

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:
***«Управління розподіленою системою теплопостачання на основі
модельного підходу»***

Виконав студент гр. АКІТ-22ск	_____ Миранков В. В.
Керівник	_____ Савицький О.І..
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 29 » січня 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22ск Миранкову Владиславу Володимировичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Управління розподіленою системою теплопостачання на основі модельного підходу»

затверджено наказом по університету № 106с від 31.01.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 06.06.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 72с., презентація у Microsoft PowerPoint (14 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Савицький О. І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.25</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.25</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.25</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.25</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>03.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2025р.

Керівник _____ / Савицький О. І./

7. **Запевнення:** Я, Миранков Владислав Володимирович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Миранков В. В./

АНОТАЦІЯ

Миранков В. В. Управління розподіленою системою теплопостачання на основі модельного підходу: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 63 с.

Об'єктом дослідження є комп'ютерна модель системи теплопостачання котельної станції населеного пункту, а предметом дослідження — методи, алгоритми та моделі організації автоматизованого управління розподіленою системою теплопостачання.

Метою роботи є створення математичної моделі для подальшої розробки алгоритмів управління системою теплопостачання на основі модельного підходу.

У першому розділі проведено всебічний аналіз розподілених систем теплопостачання з акцентом на блочно-модульні котельні, як об'єкт автоматизації. Розглянуто їх основні характеристики, конструктивні особливості та функціональні можливості. Описано структуру розподіленої системи теплопостачання, що дозволяє оцінити специфіку управління і контролю за тепловою енергією в різних умовах експлуатації.

У другому розділі проведено комплексну розробку математичної моделі досліджуваної системи теплопостачання та її моделювання. Було виконано розрахунок основних параметрів системи, що є необхідною базою для подальшого аналізу та оптимізації роботи теплової мережі, а також розроблено математичну модель розподіленої теплової станції з урахуванням особливостей її роботи.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, БЛОЧНО-МОДУЛЬНА КОТЕЛЬНЯ,
МОДЕЛЬНИЙ ПІДХІД, МОДЕЛЮВАННЯ, РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Миранков В. В.								
Перевір.		Савицький О.І.							3	1
								КНУ АКІТ-22ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	9
1.1 Характеристика об'єкту автоматизації.....	9
1.2 Опис розподіленої системи теплопостачання.....	11
1.3 Приєднання споживачів до систем теплопостачання.....	11
1.4 Аналіз існуючих рішень.....	13
1.5 Експлуатаційні вимоги до БМК.....	18
1.6 Постановка завдань дослідження.....	19
Висновки за розділом.....	20
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ.....	21
2.1 Розрахунок систем теплопостачання.....	21
2.2 Тепловий розрахунок мережі.....	24
2.3 Регулювання теплового навантаження.....	27
2.4 Витрата мережної води.....	30
2.5 Гідравлічний розрахунок.....	30
2.6 Математична модель розподіленої теплової станції.....	34
2.7 Моделювання системи автоматичного керування.....	45
Висновки до розділу.....	47
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	51

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Миранков В.В.			ЗМІСТ	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Савицький О.І.						4	2
						КНУ АКІТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.							

ДОДАТОК А. Операторно-структурна схема Matlab.....	53
ДОДАТОК Б. Результати теплового розрахунку.....	54
ДОДАТОК В. Результати гідравлічного розрахунку	55

					<i>КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Сьогодні перспективним напрямом є комп'ютерне моделювання об'єктів не лише з точки зору наочності та глибокого розуміння процесів, але й раціонального використання ресурсів.

У нашому випадку об'єктом керування є система теплопостачання, основними елементами якої є водогрійний котел малої потужності, споживачі тепла, трубопроводи.

Проектування розподіленої системи теплопостачання є складною математичною задачею, розв'язання якої спрямоване на забезпечення досягнення заданих характеристик розроблюваного об'єкта шляхом оптимізації його робочого процесу через вибір певних режимних і геометричних параметрів, а також їх взаємного узгодження.

Вимоги до ефективності, а також екологічності котелень (низький рівень відходів виробництва та викидів шкідливих речовин) з часом стають жорсткішими.

Стає необхідним моделювання реальних систем і процесів, що відбуваються в системі теплопостачання, для більш точної візуалізації розподілу тепла, можливості прогнозування навантажень на систему опалення, а також оптимального використання ресурсів.

Постійне зростання вартості енергоресурсів і збільшення енергоспоживання висуває на перший план завдання розробки та реалізації державної політики у сфері енергозбереження. А саме — зниження попиту на енергоносії за рахунок підвищення енергоефективності та розвитку нових технологій [1]. Найгостріше питання енергозабезпечення постає в галузі народного господарства, зокрема в комунальному господарстві, і насамперед це характерно для систем теплопостачання житлових та промислових об'єктів.

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Миранков В.В.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О.І.								6	2
Н. Контр.		Маринич І.А.						КНУ АКІТ-22			
Затверд.		Маринич І.А.									

Рішенням даної задачі є використання математичної моделі системи розподілу, оскільки це підвищує енергоефективність роботи станції, а також веде до зменшення антропогенних викидів. На основі математичної моделі створюється імітаційна модель станції, яка дозволяє моделювати розподіл тепла по станції, що, своєю чергою, дає можливість відстежувати температуру в котлоагрегаті з метою забезпечення повного згоряння палива. З'являється можливість контролювати температуру горіння палива без тепловтрат у споживачів або надлишку тепла. Це особливо актуально у моменти різких змін температури повітря.

Під електронною моделлю системи теплопостачання, газопостачання, водопостачання і водовідведення розуміється математична модель цих систем, прив'язана до топографічної основи міста з урахуванням кадастрового поділу території та призначена для моделювання реальних режимів роботи [2].

Від оптимальної експлуатації котельні залежить раціональне використання ресурсів, що впливають на ККД системи загалом.

Об'єктом дослідження є комп'ютерна модель системи теплопостачання котельної станції населеного пункту, а предметом дослідження є методи, алгоритми та моделі організації автоматизованого управління розподіленою системою теплопостачання.

Метою роботи є створення математичної моделі для подальшої розробки алгоритмів управління системою теплопостачання на основі модельного підходу.

Поставлена мета досягається шляхом розв'язання таких основних завдань:

- аналіз існуючих схем теплопостачання та способів управління опаленням комплексу будівель при децентралізованому теплопостачанні;
- розробка системи теплопостачання (теплотехнічний розрахунок системи опалення, гідравлічний розрахунок магістральних трубопроводів);

					<i>КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вибір методу математичного моделювання системи керування розподіленою системою теплопостачання;
- імітаційне моделювання та експериментальні дослідження керування опаленням.

В умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічної безпеки, впровадження сучасних методів управління системами теплопостачання є надзвичайно важливим. Традиційні підходи до розподілу тепла не дозволяють оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов, що призводить до перевитрат енергії, втрати тепла або, навпаки, до перегріву систем. Розробка та впровадження математичних і імітаційних моделей системи теплопостачання дозволяє оптимізувати її роботу, підвищити ККД котельні, зменшити антропогенні викиди та забезпечити стаке і ефективне теплозабезпечення населених пунктів. Особливо актуальним є застосування таких моделей у періоди різких коливань температури повітря, коли необхідно точно контролювати температурний режим без тепловтрат чи надлишків. Отже, дослідження методів автоматизованого управління розподіленими системами теплопостачання має вагоме практичне значення для енергетичного сектору та житлово-комунального господарства.

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Характеристика об'єкту автоматизації

На даний час на виробничих об'єктах часто встановлюють блочно-модульні котельні (БМК). БМК є найбільш економічними та регульованими системами теплопостачання, зазвичай їх застосовують для теплопостачання та гарячого водопостачання об'єкта. Стаціонарні котельні представляють собою окремо розташовані будівлі або вбудовані у комплекс споруд.

Цей тип котелень не є повністю автономним, оскільки вони пов'язані з централізованими системами постачання палива. На котельній станції, розташованій на газокompресорній станції, як паливо використовується природний газ, резервним видом палива може бути рідке паливо (мазут, дизель). Транспортабельна блочно-модульна котельна установка обслуговує групу будівель, розташованих на об'єкті.

У котельнях потужністю до 2,5 МВт все обладнання розміщують в одному контейнері (блоці), якщо потрібна більша потужність, тоді об'єднують кілька блоків у групу для забезпечення необхідної потужності [3]. Потужність досліджуваної котельні становить 5 МВт, котельня складається з 6 окремих транспортабельних модулів-будівель. Приклад блочно-модульної котельні наведено на рисунку 1.1

Перевагами БМК є те, що котельні даного типу складаються з двох каркасних блок-модулів, обшитих сендвіч-панелями, які стикуються вже на будівельному майданчику.

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Миранков В.В.			РОЗДІЛ I			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О. І								8	15
								КНУ АКІТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									



Рисунке 1.1 – Блочно-модульна котельня

Ці котельні мають хорошу якість виконання. Завдяки модульному складанню котелень на виробництві скорочується час їх монтажу на об'єкті. В середньому, на установку котельні потужністю 2 МВт йде від 3 до 5 днів, тоді як будівництво стаціонарної котельні триває від 4 місяців і більше.

Більшість таких котелень не потребує постійної присутності персоналу, оскільки вони є повністю автоматизованими. Технічне обслуговування та ремонт таких котелень здійснюють спеціалізовані акредитовані організації. Ці котельні мають менші габаритні розміри, ніж стаціонарні (рисунок 2.1), що сприяє зниженню собівартості виробленої теплової енергії за рахунок більш близького розміщення до об'єкта [11].

Відпуск тепла тепла споживачам на станції здійснюється за допомогою трубопроводу, що подає.

1.2 Опис розподіленої системи теплопостачання

До кожної системи опалення входить наступне: джерело теплової енергії, тепла мережа, абонентські вводи та місцеві системи споживачів тепла.

Системи теплопостачання класифікують за такими ознаками: джерело тепла; за видом теплоносія (вода, пар); за кількістю трубопроводів теплових мереж; за способом забезпечення споживачів тепловою енергією та ін.

За джерелом тепла розрізняють три типи систем теплопостачання:

- 1) централізоване теплопостачання, наприклад, від ТЕЦ;
- 2) централізоване теплопостачання від котелень централізованого теплопостачання та промислового опалення;
- 3) децентралізоване теплопостачання для невеликих котелень, індивідуальних опалювальних печей.

У цій кваліфікаційній роботі розглядається централізована система теплопостачання, яка складається з блочно-модульної котельної, що використовується на промисловому об'єкті.

1.3 Приєднання споживачів до систем теплопостачання

Ефективність системи теплопостачання значною мірою залежить від схеми підключення абонентського вводу, за якою здійснюється зв'язок між магістральними тепловими мережами та місцевими споживачами тепла. Схеми підключення локальних систем опалення можна розділити на залежні та незалежні за ознакою гідравлічного підключення.

Залежними вважаються ті системи, у яких теплоносій надходить безпосередньо з теплових мереж. Іншими словами, теплоносій циркулює по системі опалення і тепловій мережі. Тому тиск у місцевих теплових мережах визначається режимом тиску у зовнішніх теплових мережах.

В незалежних схемах підключення мережа і система опалення розділені поверхнею нагріву, тобто гідравлічно ізольовані одна від одної. Гідравлічна

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ізоляція теплоносіїв застосовується для захисту локальних установок від надлишкового або зниженого тиску в теплових мережах, при яких можливе руйнування опалювальних приладів або спорожнення місцевих теплових мереж.

Схеми приєднання споживачів до магістрального трубопроводу показані на рисунку 1.1.

