_{\text{д}}$ - дійсний фонд часу, год. ;

R_i - кількість робітників i – ої професії.

$$\text{ПД} = \Phi\text{з.пр.} \times (\alpha_{\text{ПД}} / 100); \quad (5.8)$$

$$\text{ПД осн} = \Phi\text{з.пр.} \times 20\% = 433600 \times 0.2 = 86720 \text{ грн}$$

$$\text{ПД доп} = \Phi\text{з.пр.} \times 20\% = 156096 \times 0.2 = 31219 \text{ грн}$$

$$\text{ПД осн} = \Phi\text{з.пр.} \times 20\% = 34688 \times 0.2 = 6937 \text{ грн}$$

де: $\alpha_{\text{ПД}}$ - встановлений процент премій та доплат за даними підприємства або 20 %.

Додаткова заробітна плата, яка враховує оплату відпусток, лікарняних, виконання держобов'язків та ін., складає 8 – 12 % фонду основної заробітної плати:

$$D_z = \Phi\text{з.о.} \times (\alpha_{\text{ПД}} / 100) \quad (5.9)$$

$$D_z \text{ осн} = \Phi\text{з.о.} \times 12\% = 520320 \times 0.12 = 62438 \text{ грн}$$

$$D_z \text{ доп} = \Phi\text{з.о.} \times 12\% = 187315,2 \times 0.12 = 22473 \text{ грн}$$

$$D_z \text{ осн} = \Phi\text{з.о.} \times 12\% = 41625,6 \times 0.12 = 4995 \text{ грн}$$

Середньомісячна заробітна плата певної категорії робітників розраховується за формулою:

$$Зс.р. = \Phi з.р. / R_i \times 12 \quad (5.10)$$

$$З с.р. осн = 582758,4 / (10 \times 12) = 4856 \text{ грн}$$

$$З с.р. доп = 209793,02 / (4 \times 12) = 4370 \text{ грн}$$

$$З с.р. спец = 46620,67 / (1 \times 12) = 3885 \text{ грн}$$

де : R_i - число працівників даної категорії;

12 - число місяців у році.

Розрахунок заробітної плати основних робітників

Таблиця 5.4

Професія	Розряд	Кількість	Дійсний фонд часу, год	Тарифна ставка, грн.	Фонд заробітної плати, грн.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Прямий фонд заробітної плати (Фз.пр.)					433600
Премії та доплати (ПД)					86720
Фонд основної заробітної плати (Фз.о.)					520320
Додаткова заробітна плата (Дз)					62438
Загальний річний фонд зарплати (Фз.р.)					582758
Заробітна плата середньомісячна					4856,32

Розрахунок заробітної плати допоміжних робітників

Таблиця 5.5

Професія	Розряд	Кількість	Дійсний фонд часу, год	Тарифна ставка, грн.	Фонд заробітної плати, грн.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Прямий фонд заробітної плати (Фз.пр.)					156096
Премії та доплати (ПД)					31219
Фонд основної заробітної плати (Фз.о.)					187315
Додаткова заробітна плата (Дз)					22473
Загальний річний фонд зарплати (Фз.р.)					209793
Заробітна плата середньомісячна					4370,67

Розрахунок заробітної плати спеціалістів та службовців

Таблиця 5.6

Професія	Розряд	Кількість	Дійсний фонд часу, год	Тарифна ставка, грн.	Фонд заробітної плати, грн.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Прямий фонд заробітної плати (Фз.пр.)					34688
Премії та доплати (ПД)					6937,6
Фонд основної заробітної плати (Фз.о.)					41625,6
Додаткова заробітна плата (Дз)					4995,07
Загальний річний фонд зарплати (Фз.р.)					46620,67
Заробітна плата середньомісячна					3885,06

Загальний фонд заробітної плати персоналу

Таблиця 5.7

Категорії персоналу	Кількість чоловік	Річний фонд заробітної плати, грн.	Середньомісячна заробітна плата, грн.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1.Основні робітники	10	582758	4856
2.Допоміжні робітники	4	209793	4370
3.Спеціалісти та службовці	1	46620	3885
Взагалі по цеху (відділенню)	15	839172	4613

5.6 Розрахунок матеріальних та паливно-енергетичних витрат

При розрахунку матеріальних витрат враховані основні та допоміжні матеріали. До них відносять: воду, газ та інші згідно з технологією виробництва продукції. Потреба в них та питома норма витрат (на калькуляційну одиницю) визначена у матеріальному балансі дипломної роботи з технології виробництва. Вартість річної програми визначають множенням ціни за одиницю продукції на річну потребу.

