

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка концепції та архітектури інформаційної системи керування теплопостачанням в розумному житловому комплексі

Виконав: студент

IV курсу, групи

СТ-41

спеціальності

126 Інформаційні системи та технології

(шифр і назва спеціальності)

	Бесага В.І. (підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	Мацюк Г.Р. (підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	Липак Г.І. (підпис) (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	Боднарчук І.О. (підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	Гацин Н.Б. (підпис) (прізвище та ініціали)

(підпис)

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня	Бакалавр
	(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю	126 Інформаційні системи та технології
	(шифр і назва спеціальності)
Студенту	Бесазі Владиславу Івановичу
	(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка концепції та архітектури інформаційної системи керування тепlopостачанням в розумному житловому комплексі

Керівник роботи	Мацюк Галина Ростиславівна, к.н.с.к., доцент, доцент кафедри КН (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
-----------------	--

Затверджені наказом ректора від « 7 » травня 2025 року № 4/7-445

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи теплопостачанням.	Наукові публікації про «розумні» системи управління
---	---

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз галузі «розумних» систем керування теплопостачанням.

1.1 Предметна область «розумних» систем теплопостачання. 1.2 Методологія наукометричного пошуку в галузі «розумних» житлових комплексів. 1.3 Аналітичний огляд наукових публікацій. 1.4 Бібліографічний аналіз за допомогою VOSviewer. 2 Методи та засоби моделювання. 2.1 Моделі та методи мереж «розумного» теплопостачання. 2.2 Моделювання систем теплопостачання «розумних» комплексів. 2.3 Стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» комплексів. 2.4 Інструменти аналізу теплопостачання «розумних» комплексів. 3 Концептуальне проектування системи теплопостачання. 3.1 Інформаційно-технологічна архітектура системи керування теплопостачанням. 3.2 Фізична інфраструктура системи керування теплопостачанням. 3.3 Рівень збору даних та керування системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. 3.4 Рівень взаємодії та оптимізації системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу. 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Сенчишин В.С., доцент кафедри МТ	12.06.2025	15.06.2025

7. Дата видачі завдання 29 січня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	30.01.2025	
2.	Підбір джерел про «розумні» системи управління теплопостачанням	31.01.2025-03.02.2025	
3.	Опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи	04.02.2025-06.02.2025	
4.	Виконання дослідження щодо розробки концепції та архітектури інформаційної системи керування теплопостачанням в розумному житловому комплексі	07.02.2025-11.02.2025	
5.	Оформлення розділу «Огляд та аналіз галузі «розумних» систем керування теплопостачанням»	03.06.2025-05.06.2025	
6.	Оформлення розділу «Методи та засоби моделювання систем та мереж «розумного» теплопостачання»	06.06.2025-08.06.2025	
7.	Оформлення розділу «Концептуальне проектування системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу»	09.06.2025-11.06.2025	
8.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека життєдіяльності»	12.06.2025-13.06.2025	
9.	Виконання завдання до підрозділу «Основи охорони праці»	14.06.2025-15.06.2025	
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	16.06.2025-17.06.2025	
11.	Нормоконтроль	18.06.2025-19.06.2025	
12.	Перевірка на плагіат	20.06.2025	
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	21.06.2025	
14.	Захист кваліфікаційної роботи	23.06.2025	

Студент

(підпис)

Бесага В.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Мацюк Г.Р.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Розробка концепції та архітектури інформаційної системи керування теплопостачанням в розумному житловому комплексі // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Бесага Владислав Іванович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СТ-41 // Тернопіль, 2025 // С. 69, рис. – 7, табл. – 8, кресл. – , додат. – 0, бібліогр. – 87.

Ключові слова: Edge computing, Інтернет речей, інформаційно-технологічна архітектура, модель, розумне місто, розумний житловий комплекс, система теплопостачання, теплові мережі, хмарні обчислення.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» описана предметна область «розумних» систем теплопостачання. Подана методологія наукометричного пошуку в галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Виконано аналітичний огляд наукових публікацій щодо систем «розумного» теплопостачання. Проведено бібліографічний аналіз в галузі систем «розумного» теплопостачання за допомогою VOSviewer. В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено моделі та методи мереж «розумного» теплопостачання. Описано моделювання систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Розглянуто стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Досліджено інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано інформаційно-технологічну архітектуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Проаналізовано фізичну інфраструктуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу.

ANNOTATION

Development of the Concept and Architecture of an Information System for Heat Supply Management in a Smart Residential Complex // Qualification work of the educational level "Bachelor" // Besaha Vladyslav // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group ST-41 // Ternopil, 2025 // P. 69, fig. - 7, tabl. - 8, chair. - , annexes. – 0, references - 87.