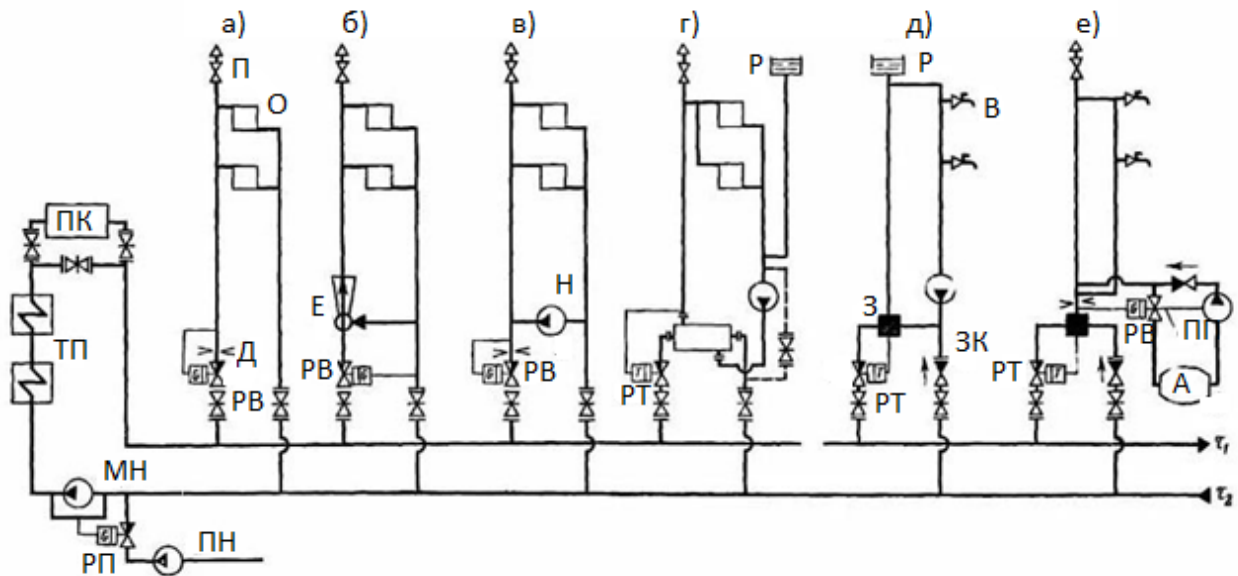


Рисунок 1.2– Схеми приєднання місцевих систем опалення та гарячого водопостачання у двотрубних водяних системах

На рисунку 1.2 прийняті наступні позначення: а – з елеваторним змішуванням; б - з насосним змішуванням; в – незалежна схема опалювальної системи; г – схема системи гарячого водопостачання із верхнім баком-акумулятором; П – повітряний кран; О – опалювальний прилад; Р – розширювальний бак; В – водозабірний кран; Д – вимірювальна діафрагма; Е – елеватор; Н – циркуляційний насос місцевої системи; З – змішувач; ПК – піковий казан; ТП – теплофікаційний підігрівач; МН., ПН – мережевий та підживлювальний насоси; РП, РВ., РТ – регулятори підживлення, витрати та температури; ЗК – зворотний клапан; τ_1 , τ_2 – подавальний та зворотний трубопроводи

Основним недоліком залежного приєднання споживачів є те, що тиск теплоносія в теплових мережах передається на прилади місцевих систем. Виходячи з цього, місцеві системи опалення використовуються в умовах, коли тиск у теплових мережах не перевищує міцність опалювальних приладів.

Якщо температура мережної води у подаючому трубопроводі більше 95–105 °С, а різниця тисків у подаючому та зворотному трубопроводах достатня (0,08–0,15 МПа) для нормальної роботи елеватора, тоді опалювальні системи підключаються за схемою «а». Необхідна температура води, що подається до нагрівальних приладів, підтримується елеваторним підмішуванням охолодженої зворотної води з системи опалення до високотемпературної мережної води з подаючого трубопроводу. Цю схему застосовують для опалення житлових та громадських будівель.

Схема «б» використовується замість схеми «а», якщо різниця тисків у подаючому і зворотному трубопроводах на абонентському вводі недостатня для стандартної роботи елеватора.

У розподільній тепловій станції застосовується залежна схема приєднання. Кількість споживачів — 13, подаючий і зворотний трубопроводи розділені на 24 ділянки різного діаметру. Розміри діаметрів трубопроводів наведені у таблиці разом з довжиною ділянок і масовим витратою через кожен діаметр трубопроводу.

1.4 Аналіз існуючих рішень

На даний момент актуальним завданням є впровадження інформаційних технологій у сфери управління та розвитку галузей інженерно-енергетичного комплексу [3]. Необхідність впровадження інформаційних технологій в інженерно-енергетичні комплекси обумовлена національною орієнтацією на розвиток інформаційного суспільства [4].

Впровадження інтелектуальних технологій дозволяє економно використовувати паливні ресурси, скорочувати втрати теплової та електричної

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

енергії, підвищувати надійність системи теплопостачання, що, своєю чергою, позитивно впливає на вартість тарифів.

Також однією з основних проблем дослідники [5] виокремлюють тепловтрати, пов'язані з підвищенням температури зовнішнього повітря або надмірною кількістю тепла наприкінці опалювального сезону. Зазначені проблеми виникають з таких причин: складність адекватної оцінки поточної ситуації, а також складність прогнозування наслідків активних керувальних дій у тепловій мережі оперативним персоналом; закономірні зміни мережевої структури (приєднання нових споживачів, нових джерел тепла), що призводять до втрати оперативного контролю за станом об'єкта.

У [5] представлено роботу зі створення автоматизованої системи диспетчерського управління та обліку теплової енергії на основі сучасного обладнання. Основним завданням, яке вирішують автори, є підвищення ефективності децентралізованого опалення комплексу будівель з автоматизованим індивідуальним тепловим пунктом та водострумними елеваторними вузлами шляхом управління розподіленими енергосистемами. Достовірність досліджень автори підтверджують програмною реалізацією та впровадженням.

Основною проблемою систем теплопостачання, яку виокремлюють автори, є гідравлічна нестабільність, яка потребує постійного контролю та підтримання сталої витрати теплоносія [5]. Як відомо, змінне значення витрати призводить до гідравлічного розбалансування системи — припиняється подача теплоносія в окремі стояки, і опалення підключених до них споживачів зупиняється. Авторам вдалося досягти економії теплової енергії для будівель з індивідуальним тепловим пунктом на рівні 6,28%, а також зменшення витрати теплоносія. Водночас автори відзначають похибку системи в межах $\pm 5\%$. Поряд із перевагами методу вказується і недолік системи — можливість виникнення перетопу за певних умов розподілу витрат теплоносія.

У джерелі [6] автор вирішує задачу забезпечення максимальної комфортності мікрокліматичних умов у складно структурованих об'єктах з

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різними теплоенергетичними характеристиками за суперечливих температурних умов за допомогою сенсорних мереж. Цей підхід відрізняється від підходу до розв’язання задачі розподілу температури серед споживачів, який реалізовано в цій магістерській роботі.

У [6] описано методологію управління розподіленням тепlopостачанням будівель з використанням імітаційного моделювання в поєднанні з автоматизованою системою оперативного управління, побудованою на основі сенсорних мереж. Автор зазначає, що основною перевагою сенсорних мереж є отримання вичерпної інформації про функціонування окремих елементів управління тепlopостачанням. Це, своєю чергою, дозволяє більш повно отримувати інформацію про об’єкт тепlopостачання з урахуванням індивідуальних особливостей його елементів і зовнішніх збурень, які на них впливають, а також виявляти внутрішні взаємозв’язки між елементами об’єкта. У роботі також використовується інформація про кожне приміщення в будівлі, що дозволяє отримати більш адекватну оцінку поточного стану як окремих приміщень, так і будівлі в цілому. Однак недоліком наведеної моделі є складність оптимального використання великого обсягу даних в управлінні, особливо коли йдеться про управління тепlopостачанням всієї будівлі. Інакше кажучи, надлишковість вхідних даних ускладнює аналіз оптимального керування об’єктом.

Автори [7] дослідили особливості ефективного автоматизованого управління процесом централізованого тепlopостачання розподіленого комплексу будівель. На основі імітаційного моделювання та експериментальних даних вони демонструють варіанти можливого часткового перерозподілу теплоносія між об’єктами комплексу, які в цілому призводять до зниження економічної ефективності автоматизованого управління. Впровадження системи управління дозволило знизити оплату за теплову енергію на 22%. Проте варто враховувати, що впровадження системи проводилося в помірного кліматичному поясі, де середньорічна температура становить $-6,6^{\circ}\text{C}$. Водночас основним недоліком системи є її обмежена

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

ефективність у певних температурних зонах, оскільки, як зазначають автори, при середньодобовій температурі нижче -9°C енергозбереження не спостерігалось [6].

В роботі [7] проводять дослідження щодо підвищення ефективності роботи котельної станції, що, своєю чергою, залежить від оперативного реагування на зміни в системі, постійного підтримання заданих параметрів, а також має на меті зниження й запобігання аварійним ситуаціям. Автор працював над управлінням налаштуваннями регулювання тиску мережевої води. Програма, реалізована в джерелі [7], написана мовою програмування C# з використанням стандартних бібліотек. Архітектура інтерфейсу інформаційної системи підігріву води на станції являє собою сукупність кількох екранів, на кожному з яких представлений відповідний функціонал.

Сильною стороною цієї програми є те, що вона вирішує такі питання:

- зниження аварійності;
- ергономічне використання енергії зокрема, електроенергії, пари та тепла;
- економія витрат на заробітну плату.

Вузькими місцями даної системи є те, що її використання можливе лише на операційній системі Windows, версією не нижче 7.

Автори [8] проводили дослідження впливу систем автоматизації будівель на споживання енергії для опалення та охолодження шляхом управління робочою схемою будівлі. Дослідники розробляли методологію інтеграції різних систем будівлі, таких як теплові насоси, котел і сонячні колектори, із їхніми робочими схемами через систему автоматизації, а також досліджували різні сценарії управління з метою порівняння за допомогою різного програмного забезпечення. Енергетичну модель будівлі було підготовлено в TRNSYS, а умови сценаріїв прописані в MATLAB для імпорту в TRNSYS за допомогою спеціального компонента, який є мостом між MATLAB і TRNSYS. Надалі динамічне погодинне моделювання для зміни заданих значень теплових умов у приміщенні інтегрується за допомогою інструментів нечіткої логіки ?

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MATLAB. Автори змогли отримати дані щодо впливу системи автоматизації на енергоефективність будівлі. Також було досягнуто економії теплової енергії. Згідно з результатами [8], економія теплової енергії між сценаріями Fuzzy та Base Case склала приблизно 10,37 % (166 000 кВт·год), тоді як для сценаріїв Fuzzy та ICT — 4,46 % (65 000 кВт·год).

Окрім моделювання споживачів тепла, ключовим елементом є математична модель водогрійного котла. Більшість попередніх досліджень були зосереджені на детальних методах розрахунку, що створює обмеження для конкретних випадків і надалі викликає труднощі при застосуванні цих методів у загальному підході. Автори [9] вказали на кілька недоліків існуючих моделей. По-перше, зазначається надмірне спрощення або ігнорування теплової динаміки в різних підходах до моделювання. По-друге, багато моделей базуються лише на лінійних кривих ефективності, побудованих за двома робочими точками, наданими виробниками для стабільної роботи обладнання. По-третє, фіксовані співвідношення сухого й вологого теплообмінників, що відповідають двом режимам теплопередачі в конденсаційних котлах, обмежують гнучкість моделі.

У дослідженні [10] автори розглядають конденсаційний котел і моделюють явища теплопередачі, створюючи гібридну динамічну модель. Одним із головних завдань було забезпечити повне згоряння метану за фіксованого значення сухого надлишкового повітря. У цьому дослідженні регулюються дві температури води: що надходить у котел та на виході з нього, оскільки режим роботи котла залежить саме від вхідної температури.

У своїй роботі автори [11] розробили підхід до моделювання, який базується на повному згорянні метану з постійним значенням 15 % сухого надлишкового повітря. Окрім зазначеного завдання, автори також розглядали прогнозування ефективності роботи котла залежно від обраних параметрів. Це дослідження дало змогу підвищити ефективність роботи котла завдяки кращому контролю параметрів. Запропонований підхід може бути адаптований

не лише для конденсаційних котлів, а й для водогрійних жаротрубних котлів шляхом відповідної перебудови математичної моделі.

1.5 Експлуатаційні вимоги до БМК

До блочно-модульним котельним пред'являє наступні вимоги:

- експлуатація БМК здійснюється підготовчим теплоенергетичним персоналом. Допускається проводити експлуатацію БМК спеціалізованою організацією;
- відповідальний за справний стан та безпечну експлуатацію призначається розпорядчим документом (наказом) керівника організації з числа управлінського персоналу та спеціалістів організації; Основними завданнями персоналу є:
- підтримання обладнання в стані експлуатаційної готовності та забезпечення максимальної надійності та економічності виробництва теплової енергії;
- виконання вимог вибухо та пожежобезпеки, виробничої санітарії та безпеки праці;
- дотримання заданих режимів теплопостачання.

Комплексне випробування котельного обладнання повинно проводитися на основному паливі з номінальним навантаженням і проектними параметрами при безперервній роботі протягом 72 годин з одночасною або по черзі роботою допоміжного обладнання.

Вимірювання загального об'єму газу, що споживається котельнею, архівування даних про витрату, тиск і температуру газу, формування звіту здійснюються вузлом обліку з електронним коректором і витратоміром, встановленими на ввіді газу, перед газовою пальником.

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Для обліку теплової енергії, відпущеної з котельні в систему опалення, та архівування даних використовувався теплолічильник з установкою електромагнітних витратомірів і датчиків температури на подаючому і зворотному трубопроводах системи опалення, а також датчик температури на вихідному водопроводі.

1.6 Постановка завдань дослідження

На даний час одним із найважливіших напрямків для нашої країни є модернізація систем автоматичного управління тепловими станціями. Оскільки якість управління впливає на багато факторів, наприклад, можливість постійного моніторингу станції, підтримання заданих параметрів дозволяє зменшити виникнення аварійних ситуацій, з'являється можливість прогнозування навантаження на систему теплопостачання. Поряд із вищезазначеним виникає можливість ергономного використання паливних ресурсів, що, у свою чергу, призводить до зменшення плати за тариф.

Підсумовуючи проведений огляд сучасних засобів автоматизації, можна підкреслити популярність цього напрямку. Відзначена тенденція більшого використання нейронних мереж, які дозволяють гнучкіше управляти тепловими станціями.