Розрахунок вартості сировини та матеріалів

Таблиця 5.8

№ з/п	Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Ціна одиниці, грн.	Питома норма витрат	Потреби на річну програму	Вартість річної програми, грн.
1	2	3	4	5	6 (5 x N_p)	7 (4 x 6)
1	Вода	м ³	250	50	7,5	1875
<i>Усього</i>						1875

До палива на технологічні цілі відносяться : вугілля, газ.

До енергії на технологічні цілі відносяться : пара, електроенергія.

Розрахунок вартості сировини та матеріалів

Таблиця 5.9

№ з/п	Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Ціна одиниці, грн.	Питома норма витрат	Потреби на річну програму	Вартість річної програми, грн.
1	2	3	4	5	6	7
1	Газ	м ³	7200	500	180000	129600000
<i>Усього</i>						129600000

Вартість потрібної силової електроенергії на рік визначається за формулою:

$$В_{ен} = В1 \times Рі \times Fд \times Кп \times S \times 0,9 \text{ год}' \quad (5.11)$$

$$В_{ен} = 1,86 * 10 * 7920 * 0,7 * 1 * 0,9 = 92806 \text{ грн,}$$

де : В1 - вартість 1 кВт/год, грн.;

Рі - потужність і – го виду обладнання, кВт;

Fд - дійсний фонд часу роботи обладнання;

Кп - коефіцієнт попиту;

S - кількість обладнання і –го виду;

0,9 - cos φ

Фонд часу роботи обладнання розраховується за формулою:

$$Fд = [Кр - (В + Рк)] \times С \times Д, \text{ год} \quad (5.12)$$

$$Fд = (365 - (21 + 14)) * 3 * 8 = 7920 \text{ год}$$

де : Кр - число календарних днів у році;

В - число вихідних і святкових днів;

Рк - число днів зупинки обладнання на капітальний ремонт;

С - число змін за добу;

Д - тривалість роботи в годинах.

5.7 Розрахунок витрат на утримання та експлуатацію обладнання і цехових витрат

Розрахунок витрат на утримання та експлуатацію обладнання і цехових витрат визначається складанням кошторису, який включає витрати за елементами

Кошторис загальноцехових витрат

Таблиця 5.10

№ з.п	Статті витрат	Сума, грн.	Порядок розрахунку
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	Заробітна плата персоналу	839172	Табл. 5.7
2	Відрахування на соціальні заходи Єдиний внесок на загальнообов'язкове державне соціальне страхування	316367	22 % від п.1
3	Амортизація будівлі (споруди)	10688	
4	Поточний ремонт будівлі (споруди)	22648	
5	Утримання будівлі (споруди)	22333	
6	Витрати на раціоналізацію та винахідництво	15851	1-2 % (Фз.р. основних + Фз.р. допоміжних робітників), табл. 8
7	Витрати на охорону та безпеку праці	634	2-4 % (див. п.6)
8	Інші витрати	61384	3-5 % від суми статей 1-7
<i>Усього</i>		1289081	

5.8 Визначення показників ефективності роботи модульної котельні

1) Продуктивність праці працюючих

$$Пп = N_p / R_p \quad (5.13)$$

$$Пп = 22369/10 = 2236,9 \text{ шт.}$$

де : N_p - річна програма випуску, шт., м² та ін.

R_p - чисельність працюючих, люд.

2) Продуктивність праці робітників

$$Пп = N_p / R_p \quad (5.14)$$

$$Пп = 22369/9 = 2485,44 \text{ шт.}$$

3) Умовно-річна економія

$$E_{у.р.} = (C_1 - C_2) \times N_p, \text{ грн.} \quad (5.15)$$

$$E_{у.р.} = (1289081,2 - 1277081,2 \times 0,12) \times 22369 = 32211360 \text{ грн}$$

де : C_1 - собівартість калькуляційної одиниці продукції на діючому підприємстві грн. ;

C_2 - собівартість калькуляційної одиниці продукції за курсовою роботою, грн.