Вищезазначені дослідження опубліковані у період з 2008 по 2022 рік, що підтверджує сказане вище щодо актуальності розгляду питання автоматизації. Тенденція зростання нових технологій свідчить про зацікавленість населення до більш розумного використання викопних ресурсів.

З виділених проблем, які вирішуються шляхом використання нововведень, можна виділити наступне:

- повнота згорання палива;
- зменшення аварійних ситуацій;
- ефективне розподілення тепла між споживачами;

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- усунення деяких вузьких місць на магістральних трубопроводах шляхом постійного моніторингу тиску;
- зменшення тарифної плати.

Поряд з переліченими вище перевагами залишаються такі питання:

- гнучкість використання розробленого програмного забезпечення;
- програма автоматизації моделюється під конкретного замовника (складність у широкому використанні);
- складність оптимізації параметрів при вичерпних факторах системи (безліч вхідних даних створює низку питань при аналізі системи).

Висновки за розділом:

У розділі проведено всебічний аналіз розподілених систем теплопостачання з акцентом на блочно-модульні котельні (БМК) як об'єкт автоматизації. Розглянуто основні характеристики БМК, їх конструктивні особливості та функціональні можливості в контексті сучасних систем теплопостачання. Описано структуру розподіленої системи теплопостачання, зокрема механізми приєднання споживачів, що дозволяє оцінити специфіку управління і контролю за тепловою енергією в різних умовах експлуатації.

Проаналізовано існуючі рішення, що застосовуються для автоматизації та оптимізації роботи систем теплопостачання, з урахуванням їх переваг і недоліків. Визначено основні експлуатаційні вимоги до блочно-модульних котелень, що є ключовими для забезпечення надійної, ефективної та безпечної роботи системи. На основі проведеного аналізу сформульовано конкретні завдання дослідження, що спрямовані на вдосконалення автоматизованих систем управління теплопостачанням.

					КНУ КРБ.151.25.03.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Розрахунок систем теплопостачання

Система теплопостачання являє собою сукупність розподілених теплообмінних пристроїв і включає в себе виробництво, транспортування та споживання теплової енергії. Елементи системи водяного опалення поділяють за видами теплопередачі (випромінювання, теплопровідність, конвекція) та за узгодженням потоків середовищ (прямоточна, зустрічна, перехресна течія). Процес динаміки кожного з елементів описується диференціальними рівняннями [11–13].

Знехтувавши незначною зміною маси теплоносія, можемо сказати, що зміна його температури буде пропорційною кількості тепла:

$$cm dT = Q_k + Q_\lambda + Q_{iz} + Q_k + Q_T \quad (2.1)$$

Вираз dT у першому рівнянні (2.2) є диференціал:

$$dT = \frac{\partial T_i}{\partial T} + W_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} \quad (2.2)$$

де w_i - проекції вектора швидкості теплоносія.

Для кожного з елементів системи теплопостачання можна отримати систему диференціальних рівнянь у часткових похідних шляхом підстановки значень Q_k , Q_λ , Q_{iz} , Q_ϕ , Q_T та dT у вираз (2.1).

					<i>КНУ КРБ.151.25.03.02.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Миранков В. В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О. І.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКИТ-22ск</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						25	37

Речовина розглядається як неперервне суцільне середовище, характеристики процесів переносу — це неперервні функції координат і часу, а відповідні диференціальні рівняння випливають із законів збереження.

Сумарні витрати підведеного та відведеного тепла шляхом конвекції описуються наступним рівнянням:

$$Q_k = \pm \sum_{i=1}^n a_i * F_i * (T_i - T_{i-1}) \quad (2.3)$$

Сумарна теплопровідність описується рівнянням:

$$Q_\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i * F_i * \frac{\delta^2 T_i}{\delta x_i^2} \quad (2.4)$$

Витрата теплоти, підведеної і відведеної шляхом випромінювання:

$$Q_{iz} = \pm \sum_{i=1}^n F_i * q_i(t) \quad (2.5)$$

Витрата теплоти, підведеної та відведеної шляхом фільтрації, знаходиться за формулою:

$$Q_k = \pm \sum_{i=1}^n k_{\phi i} * F_i * (T_i - T_{i-1}) \quad (2.6)$$

де a_i – коефіцієнт тепловіддачі;

F_i – поверхня теплообміну;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності середовища;

x – просторова координата;

q_i – питомий тепловий потік;

$k_{\phi i}$ – коефіцієнт фільтраційного теплообміну.

					КНУ КРБ.151.25.03.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

У більшості підходів розглядається статична система без урахування динамічних характеристик системи опалення з точки зору збурення та регулювання. Об'єкт керування є інерційним, унаслідок чого виникає необхідність регулювання із запізненням відносно зміни клімату. Для усунення цього та розробки раціональної системи керування процесом подачі теплової енергії в систему опалення імітаційне моделювання використовується для вирішення таких завдань [1.4]:

- аналіз впливу температури зовнішнього повітря на внутрішній клімат будівель;
- проектування системи керування подачею теплоносія з урахуванням динамічних властивостей за каналами керування та збурення; перевірка розроблених алгоритмів систем керування.

Для імітаційного моделювання часто застосовується інструмент візуального моделювання Simulink, який є модулем розширення математичного пакета Matlab. Simulink дає змогу імітувати динамічні системи та досліджувати їхню працездатність за допомогою графічних блоків [15].

Під час розгляду існуючих методів і математичних моделей, що застосовуються для опису процесів теплопостачання будівель, задачі тепломасообміну описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних. Однак отримати аналітичне розв'язання цих рівнянь у загальному вигляді неможливо, тому для врахування динамічних процесів у системі за каналами збурення й керування, а також для розробки ефективної системи керування процесом опалення будівель доцільно застосовувати імітаційне моделювання, наприклад, на основі Matlab Simulink.

Таким чином, для ефективного керування теплопостачанням комплексу будівель за умов теплозабезпечення від автономного джерела тепла, забезпечення економії та раціонального використання енергоресурсів необхідно зробити акцент на розробку web-орієнтованих систем керування інженерними системами будівель, заснованих на експериментальних дослідженнях та імітаційному моделюванні динамічних процесів, що

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбуваються в системі теплопостачання.

2.2 Тепловий розрахунок мережі

Тривалість опалювального періоду: розрахунковий період роботи системи опалення будівлі, що являє собою середньостатистичну кількість діб на рік, коли середньодобова температура зовнішнього повітря стійко дорівнює або нижча за 8°C чи 10°C залежно від типу будівлі: $n_o = 218$ діб [16]

Розрахункові параметри:

- $t_{н.о} = -43$ °C температура зовнішнього повітря найхолоднішої п'ятиденки [16];
- $t_n = 8$ °C температура зовнішнього повітря початку та закінчення опалювального періоду;
- $t_g = 55$ °C температура гарячої води [17];
- $t_{хз} = 5$ °C температура холодної води;
- $V_H = 34395$ м³ об'єм споживачів;
- $t_g = 18$ °C температура повітря в приміщенні.

Розрахункове теплове навантаження опалення Q_o' визначають за формулою:

$$\begin{aligned} Q_o' &= q_o \cdot V_H \cdot \alpha(t_n - t_{н.о.}) = 0,407 \cdot 34395 \cdot 0,90(18 + 43) \\ &= 0,794 \text{ МВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (2.7)$$

де q_o – питома теплова характеристика будівлі для розрахунку опалення, Вт/(м³·°C).

Для кожної будівлі питома теплова характеристика є індивідуальною та приймається залежно від об'єму будівлі та її призначення за довідковими даними, $q_o = 0,417$ [17]; α – коректуючий коефіцієнт.

Для населеного пункту при $t_{н.о.} = -43$ °C, $\alpha = 0,90$ [17].

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункове теплове навантаження на вентиляцію $Q'_в$, Вт:

$$Q'_в = q_в \cdot V_н \cdot \alpha(t_в - t_{х3}) = 0,186 \cdot 34395 \cdot 0,90(55 - 5) = 0,363 \text{ МВт ч} \quad (2.8)$$

Теплове навантаження на водопостачання у неопалювальний (літній) період $Q_{гвс}^3$, Вт знаходиться за:

$$Q_{гвс}^л = Q_{гвс}^3 \cdot \beta \cdot \frac{(t_r - t_x^л)}{(t_r - t_x^3)} = 0,015 \cdot 1 \cdot \frac{(55 - 15)}{(55 - 5)} = 0,013 \text{ МВт} \quad (2.9)$$

де $t_x^л$ – температура холодної води у літній період

Сумарне теплове навантаження визначається таким чином за:

$$\Sigma Q = Q'_0 + Q'_в + Q'_{з*гвс} = 0,13 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (2.10)$$

Річний витрата тепла на опалення визначаємо за формулою:

$$Q_0^{\text{год}} = Q'_0 \cdot \frac{t_в - t_{\text{ср.0}}}{t_r - t_{\text{н.0}}} \cdot n_0 \cdot 24 = 189 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (2.11)$$

Річний витрата тепла на вентиляцію розраховуємо за формулою:

$$Q_в^{\text{год}} = Q'_в \cdot \frac{t_в - t_{\text{ср.0}}}{t_r - t_{\text{н.0}}} \cdot n_0 \cdot 24 = 86,75 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (2.12)$$

Сумарну річну витрату теплової енергії знаходимо за формулою:

$$Q_{\text{год}} = Q_0^{\text{год}} + Q_в^{\text{год}} = 281,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (2.13)$$

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі знаходимо теплове навантаження у опалювальний період навантаження на опалення при $t_n = 8^\circ\text{C}$ визначається за формулою:

$$Q_o^{+8} = Q'_o * \frac{t_b - t_n}{t_b - t_{n,0}} = 0,794 * \frac{20 - 8}{20 - (-43)} = 0,015 \text{ МВт} \quad (2.14)$$

Навантаження на вентиляцію $t_n = 8^\circ\text{C}$ знаходиться за формулою:

$$Q_b^{+8} = Q'_b * \frac{t_b - t_n}{t_b - t_{n,0}} = 0,0069 \text{ МВт} \quad (2.15)$$

Сумарне теплове навантаження визначається за формулою:

$$\Sigma Q = Q_b^{+8} + Q_o^{+8} + Q_{\text{ГВС}}^{\text{max}} \quad (2.16)$$

Пораховані дані для зручності зведені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Зміна теплового навантаження в залежності від температури зовнішнього повітря

$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	Витрата теплоти, МВт		Сумарне навантаження
		Опалення	Вентиляція	
-43	18	0,7685	0,3531	1,13556
-40		0,7305	0,3357	1,08
-35		0,677	0,3068	0,9977
-30		0,6047	0,2779	0,8957
-25		0,5418	0,2489	0,8047
-20		0,4788	0,22	0,71276
-15		0,4158	0,191	0,6207
-10		0,3528	0,1621	0,5289
-5		0,2898	0,1331	0,4369
0		0,2268	0,1042	0,34496
8		0,126	0,0578	0,1977

Графік за таблицею 2.1 наведено на рисунку 2.1

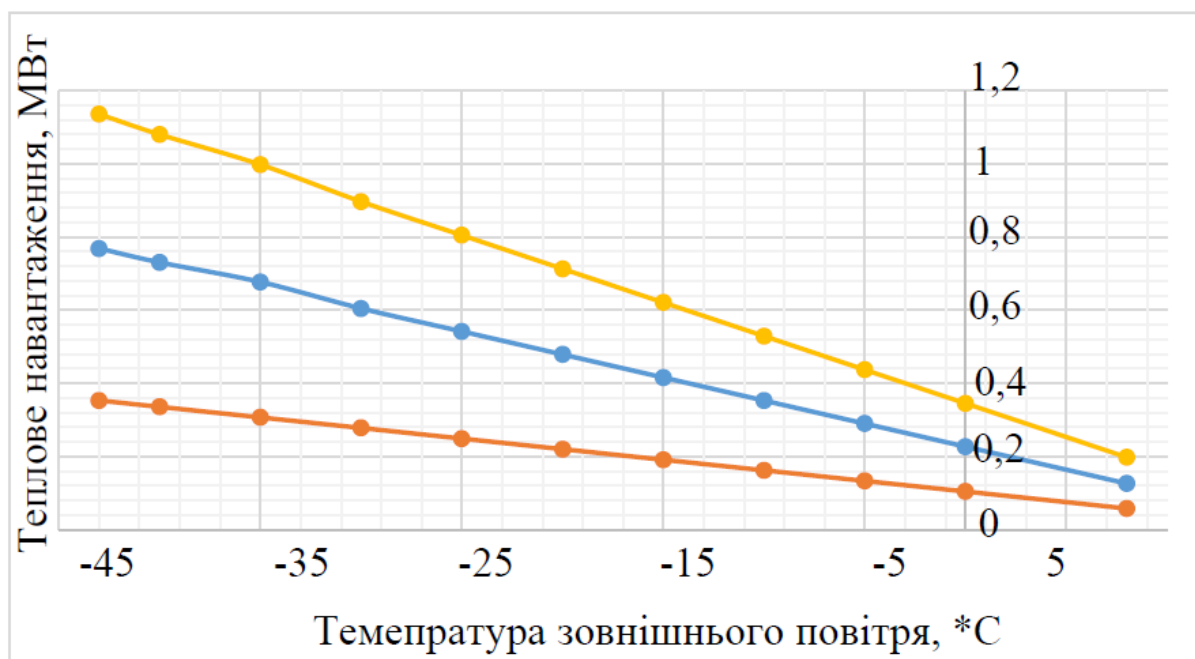


Рисунок 2.1 – Графік теплового навантаження у опалювальний період

Теплові навантаження для кожного споживача наведені в Додатку В: таблиці В1 і таблиці В2.