4) Строк окупності капітальних вкладень від впровадження нової технології:

$$Ток.р. = В_{к.в.} / E_{у.р.}, \text{ років} \quad (5.16)$$

$$Ток.р. = 445978,18 / 32211360 \times 100 = 1,38 \approx 1,5 \text{ року}$$

Впровадження нової технології вважається доцільним (ефективним) за умови:

$Ток.р. < Ток.н.$,

де $Ток.н.$ - нормативний строк окупності капітальних вкладень (6,3 років).

5) Техніко-економічні показники роботи

Таблиця 5.11

№ з/п	Показники	Одиниця виміру	Цифрова характеристика
1	2	3	4
1	Річні витрати тепла	гДж	22369
2	Кількість обладнання	шт.	3
3	Площа цеху	м ²	2324,4
4	Чисельність виробничого персоналу		
	а) основних робітників	люд.	10
	б) допоміжних робітників	люд.	4
	в) спеціалістів та службовців	люд.	1
5	Річний фонд ЗП працівників всього, в т.ч.		
	а) основних робітників	грн.	582758
	б) допоміжних робітників	грн.	209793
	в) спеціалістів та службовців	грн.	46620
6	Середньомісячна зарплата цеху:		
	а) основних робітників	грн.	4856
	б) допоміжних робітників	грн.	4370
	в) спеціалістів та службовців	грн.	3885
7	Продуктивність праці працюючого	шт.	2236
8	Продуктивність праці робітників	шт.	2485
9	Цехова собівартість	грн.	1289081
10	Умовно-річна економія	грн.	32211360
11	Строк окупності	років	1,38

Висновок: Згідно з розрахунками, строк окупності проекту складає приблизно $\approx 1,5$ року, це підтверджує що дана система є репрезентативна та отриманий термін окупності є доцільним та економічно вигідним для використання адаптивних параметрів теплоспоживання у модульній котельні.

Висновок

У дипломному проєктуванні увага приділяється ефективності автоматизованих систем керування у порівнянні з ручними системами управління. Автоматизація процесів дозволяє значно підвищити енергоефективність роботи котельні, зменшити витрати на обслуговування та експлуатацію обладнання. Крім того, автоматизовані системи здатні забезпечити більш стабільну роботу котельні, що знижує ризик поломок та аварій. Це також позитивно впливає на екологічну ситуацію, оскільки автоматизовані котельні працюють з меншими викидами шкідливих речовин завдяки оптимізованому використанню палива.

Алгоритми керування та регулювання відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної роботи модульних котельних установок. Використання цих технологій дозволяє досягти більшої гнучкості та адаптивності в роботі котелень, що особливо важливо для систем, які працюють у змінних умовах навколишнього середовища. В результаті, керування стає більш ефективним, знижуються експлуатаційні витрати, а також підвищується надійність роботи всієї системи.

Також у дипломному проєкті було вивчено оптимальний метод керування котельною системою шляхом розробки інтерфейсу між системою IoT будівлі та Energy Plus. На прикладі термодинамічної моделі котельні початкової школи в Києві перевірено та оцінено ефективність інтелектуального методу керування.

Результати показують, що котельня з інтелектуальним керуванням на основі системи IoT демонструє значний енергозберігаючий ефект при однакових параметрах будівлі та внутрішніх навантаженнях. Це є ідеальною моделлю для енергозбереження в будівлях. Порівняно з традиційним методом фіксованого значення температури на виході, динамічне регулювання котла

може підвищувати температуру на виході при умовах низької зовнішньої температури, а також знижувати її на 2-8°C у більшості випадків. Це дозволяє зекономити 15% від загального споживання газу, вартості газу та викидів вуглекислого газу.

Таким чином, це є ефективним методом енергозбереження та захисту навколишнього середовища. Впровадження та застосування цієї котельної системи опалення та інтелектуальної схеми керування в інших шкільних будівлях Києва має велике значення для енергозбереження та скорочення викидів.