З графіка, зображеного на рисунку 2.1, помітна лінійна зміна навантаження при збільшенні температури зовнішнього повітря, що свідчить про правильність теплового розрахунку.

2.3 Регулювання теплового навантаження

Температура води, що подається в систему опалення до споживача, прийнята 90 °C відповідно до рекомендацій СП 347.1325800.2017, у пункті 1.1, температура теплоносія в зворотній лінії теплової мережі прийнята 70 °C відповідно до температурного графіка 95/70:

$\tau'_{01} = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — температура води в подаючій лінії теплової мережі [18];

$\tau'_{02} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — температура теплоносія в зворотній лінії теплової мережі;

$\tau'_{03} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — температура води, що подається в систему опалення до споживача [4].

Перепад температур у тепловій мережі знаходимо за формулою:

$$\delta\tau'_0 = \tau'_{01} - \tau'_{02} = 95 - 70 = 25^\circ\text{C} \quad (2.17)$$

Різниця температур у системі опалення у споживача перебуває за формулою:

$$\theta t'_0 = \tau'_{01} - \tau'_{02} = 95 - 70 = 25^\circ\text{C} \quad (2.18)$$

Температурний напір нагрівального приладу визначається за формулою:

$$\Delta t'_0 = \frac{\tau'_{03} + \tau'_{02}}{2} - t_B = \frac{90 + 70}{2} - 20 = 60^\circ\text{C} \quad (2.19)$$

Відносна величина теплового навантаження знаходиться як відношення навантаження на опалення при 8 градусах вище нуля до розрахункового теплового навантаження визначається за формулою:

$$\overline{Q_o} = \frac{Q_o}{Q'_o} \quad (2.20)$$

Температура води в лінії подачі визначається за формулою:

$$\tau_{01} = t_B + \Delta t'_0 * \overline{Q_o}^{0,8} + \overline{Q_o}(\delta\tau'_0 - 0,5 * \theta'_0) = 64,68^\circ\text{C} \quad (2.21)$$

Температура води у зворотній лінії (повторна вода на котел) визначається за формулою:

$$\tau_{01} = t_B + \Delta t'_0 * \overline{Q_o}^{0,8} - 0,5 * \overline{Q_o} * \theta'_0 = 63,727^\circ\text{C} \quad (2.22)$$

					<i>КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Пораховані дані зведені до таблиці 2.2.

Таблиця 2.3. Зміна температури в залежності від зовнішнього повітря

$t_n, ^\circ C$	-43	-40	-35	-30	-25	-20	-16,3	-15	-10	-5	0	8
Q_o, MBm	0,77	0,73	0,67	0,6	0,54	0,47	0,43	0,42	0,35	0,29	0,23	0,12
$\bar{Q}_0$	1	0,95	0,87	0,79	0,7	0,62	0,56	0,54	0,45	0,38	0,3	0,16
$\tau_{01}, ^\circ C$	95	91,7	86,2	80,6	74,9	69,2	65	63,3	57,4	51,3	44,9	34,3
$\tau_{02}, ^\circ C$	60	58,4	55,7	53,06	50,3	47,4	45,27	44,4	41,3	38,06	34,6	28,6

Графічне подання зміни температури в трубопроводі, що подає і зворотному, представлені на рисунку 2.2.

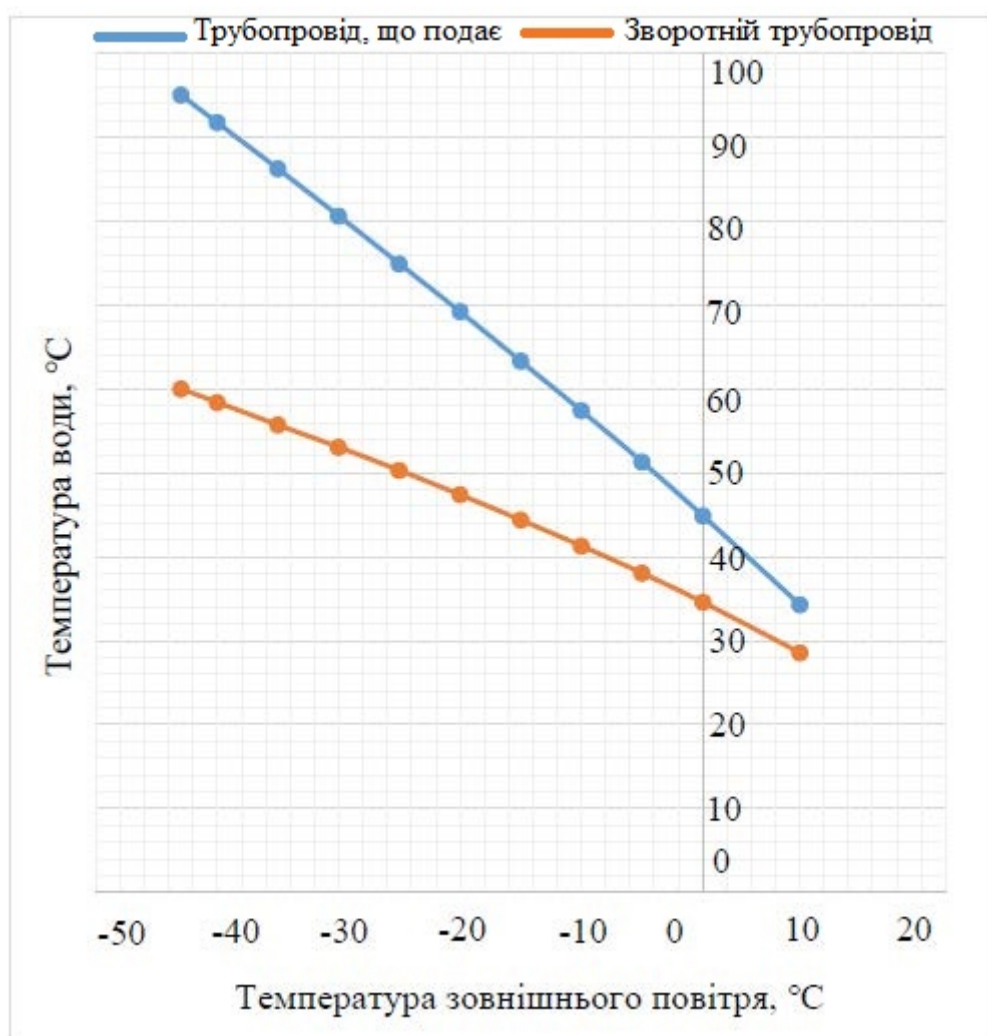


Рисунок 2.2 – Температури теплоносія при якісному регулюванні по опалювальному навантаженню

2.4 Витрата мережної води

Відповідно до СП 60.13330.2012 «Опалення, вентиляція і кондиціонування повітря» підрізка графіка виконується при температурі 65 °С для задоволення потреб споживачів у гарячому водопостачанні..

$$t_n = -16,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\tau''_{01} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\tau''_{02} = 45,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Таблиця 2.3 – Розрахунок витрати мережної води

Параметри	Формула	Значення
Витрата мережної води в інтервалі температур від t_n до $t_{n.o}$, т/ч	$Q_o^{+8} = \frac{Q'_o}{c_p \cdot \delta \tau'_0}$	2,73
Витрата мережної води на опалення при температурі вище 8 °С, кг/с	$Q_o^{+8} = \frac{Q'_o}{c_p (\tau''_{01} - \tau''_{02})}$	3,98
Витрата мережної води на вентиляцію при температурі вище 8 °С	$Q_b^{+8} = \frac{Q'_b}{c_p \cdot \delta \tau'_0}$	0,35
Витрата мережної води на вентиляцію при температурі вище 8 °С	$Q_b^{+8} = \frac{Q'_b}{c_p (\tau''_{01} - \tau''_{02})}$	1,82

2.5 Гідравлічний розрахунок

Основним завданням гідравлічного розрахунку трубопроводів є визначення втрат тиску при заданих витратах теплоносія або визначення пропускної здатності трубопроводів при заданому наявному перепаді тиску [19].

Діаметри трубопроводів у нас вже задані. Оскільки станція знаходиться в робочому стані, ми можемо прийняти існуючі діаметри труб. Розрахунок втрат тиску наведено нижче.

Поряд з вищезазначеним задані витрати теплоносія в трубопроводах.

У таблиці 3 наведені наступні характеристики ділянок, всі ділянки пронумеровані, схема станції наведена у додатку А.:

- $G, m^3/s$ – витрата теплоносія на певній ділянці;
- $D_{y.под}, мм$ – умовний діаметр подаючого трубопроводу;
- $D_{y.зв}, мм$ – умовний діаметр зворотного трубопроводу;
- $L, м$ – довжина трубопроводу;
- $\Delta h, кгс/м^3$ – питомі втрати тиску на тертя.

$$\Delta h = 0,00638 \cdot \lambda \cdot \frac{G^2}{D_B^5 \cdot \gamma}, кгс.м^2 \quad (2.23)$$

де γ – середня питома вага теплоносія на розрахунковій ділянці приймається рівною $958,4 кгс/м^3$, λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя (величина безрозмірна), D_B – внутрішній діаметр трубопроводу, визначається з урахуванням товщини стінки труби згідно з СНіП 2.04.12-86.

Оскільки рух у трубах ламінарний, гідравлічний опір приймаємо рівним 1. Де A – коефіцієнт, що залежить від форми поперечного перерізу, Re – число Рейнольдса.

Для розрахунку нам також знадобиться число Рейнольдса (Re), яке визначимо для всіх ділянок мережі. Значення Re знаходитимемо за номограмою, наведеною у [4] (рисунок 2.3)..

У подаючого трубопроводу температура робочої речовини становить $90^\circ C$, у зворотного - $65^\circ C$.

Для першого випадку знайдене за номограмою число Рейнольдса будемо множити на поправочний коефіцієнт, що дорівнює $0,897$; для випадку $65^\circ C$ коефіцієнт знайдемо методом інтерполяції і отримаємо значення $0,6475$.

Визначимо коефіцієнт гідравлічного тертя за формулою, що враховує будь-які значення числа Рейнольдса ($k_e = 0,5$), формула:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_e}{D_B} - \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,5}{150} - \frac{68}{538200} \right)^{0,25} = 0,0267 \quad (2.24)$$

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

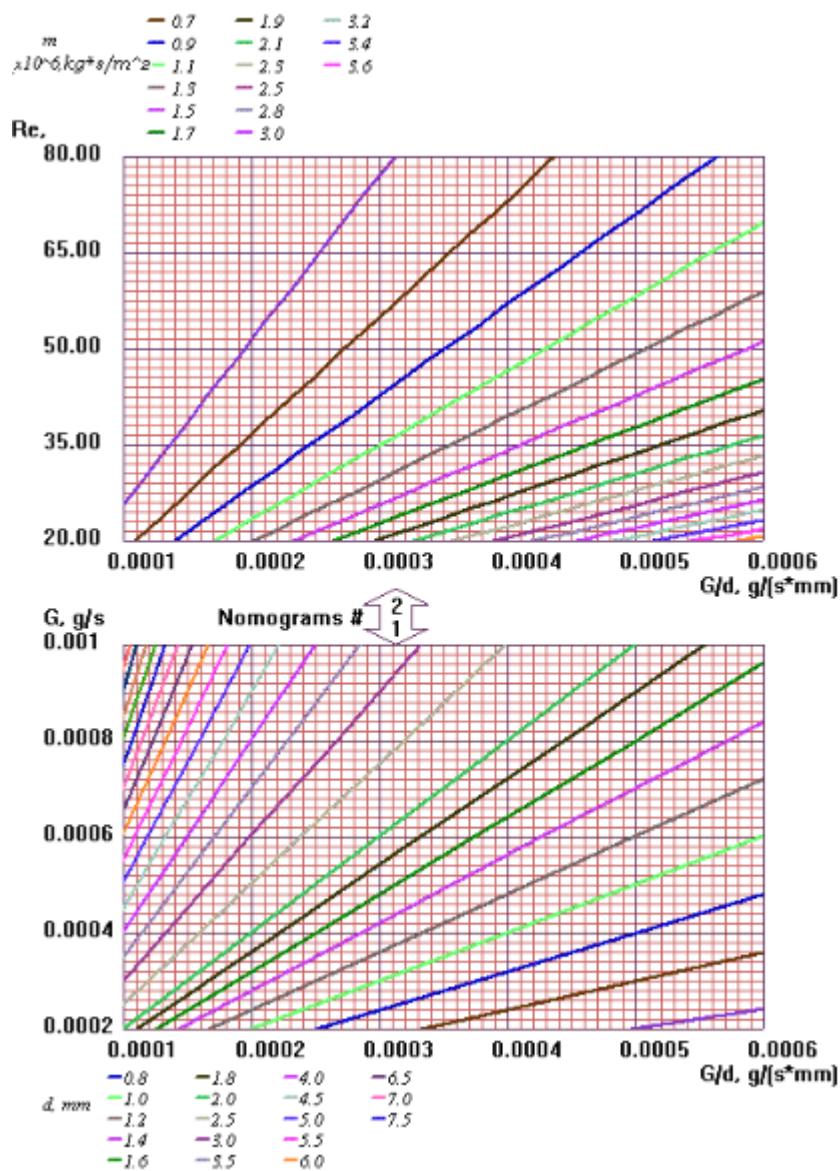


Рисунок 2.3 – Номограма для визначення числа Рейнольдса для води
(при $t=100^{\circ}\text{C}$)

Визначимо швидкість теплоносія в трубопроводах, яка змінюватиметься залежно від діаметра перерізу та пропускної здатності, за формулою:

$$\vartheta = 0,354 \cdot \frac{G}{\gamma \cdot D_v} = 0,354 \cdot \frac{15,56}{958,4 \cdot 0,15} = 0,255 \text{ м/с} \quad (2.25)$$

де γ – середня питома вага теплоносія на розрахунковому ділянці трубопроводу приймається рівною $958,4 \text{ кгс/м}^3$; G – розрахункова витрата теплоносія на розрахунковому ділянці, т/год; D_v – внутрішній діаметр труби у

метрах.

Далі розрахуємо питому втрату тиску на тертя на кожній ділянці мережі, визначаємо за формулою:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{\vartheta^2 \cdot \gamma}{2g \cdot D_B} = 0,00638 \cdot \lambda \cdot \frac{G^2}{D_B^2 \cdot \gamma} \text{ кгс/м}^3 \quad (2.26)$$

Характеристики ділянок, розраховані в цьому розділі, наведені у додатку В. Для визначення втрат тиску на ділянках трубопроводу необхідно знайти приведену та еквівалентну довжину трубопроводу, які розраховуються нижче.

Приведена довжина трубопроводу розраховується за формулами відповідно, м:

$$l_{np} = l + l_e \quad (2.27)$$

$$l_e = \sum \xi \cdot \frac{D_B}{\lambda} \quad (2.28)$$

За відсутності даних про характер та кількість місцевих опорів на трубопроводі еквівалентну довжину місцевих опорів та наведену довжину можна визначити за наступними формулами:

$$l_e = \alpha \cdot l = 0,3 \cdot 42,7 = 12,81 \text{ м} \quad (2.29)$$

$$l_{np} = l + l_e = 42,7 + 12,81 = 55,5 \text{ м} \quad (2.30)$$

де α – коефіцієнт, що враховує частку падіння тиску в місцевих опорах по відношенню до падіння тиску на тертя, приймаю згідно [21].

Приймається $\alpha = 0,3$, розрахована магістраль є розгалуженою (магістраль складається з різних діаметрів теплопроводу та різними витратами).

Втрати тиску на ділянці трубопроводу, формула:

$$\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_m \quad (2.31)$$

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

де $\Delta P_{\text{тр}}$ – втрата тиску на тертя, кгс/м²; $\Delta P_{\text{м}}$ – втрата тиску у місцевих опорах, кгс/м².

Втрати тиску в місцевих опорах визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta h \cdot l, \quad (2.32)$$

Втрати тиску на тертя визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta h \cdot l_e \quad (2.33)$$

де l_e – еквівалентна довжина у місцевих опорах, м; l – довжина ділянки трубопроводу за планом, м.

Розрахунки наведені у додатку Г, таблиця Г1.

Необхідно визначити падіння тиску і напору по шляху магістралі. Це визначається по ділянках шляхом вирахування втрат із заданого напору і тиску від напору і тиску насоса. На станції працює циркуляційний насос із сухим ротором у виконанні Inline із фланцевим з'єднанням Wilo CronoLine-IL 80/170-15 [22].

2.6 Математична модель розподіленої теплової станції

Електронна модель споживачів тепла, підключених до станції, створювалася у програмному продукті Matlab Simulink. Для побудови моделей використовувалися температурні графіки споживачів залежно від температури зовнішнього повітря. Температурний графік формувався в програмі ZuluGIS на основі гідравлічного та теплового розрахунку станції.

Вхідними даними для розрахунку теплової мережі в ZuluGIS є параметри, отримані в тепловому та гідравлічному розрахунках.

Модель складається з наступних блоків:

- споживач тепла – будівля;
- ділянка трубопроводу;

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- з'єднувальний вузол на зворотньому трубопроводі;
- джерело тепла.

Блок споживача тепла (будівля) описується вхідними впливами: температурою прямої води, масовим витратою теплоносія, вихідним параметром є температура зворотної води. Зміна вхідних параметрів залежить від температури навколишнього середовища. Блок представлений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Блок і-ого споживача тепла (будівля)

Для побудови електронного блока «споживач», де i — номер споживача згідно з картою споживачів, у програмі ZuluGIS здійснювався розрахунок споживачів, будується температурний графік, за яким виконується апроксимація даних.

Апроксимація даних проводиться за допомогою графічного інтерфейсу «Curve Fitted», визначається поліном із коефіцієнтами, який описує дані конкретного споживача.

Побудована модель представлена на рисунку 2.5. Лістинг блока споживача тепла показаний у додатку А. Лістинг блока споживача тепла наведений у Додатку А на рисунку А.2.

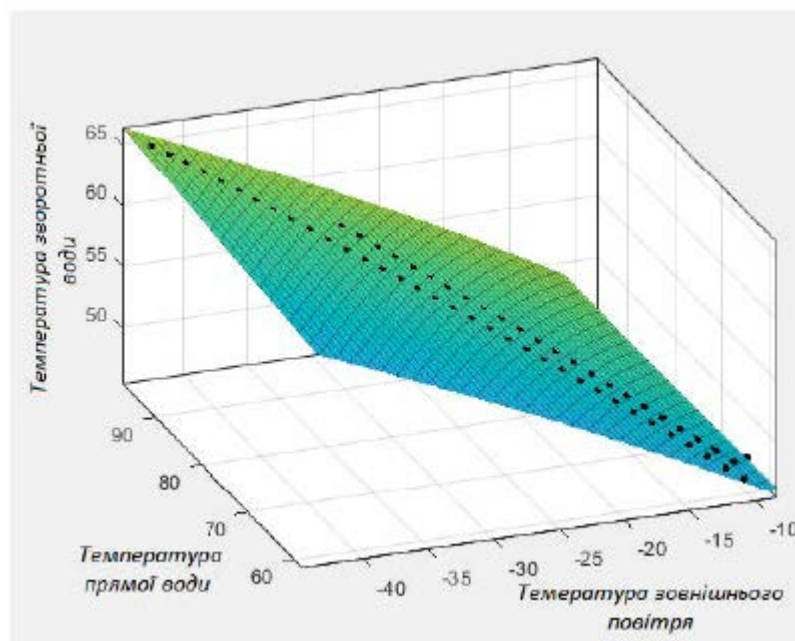


Рисунок 2.5— Модель поліноміальної апроксимації даних, знятих при розрахунку температур одного з об'єктів теплоспоживання

Блок ділянки трубопроводу описується вхідними впливами температури прямої або зворотної води на вході та тепловими втратами вздовж довжини трубопроводу, вихідною величиною є температура теплоносія з урахуванням подолання відстані. Блок представлений на рисунку 2.6.

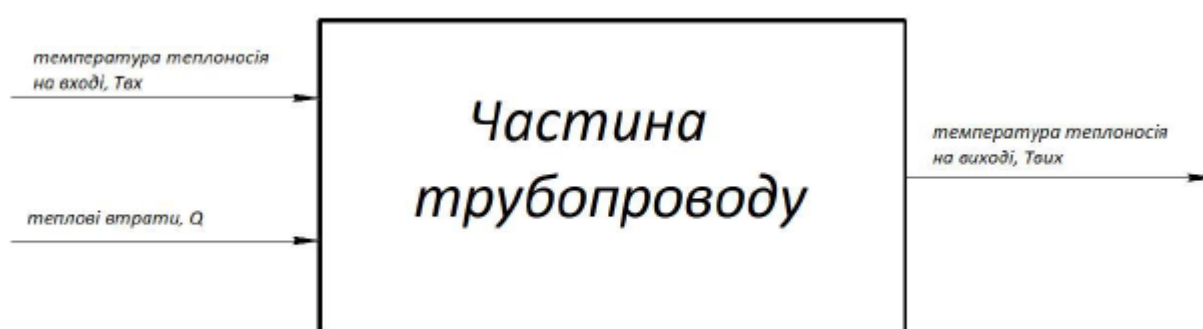


Рисунок 2.6 – Блок-схема трубопроводу

Для побудови блоку трубопроводу у програмі Matlab необхідно знайти кількість теплових втрат за довжиною трубопроводу, масова витрата робочого тіла.

Масові витрати та теплові втрати вважаються за допомогою програми ZuluGIS, втрати за довжиною трубопроводу згідно з розрахунком, представленим у [4], за такою формулою:

$$Q_2 = (q \cdot l \cdot \beta) \cdot 10^{-6}, \text{ ккал/ч}, \quad (2.34)$$

де q – питома годинна втрата тепла трубопроводами кожного діаметра, визначена перерахунком табличних значень норм питомих годинних теплових втрат на середньорічні (середньосезонні) умови експлуатації, ккал/год·м; l – довжина ділянки трубопроводів теплової мережі, м; β – коефіцієнт місцевих теплових втрат, що враховує теплові втрати запірною та іншою арматурою, компенсаторами і опорами (приймається 1,2 для трубопроводів діаметром до 150 мм та 1,15 – для діаметра 150 мм і більше, а також для всіх діаметрів трубопроводів безканальної прокладки незалежно від року проектування) [23].

Температура води з урахуванням теплових втрат виражається за наступною формулою:

$$G = \frac{Q \cdot 1000}{T_1 - T_2}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.35)$$

де T_1 – температура на вході в ділянку трубопроводу, °С;

T_2 – температура з урахуванням подолання довжини, °С;

Q – виражається як сума втрат по довжині трубопроводу та теплових втрат трубопроводу вважається таким чином:

$$G = \frac{(Q + Q_2) \cdot 1000}{T_1 - T_2} \quad (2.36)$$

Звідси виражаємо значення температури на виході із трубопроводу:

$$T_2 = T_1 - \frac{(Q + Q_2) \cdot 1000}{G}, \text{ °С} \quad (2.37)$$

Лістинг блоку трубопроводу наведено в додатку Б.

Зв'язуючим елементом зворотних трубопроводів, що виходять із різних будівель, є блок вузла змішування, представлений на рисунку 2.7.

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок вузла змішування описується вхідними впливами температур зворотної води від різних споживачів на вході, масовими витратами відповідних трубопроводів, вихідною величиною є температура теплоносія та масовий витрата.

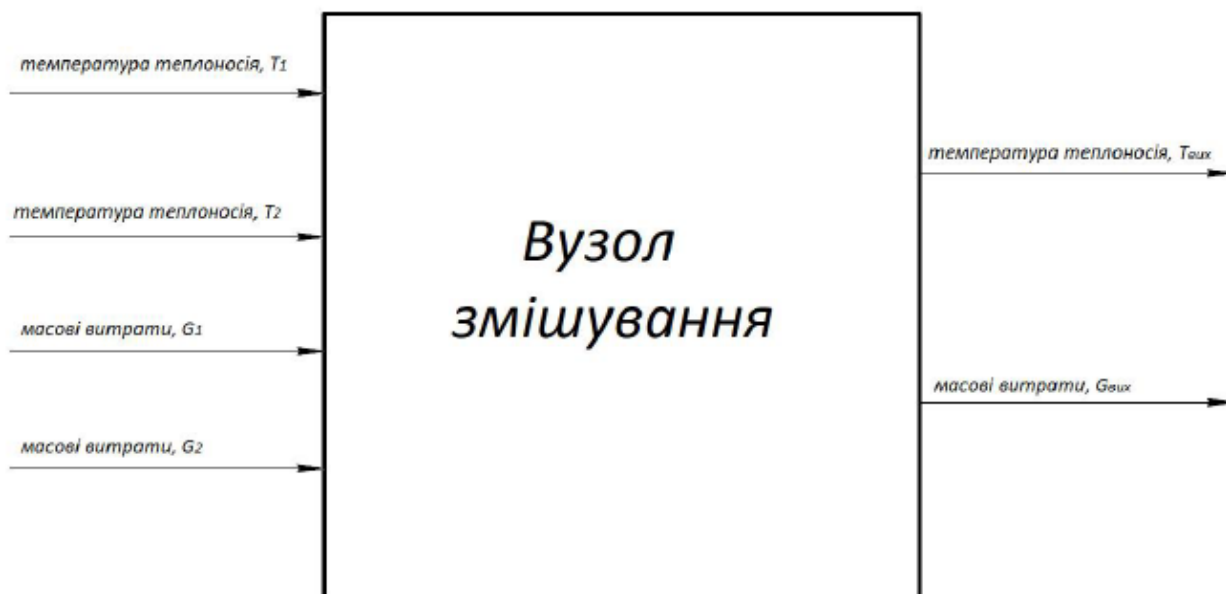


Рисунок 2.7 – Блок-схема вузла трубопроводу

Математично модель процесу змішування будувалася з використанням наступних формул:

Спочатку визначається об'єм теплоносія у кожному прохідному перерізі:

$$V_i = T_1 - \frac{G_i}{\rho_{\text{вод}}} \quad (2.38)$$

Далі за формулою (4.6) знаходимо температуру теплоносія після змішування:

$$T_{\text{вих}} = \frac{V_i \cdot T_i + V_{i+1} \cdot T_{i+1}}{V_i + V_{i+1}} \quad (2.39)$$

де G_i - масова витрата води через конкретний трубопровід, м³/ч ; $\rho_{\text{вод}}$ - густина води для певної температури, кг/м³; T_i та T_{i+1} – температури теплоносія, °С.