Список використаних джерел:

1. Книги та підручники
 - 1) Кравець П.І. *Системи автоматизації тепlopостачання*. Київ: Либідь, 2018. 356 с.
 - 2) Коваленко Ю.В., Шевченко О.А., Тищенко І.В. *Автоматизовані системи керування теплоенергетичними процесами*. Львів: Світ, 2020. 290 с.
 - 3) Ogata K. *Modern Control Engineering*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. 912 p.
 - 4) Жуковський, А. І., Верещагін, І. А. Адаптивне керування тепловими системами. – Київ: Либідь, 2018. – 210 с.
 - 5) Кривошопка, С. В. Основи теплотехніки та теплоенергетики. Київ: Наукова думка, 2016. – 240 с.
 - 6) Долженко, А. М. Автоматизовані системи контролю та керування в енергетиці. – Одеса: ОНАХТ, 2018. – 240 с.
 - 7) Синявський, В. М. Автоматизація технологічних процесів у теплоенергетиці. – Київ: Техніка, 2017. – 320 с.
 - 8) Коваль, В. О., Сокол, О. Г. Модульні котельні та їх регулювання. – Дніпро: НГУ, 2020. – 212 с.
2. Наукові статті та дослідження
 - 1) Сергієнко М.О., Чорний І.В., Коваленко Т.С. "Моделювання системи керування тепловою потужністю котельної установки на базі PID-регулятора". *Енергетика та автоматизація процесів*, 2019, №3, с. 45–52.
 - 2) Антонов О.Г., Сидоренко В.О. "Аналіз методів адаптивного керування в системах тепlopостачання". *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія енергетика*, 2021, №7, с. 80–86.

3) Lee T., Park J., Cho K. "Adaptive Control in Heat Power Systems Using Fuzzy Logic". *Journal of Process Control*, 2019, vol. 83, pp. 15–25. (дата звернення: 11.10.2024)

4) Zhang Q., Liu J., Wang Y. "Energy Optimization for Modular Boiler Systems Based on Adaptive Control". *Energy and Buildings*, 2022, vol. 250, article ID 111251. (дата звернення: 22.10.2024)

5) Черкасова Т.І., Шишман Н.В., Проблеми забезпечення ефективності модернізації комунальної енергетики URL: http://business-navigator.ks.ua/journals/2018/45_1_2018/45_1_2018.pdf#page=91 (дата звернення: 11.10.2024)

3. Конференційні матеріали

1) Білоус В.М., Шевченко П.П. "Адаптивне керування модульними котельними установками". *Збірник матеріалів конференції з енергетичних технологій та автоматизації процесів*, Київ, 2021, с. 23–28.

2) Kim S., Huang L. "Advanced Control Strategies for Heating Systems with Varying Load Demand". In: *Proceedings of the International Conference on Smart Energy Systems*, 2020. pp. 95–101.

4. Інтернет-ресурси та стандарти

1) ДСН 3.3.6.037-99. *Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку*. Міністерство охорони здоров'я України. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0375-99#Text> (дата звернення: 02.11.2024).

2) ДСН 3.3.6.039-99. *Вібрація. Захист від вібрації. Норми і правила вимірювань*. Міністерство охорони здоров'я України. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-99#Text> (дата звернення: 02.11.2024).

- 3) IEA. *Heat Pumping Technologies for Buildings: A Report by the International Energy Agency*. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/heat-pumping-technologies-for-buildings> (дата звернення: 27.10.2024).
- 4) Saleh, M.M., Shabani, A., Ghadimi, N. "Optimal control of boiler system based on IoT and energy consumption simulation". *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/351842468_Optimal_control_of_boiler_system_based_on_IoT_and_energy_consumption_simulation (дата звернення: 22.10.2024).
- 5) Кушнір В. "Як Україні врахувати енергоефективність у відновленні: п'ять рекомендацій". *Українська енергетика*. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/yak-ukraini-vrakhuvaty-enerhoefektyvnist-u-vidnovlenni-piat-rekomendatsii-02-05-2024> (дата звернення: 09.10.2024).
- 6) *What is an Energy Management System?*. GridX. URL: <https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-an-energy-management-system> (дата звернення: 10.10.2024).
- 7) Hanak, D.P., Kolster, C., Manovic, V. "Energy-efficient control strategies in heating systems". *Energies*, vol. 11, no. 7, 2018, article ID 1678. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1678#B13-energies-11-01678> (дата звернення: 04.11.2024).