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водогрійний котел являє собою технологічну установку, в якій відбувається згоряння паливно-повітряної суміші, яка виділяє енергію для нагрівання теплоносія. В якості теплоносія використовується попередньо підготовлена вода. Температура води, що надходить у котел, не повинна бути меншою за 60 градусів. На вхід у котел подаються паливо та холодний теплоносій – зворотна вода, на виході – нагрітий теплоносій – пряма вода. Блок водогрійного котла представлений на рисунку 2.8.

Блок теплоносія враховує об'єм $V(\text{м}^3)$ теплоносія, який постійно знаходиться в котлі, густину ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) теплоносія, c – питому теплоємність теплоносія, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

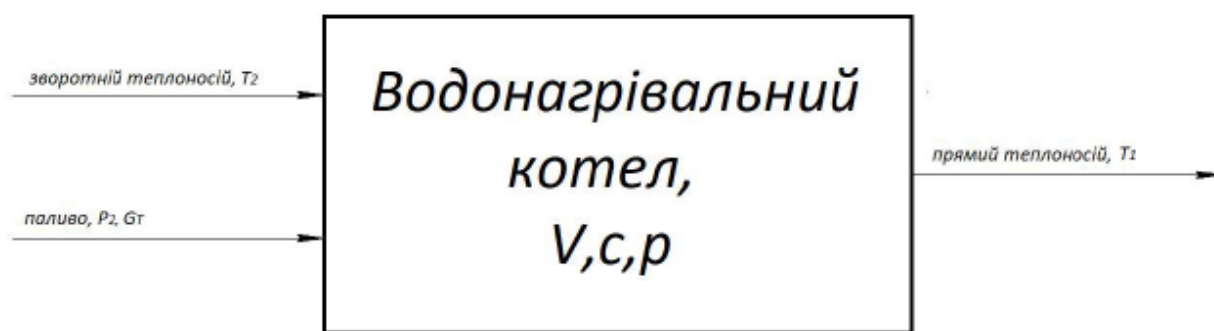


Рисунок 2.8 – Блок схема водогрійного котла

Потужність, що передається теплоносію при згорянні палива P_1 :

$$P_1 = V_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot q \cdot \eta, \text{кДж/год} \quad (2.40)$$

де V_{Γ} – об'ємна витрата палива (для котлів на газовому паливі) $\text{м}^3/\text{хв}$, ρ_{Γ} – щільність газового палива $\text{кг}/\text{м}^3$, q – питома теплота згоряння палива, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Потужність, яку відбирає теплоносій P_2 :

$$P_2 = c \cdot G \cdot (T_2 - T_1), \text{кДж/год} \quad (2.41)$$

де c – питома теплоємність теплоносія $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; G – масова витрата теплоносія $\text{Дж}/\text{кг}$;

Температура прямої води на виході з котла буде наступною:

					КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{V \cdot \rho \cdot c} \cdot \frac{d(P_1 - P_2)}{dt} \quad (2.42)$$

Рівняння прямої води є рівнянням динаміки температури прямої води.
Рішенням цього рівняння є інтеграл від правої частини:

$$T_2 = \frac{P_1 - P_2}{V \cdot \rho \cdot c^2} \cdot dt \quad (2.43)$$

Всі перераховані вище блоки формуються в загальну схему, яка описує теплову станцію, загальний вигляд блоків представлений на рисунку 2.9.

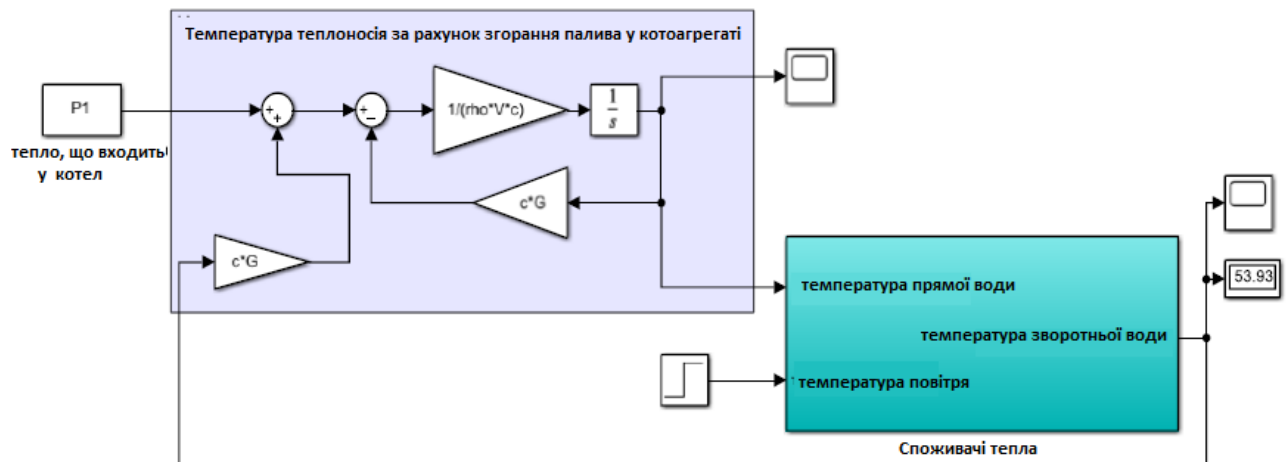


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд блоків: котельня та споживачі тепла

На рисунку 2.9 прийняті наступні позначення: c – питома теплоємність теплоносія Дж/(кг·К); G – масова витрата теплоносія (т/год); ρ – щільність теплоносія, що знаходиться в котлоагрегаті (кг/м³); V – об'єм теплоносія в котлоагрегаті; P_1 – потужність віддана котлу від згоряння палива (Дж)

Частина блоків трубопроводу, що подає, представлена на рисунку 2.9, частина блоків зворотного трубопроводу представлена на рисунку 2.10. З'єднання блоків відбувається згідно з картою схеми споживачів, з урахуванням послідовності трубопроводів.

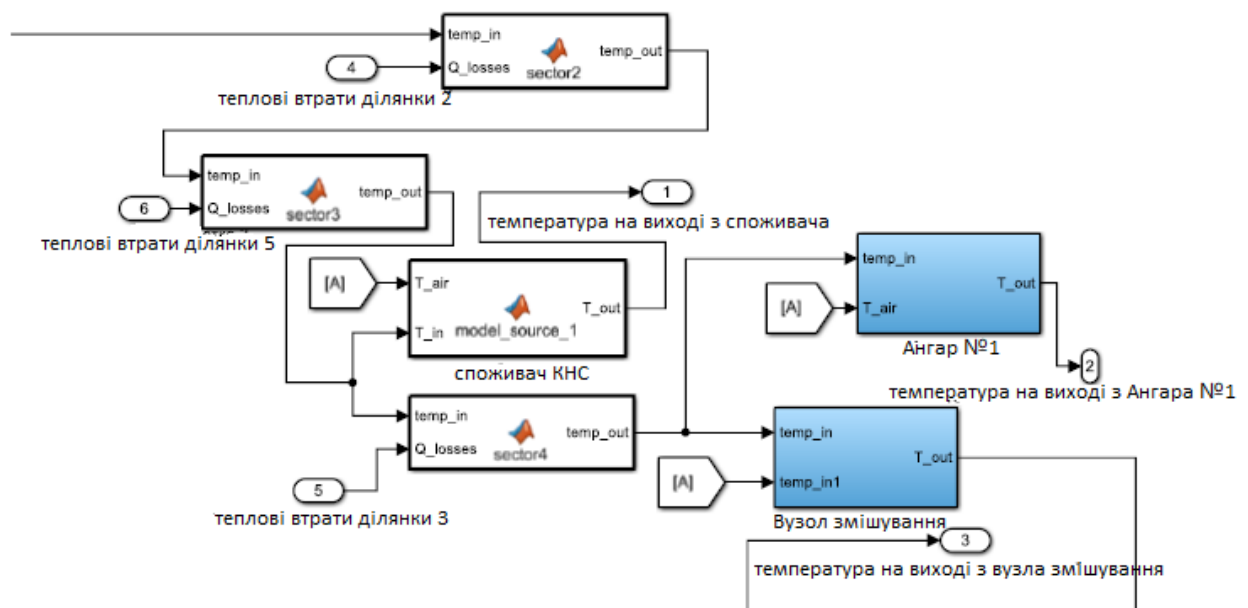


Рисунок 2.10 – Частина блоків, що утворюють трубопровід, що подає

На рисунку 2.10 прийняті наступні позначення: $temp_n$ - температура теплоносія, що надходить у ділянку трубопроводу; Q_losses – теплові втрати по довжині трубопроводу (ккал); T_air - температура навколишнього повітря ($^{\circ}C$); T_in – температура теплоносія тепла, що надходить до споживача ($^{\circ}C$)

На рисунку 2.11 представлений блок, що об'єднує блоки подаючого трубопроводу для зручності подачі входних впливів, а також цей блок описує подаючий трубопровід. Входами даного блоку будуть теплові втрати по ділянках магістральних трубопроводів. Вихідними параметрами будуть температури на вході в кожного споживача. Далі теплоносій проходить через радіатори, віддаючи тепло, охолоджується, і на виході з будівлі буде температура теплоносія, що входить у зворотній трубопровід.

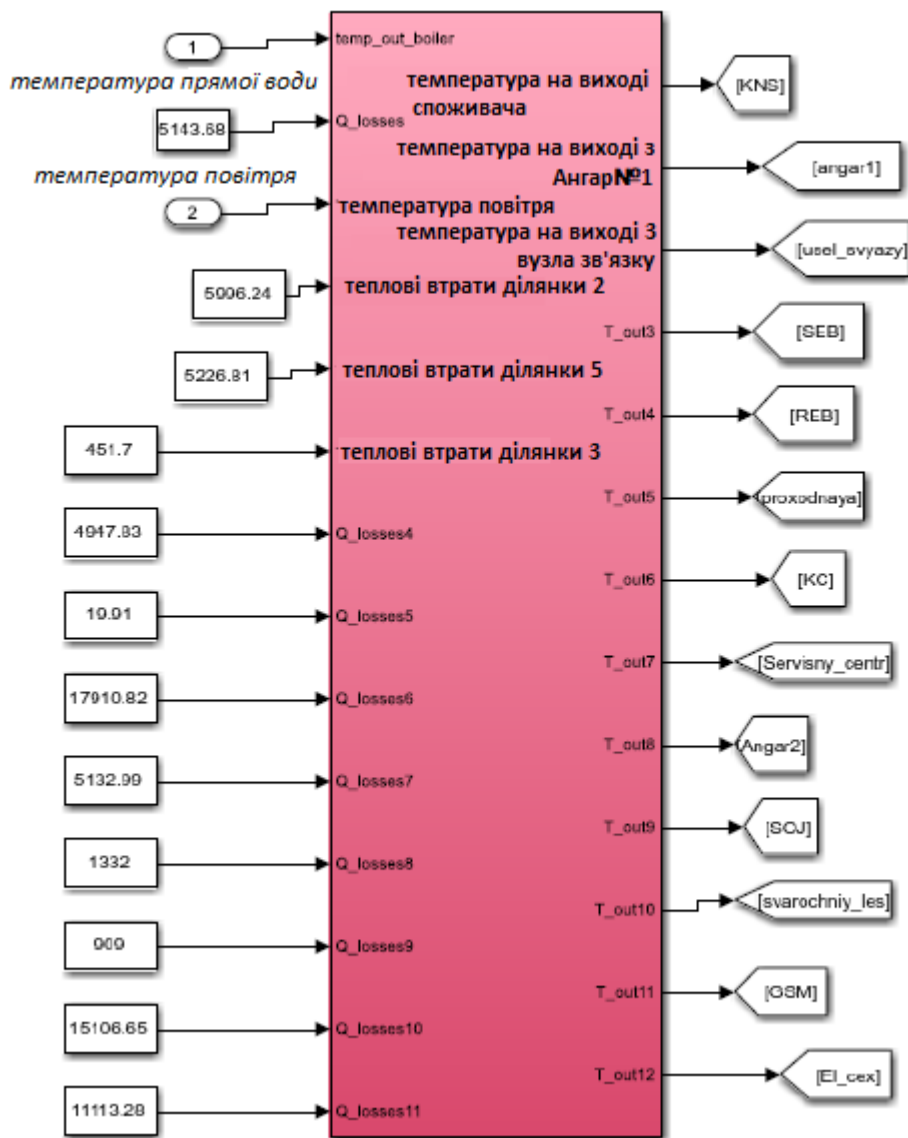


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд математичної моделі трубопроводу, що подає

На рисунку 2.11 прийняті наступні позначення: Q_losses – теплові втрати за довжиною ділянки трубопроводу (ккал); T_out – температура теплоносія на виході із споживача тепла ($^{\circ}C$)

На рисунку 2.12 представлено частину зворотного трубопроводу. На вхід надходить температура теплоносія, що виходить із споживача, на виході з ділянки – температура теплоносія, що входить у котлоагрегат.

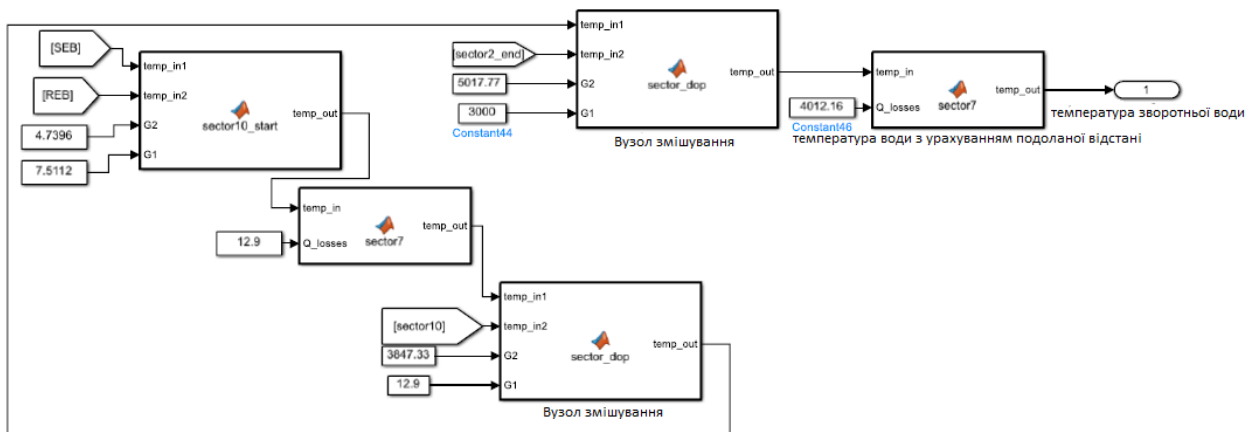


Рисунок 2.12 – Частина блоків, що утворюють зворотній трубопровід

Температура теплоносія залежить від об'єму газозовітряної суміші, поданої в котел, об'ємний витрата газозовітряної суміші змінюється залежно від температури зовнішнього повітря.

Процес перевірки моделі на адекватність відбувається наступним чином: приймаємо гранично критичні параметри навколишнього середовища - при зміні збурень температури зовнішнього повітря від мінус 43 °C до мінус 23 °C відстежуємо зміну температури прямого та зворотного теплоносія. Графік зміни температури наведено на рисунку 2.13, графік зміни температури прямого теплоносія - на рисунку 2.14, графік зміни температури зворотного теплоносія — на рисунку 2.15.

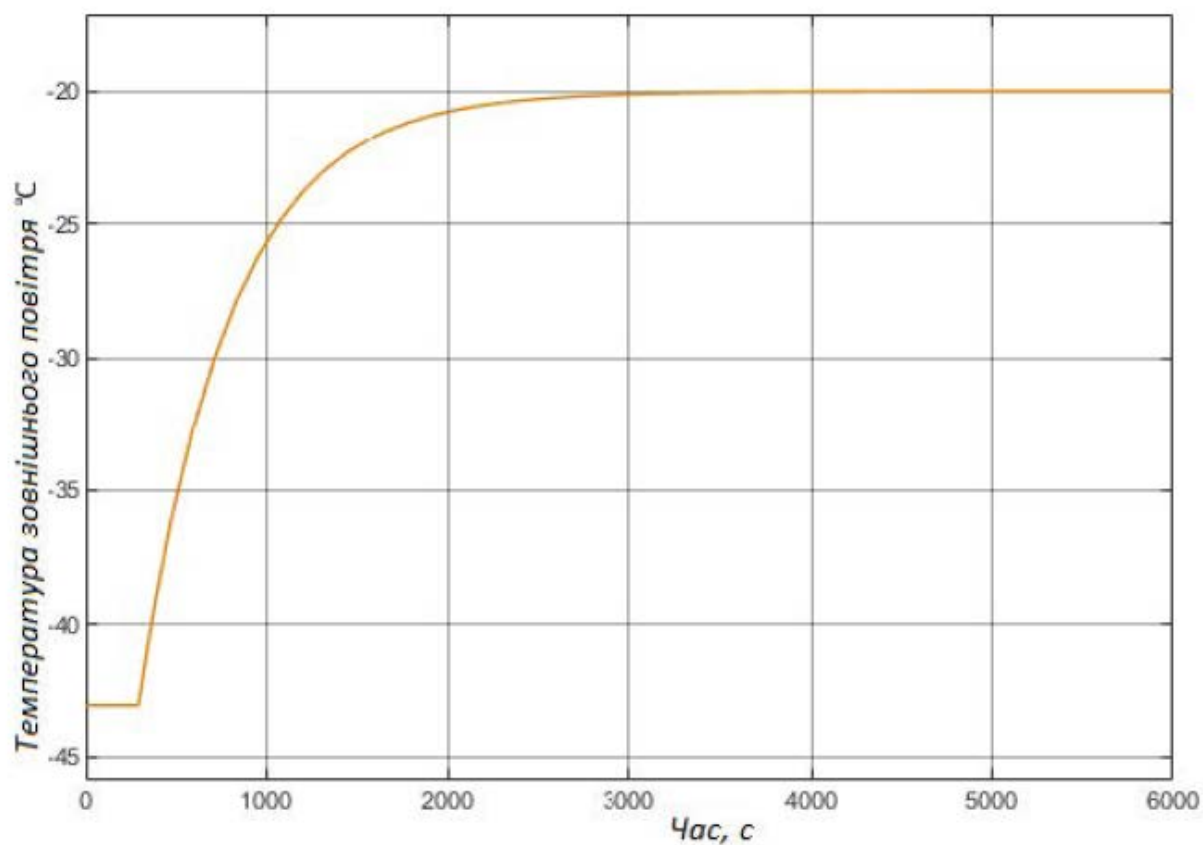


Рисунок 2.13 – Зміна температури зовнішнього повітря за часом °C

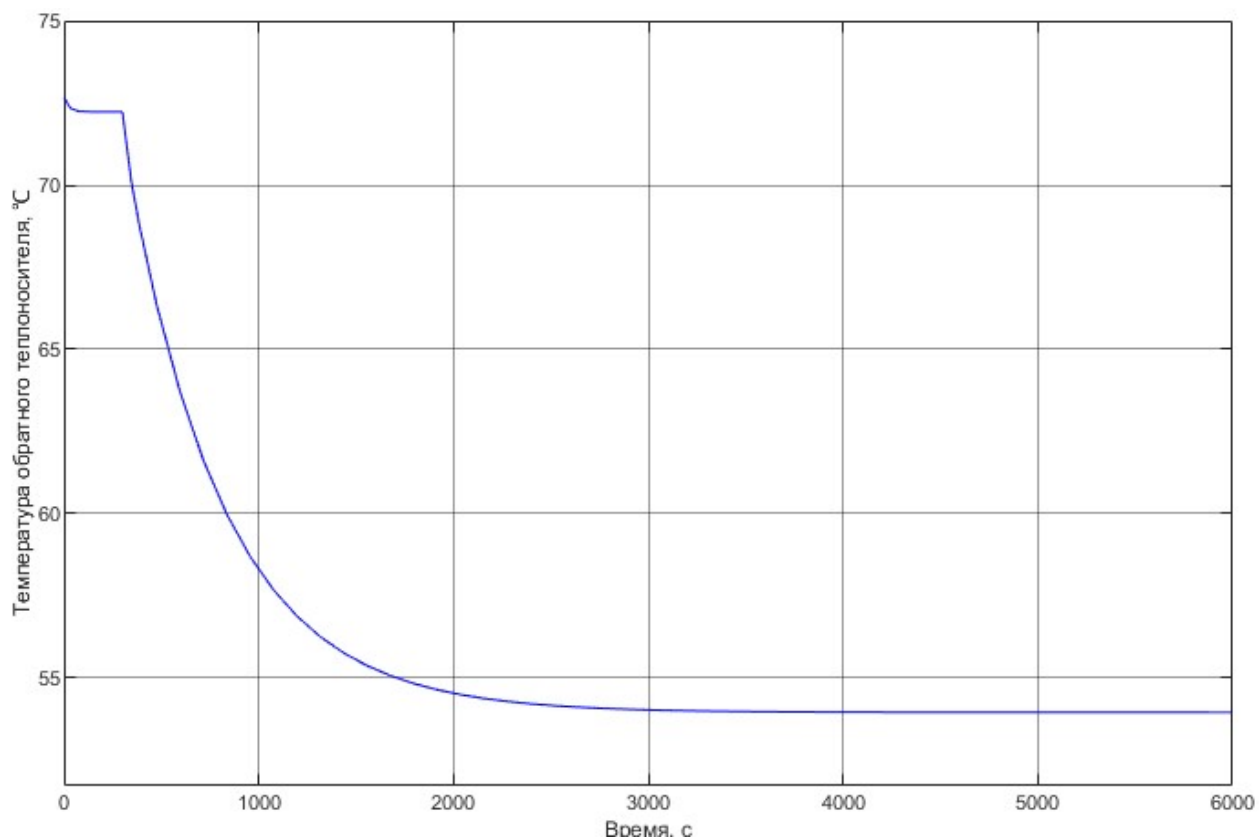


Рисунок 2.14 – Зміна температури зворотної води від температури повітря

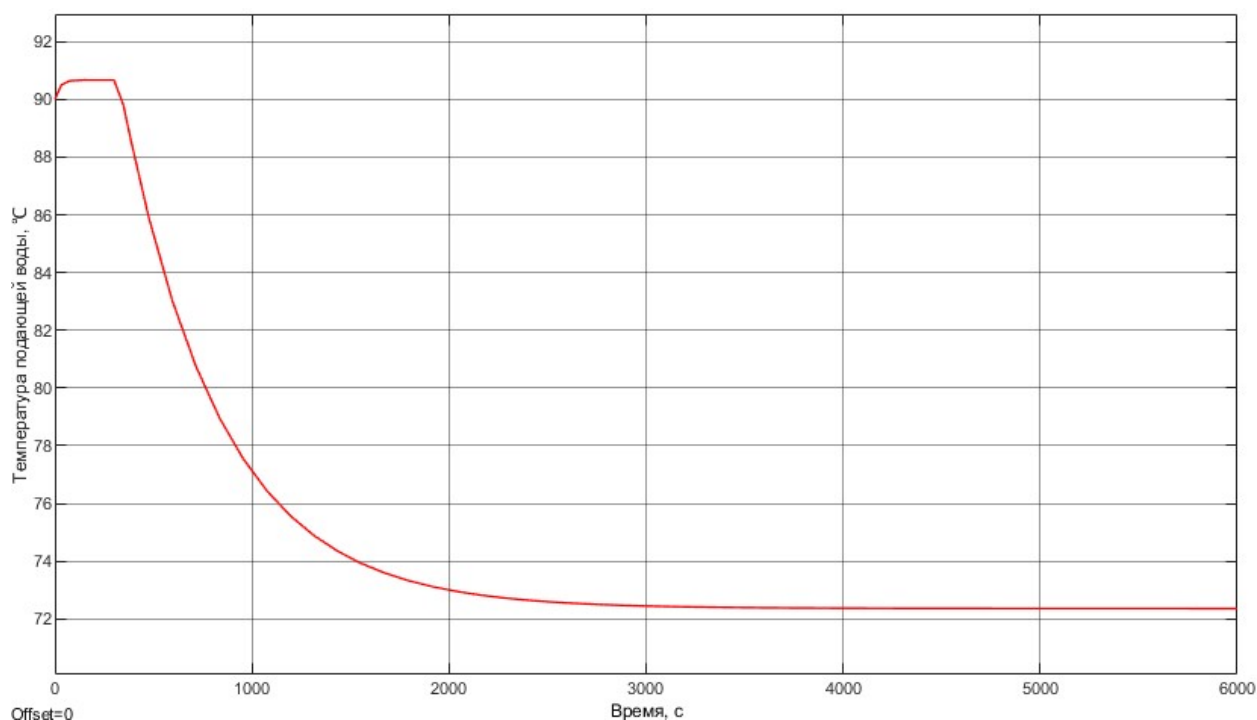


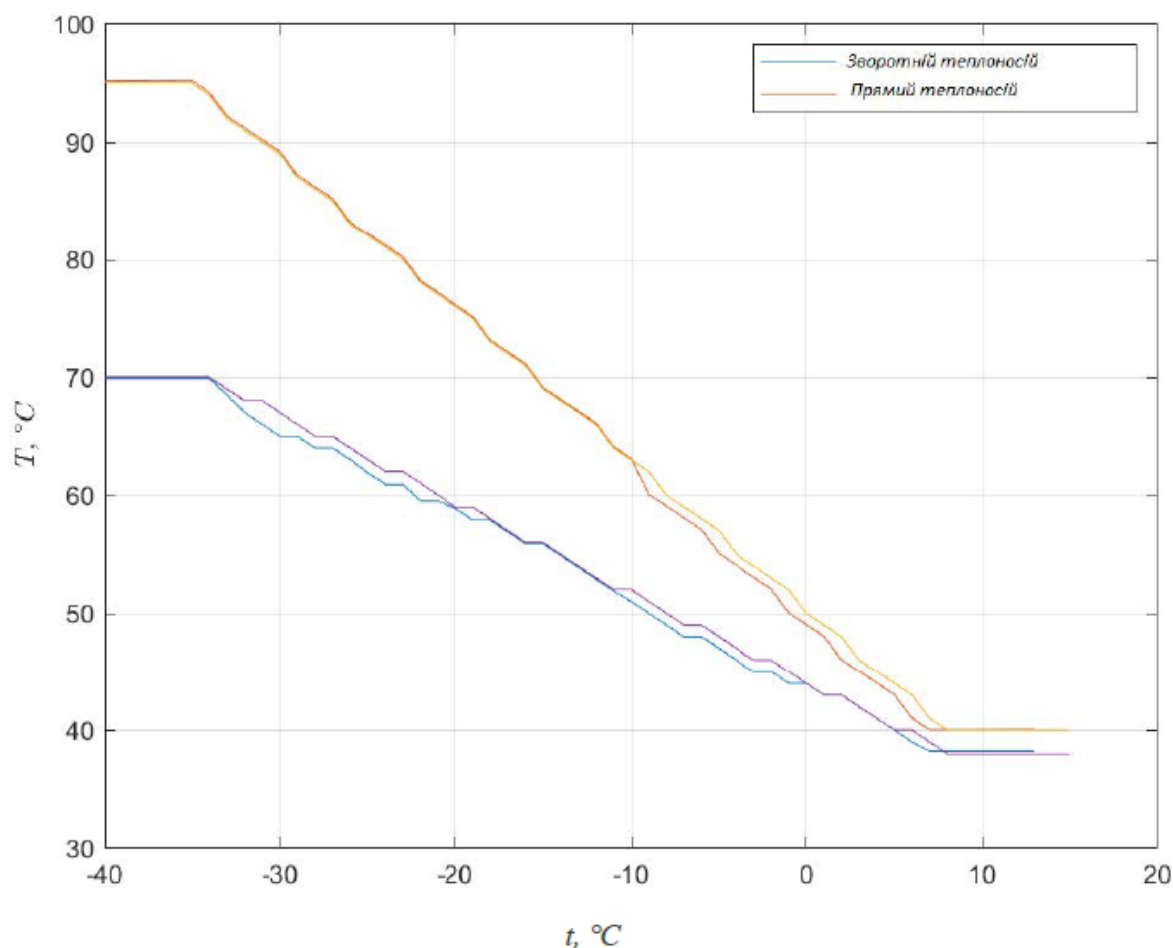
Рисунок 2.15 – Зміна температури води, що подає, залежно від температури повітря

Результати розрахунку показують, що температура зворотної та прямої води обернено пропорційно реагує на зміну повітря.

2.7 Моделирование системы автоматического керування

Завдання системи автоматичного управління полягає у підтримці необхідної температури теплоносія, що надходить до споживачів, температура теплоносія залежить від температури навколишнього повітря.

Як регулятор для підтримки необхідної температури використовується пропорційний регулятор, на рисунку 2.16 показано регулювання температури теплоносія в трубопроводі, що подає і зворотному, де коефіцієнт – маса палива.



$T, ^\circ\text{C}$ - температура теплоносія; $t, ^\circ\text{C}$ - температура навколишнього повітря на вулиці

Рисунок 2.17 – Температурні графіки прямої та зворотної води з регулятором температури

З графіка 2.17 випливає, що спроектована система підтримує необхідну температуру води залежно від даних, які ми подаємо на вхід системи. Можна зробити висновок: за допомогою спроектованої системи можливо прогнозувати навантаження на систему опалення.

Висновки до розділу:

У другому розділі проведено комплексну розробку математичної моделі досліджуваної системи теплопостачання та її моделювання. Було виконано розрахунок основних параметрів системи, зокрема теплового навантаження та мережної води, що є необхідною базою для подальшого аналізу та оптимізації

роботи теплової мережі. Проведено гідравлічний розрахунок, який дозволив оцінити параметри руху теплоносія, а також розроблено математичну модель розподіленої теплової станції з урахуванням особливостей її роботи.

Графік, зображений на рисунках 2.17, свідчить про адекватну роботу системи, яка реагує на зміну температури навколишнього середовища, встановлюючи задану температуру з невизначеністю $0,5^{\circ}$, що становить відносну похибку 1%, а також про те, що система виконує коректний розрахунок при порівнянні параметрів, знятих з реальних датчиків системи теплопостачання, і параметрів, розрахованих за допомогою імітаційної моделі

Окрему увагу приділено моделюванню системи автоматичного керування, що забезпечує регулювання теплового навантаження і стабільність роботи всієї системи в реальному часі. Запропонована модель є основою для подальшого впровадження ефективних алгоритмів управління та оптимізації функціонування теплопостачання, що сприятиме підвищенню енергоефективності та надійності системи в цілому.

					<i>КНУ КРБ.151.24.06.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено всебічний аналіз розподілених систем теплопостачання з акцентом на блочно-модульні котельні (БМК) як об'єкт автоматизації. Розглянуто основні характеристики БМК, їх конструктивні особливості та функціональні можливості в контексті сучасних систем теплопостачання. Описано структуру розподіленої системи теплопостачання, зокрема механізми приєднання споживачів, що дозволяє оцінити специфіку управління і контролю за тепловою енергією в різних умовах експлуатації.

Проаналізовано існуючі рішення, що застосовуються для автоматизації та оптимізації роботи систем теплопостачання, з урахуванням їх переваг і недоліків. Визначено основні експлуатаційні вимоги до блочно-модульних котельень, що є ключовими для забезпечення надійної, ефективної та безпечної роботи системи. На основі проведеного аналізу сформульовано конкретні завдання дослідження, що спрямовані на вдосконалення автоматизованих систем управління теплопостачанням.

Виконаний аналіз існуючих схем теплопостачання та способів управління опаленням комплексу будівель при децентралізованому теплопостачанні. Найчастіше серед вітчизняних і закордонних авторів зустрічається моделювання системи теплопостачання за допомогою нейронних мереж, а також управління системою за допомогою нечіткої логіки.

У цій роботі представлено математичну модель теплової системи з використанням Matlab Simulink. Гідравлічний та тепловий розрахунки для створення імітаційної моделі виконувалися у програмному продукті ZuluGIS.

Метою гідравлічного розрахунку було уточнення діаметрів трубопроводів для правильного визначення масового розходу теплоносія

					<i>КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИі</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Миранков В. В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22ск</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						64	2

через одиницю поверхні трубопроводу. В ході теплового розрахунку були визначені навантаження на опалення для кожного споживача тепла та системи опалення загалом, розрахункове навантаження на опалення з урахуванням усіх споживачів склало 0,764 МВт·год.

Виконано імітаційне моделювання станції, яке дозволяє відстежувати розподіл температури по теплоносіях, а також температуру теплоносія, що надходить від споживачів до котельні і з котельні до споживачів.

Основною перевагою даної системи є можливість найбільш наближеного моделювання об'єктів, а також прогнозування навантаження на систему теплопостачання. Методика моделювання імітаційної моделі, запропонована в цій роботі, може бути використана для побудови більшості систем.

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Basalaev A. A. Distributed heat management of buildings based on sensor networks : URL: <https://dissercat.com/content/raspredelennoe-upravlenie-teplosnabzheniem-zdaniy-na-osnove-sensornykh-setei> (Дата звернення 02.04.2025).

2. Dobrotin, S.A., Prokopchuk E.L. Application of simulation modeling at the stage of synthesis of automatic control system of heat supply for building heating // Advances of modern natural science. 2008. № 3. с. 50-51.

3. Dabney J. Simulink 4. Secrets of mastery. Edited by: Binom. Laboratory of knowledge, 2003. 404 с.

4. Soldatenkov A. S. Automation of decentralized heating of complex buildings with basic heat consumption schemes: <https://dissercat.com/content/avtomatizatsiya-detsentralizovannogo-otopleniya-kompleksa-zdaniy-s-osnovnymi-skhemami-teplo> (Дата звернення 02.04.2025)..

5. Mazitov N. F. Information Environment of the Automatic Water Heating System. BBM Publishing House LLC, 2021. С. 300-307

6. Dynamic evaluation method to increase the effect of the automation system on the building energy performance // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 253. P. 119811.

7. Satyavada H. Baldi S. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical System // Machines. 2016. Vol. 4.№ 2. P. 10.

8. Issam A. Modeling of thermal operating modes of buildings using MatLab/Simulink systems // Izvestiya vysokikh obrazovaniye obrazovaniye. North-Caucasus region. Technical Sciences. 2009. №. 1. С. 95-99

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Миранков В.В,			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О. І.								66	3
								КНУ АКИТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

9. Kritsky G. G., Ignachik V. S. Digital technologies in the engineering infrastructure of the city // Actual problems of military and scientific research. 2019. №. S2. С. 167-184.

10. Sakov I. A., Romanov G. A., Kuryatov V. N. Principles of constructing a software and methodological complex "Thermal networks" //Теплоенергетика. 1994. №. 1. С. 57-60.

11. Бондалетова Л. І., Новіков В. Т., Алексєєв Н. А. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива в котельнях: методичний посібник //Дніпро.: Вид-во ДНГУ, 2000. 56 с.

12. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

13. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

14. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

16. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

Операторно-структурна схема Matlab

```

function T_out = model_source_1(T_air, T_in)
p1 = 0.1929;
p2 = 49.41;
model_1 = @(T_air) p1*T_air + p2;
%вторая часть потребителя, температура ниже 10 градусов
p00 = 49.32;
p10 = -0.963;
p01 = 0.1275;
p11 = -0.004454;
p02 = -0.006124;
model_2 = @(T_air, T_in) p00 + p10*T_air + p01*T_in + p11*T_air*T_in
+ p02*T_in^2;
    if (T_air > -10)
        T_out = model_1(T_air);
    Else
        T_out = model_2(T_air, T_in);
    end
end

```

Рисунок А.1 - Реалізація блоку споживача тепла (будови)

```

function temp_out = sector1(temp_in, Q_losses)
%q - удельные часовые потери трубопроводами каждого диаметра,
определённые пересчётом табличных значений норм удельных часовых
тепловых потерь на среднегодовые (среднесезонные) условия
эксплуатации, ккал/чм;
%B - коэффициент местных тепловых потерь, учитывающий тепловые
потери запорной и другой арматурой, компенсаторами и опорами
%G - расход через объем потребителя
% l - длина трубы
% Q_losses - потери по длине трубопровода, с учетом температуры
наружного воздуха
G = 59.2882; %т/ч
q = 42; %ккал/чм
l = 42.7;%м
B = 1.2; % принимается 1,2 при диаметре трубопроводов до 150 м
% Q2 - величина тепловых потерь, Гкал/час;
Q2=(q*l*B)*10^(-6);
temp_out = temp_in - (((Q_losses*10^(-6))*1000)/G);
end

```

Рисунок А.2 -Реалізація блоку ділянки трубопроводу

					КНУ КРБ.151.25.03.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Результати теплового розрахунку

Таблиця Б.1 – Теплові навантаження кожного споживача (забудови)

Номер споживача згідно схеми 1.	Теплове навантаження МВт:	
	На опалення	На вентиляцію
1	0,2011	0,0924
2	0,2234	0,1027
3	0,0171	0,007865
4	0,0171	0,007865
5	0,0171	0,007865
6	0,0171	0,007865
7	0,1899	0,08726
8	0,0171	0,007865
9	0,0171	0,007865
10	0,0171	0,007865
11	0,0171	0,007865
12	0,0171	0,007865
13	0,0171	0,007865

Таблиця Б.2 – Річне споживання теплової енергії за видами споживання

Номер споживача	Витрати тепла МВт·ч	
	Опалення	Вентиляція
1	263,04	121,7
2	292,22	19,4
3	323,53	14,87
4	358,96	164,9
5	323,53	14,87
6	323,53	14,87
7	323,53	14,87
8	323,53	14,87
9	323,53	14,87
10	323,53	14,87
11	323,53	14,87
12	323,53	14,87
13	323,53	14,87

Таблиця В.1 – Характеристики ділянок

[illegible]