Keywords: Edge computing, Internet of Things, information technology architecture, model, smart city, smart residential complex, heating system, heating networks, cloud computing.

The qualification thesis is dedicated to the study of the heat supply system of a smart residential complex. The first chapter of the Bachelor's level qualification thesis describes the subject area of smart heat supply systems. It presents a scientometric search methodology in the field of heat supply systems for smart residential complexes. An analytical review of scientific publications on smart heat supply systems is conducted. A bibliometric analysis of the field of smart heat supply systems is performed using VOSviewer.

The second chapter explores the models and methods of smart heat supply networks. It describes the modeling of heat supply systems for smart residential complexes. Strategies for managing the heat supply processes of smart residential complexes are examined. Analytical tools for evaluating smart heat supply systems are investigated.

The third chapter describes the information and technology architecture of the heat supply system of a smart residential complex. The physical infrastructure of the heat supply system of a smart residential complex is analyzed.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ІКТ – інформаційні та комунікаційні технології.

ТЕЦ – теплоелектроцентрально.

ЦТ – системи централізованого теплопостачання.

ЦТО – централізованого теплопостачання та охолодження.

4GDHC (англ. Fourth Generation District Heating and Cooling) – система централізованого теплопостачання та охолодження четвертого покоління.

5GDHC (англ. Five Generation District Heating and Cooling) – система централізованого теплопостачання та охолодження п'ятого покоління.

DC (англ. District Cooling) – централізоване охолодження.

DH (англ. District Heating) – централізоване теплопостачання.

DHC (англ. District Heating and Cooling) – централізоване теплопостачання та охолодження.

CHP (англ. Combined Heat and Power) – комбіноване тепло та електроенергія (когенерація).

HP (англ. Heat Pump) – тепловий насос.

HVAC (англ. Heating, Ventilation, and Air Conditioning) – опалення, вентиляція та кондиціонування.

FMI (англ. Functional Mock-up Interface) – функціональний макет інтерфейсу.

FMU (англ. Functional Mock-up Unit) – функціональний макетний блок.

NMF (англ. Neutral Model Format) – формат нейтральної моделі.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ГАЛУЗІ «РОЗУМНИХ» СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ	11
1.1 Предметна область «розумних» систем керування теплопостачанням.....	11
1.2 Методологія наукометричного пошуку в галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.....	14
1.3 Аналітичний огляд наукових публікацій щодо систем «розумного» теплопостачання	16
1.4 Бібліографічний аналіз в галузі систем «розумного» теплопостачання за допомогою VOSviewer.....	19
1.5 Висновок до першого розділу	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	22
2.1 Моделі та методи формування мереж «розумного» теплопостачання	22
2.2 Моделювання систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів	25
2.3 Стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» житлових комплексів.....	30
2.4 Інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.....	31
2.5 Висновок до другого розділу	39
РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ «РОЗУМНОГО» ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ	40
3.1 Інформаційно-технологічна архітектура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу	40

3.2 Фізична інфраструктура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу	42
3.3 Рівень збору даних та керування системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу	44
3.4 Рівень взаємодії та оптимізації системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу	47
3.5 Висновок до третього розділу	51
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Організація оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру.....	52
4.2 Організація безпечних умов праці при роботі з IoT-обладнанням	56
4.3 Висновок до четвертого розділу	58
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	61

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні міста стикаються з безліччю викликів, як от зростання населення, збільшення споживання ресурсів, забруднення навколишнього середовища та необхідність забезпечення комфортного життя громадян. У відповідь на ці виклики, концепція «розумних міст» активно розвивається, передбачаючи інтеграцію інформаційних та комунікаційних технологій у всі аспекти міської інфраструктури – від «розумного» транспорту та «розумних» систем безпеки до «розумного» енергопостачання та «розумного» управління відходами. Дослідження у цій галузі зосереджені на розробці інтегрованих платформ, аналітичних інструментів та IoT-рішень, що дають змогу оптимізувати міські процеси, підвищити ефективність використання ресурсів та покращити якість життя мешканців загалом. Однак, незважаючи на значний прогрес, багато аспектів, зокрема детальна оптимізація інженерних систем на рівні окремих житлових комплексів, залишаються предметом наукових досліджень та практичних розробок.

У контексті «розумних міст» особливого значення набуває розвиток «розумних» систем теплопостачання. Традиційні системи часто характеризуються значними втратами енергії, неефективним керуванням та низьким рівнем адаптивності до змінних потреб споживачів та погодних умов. Актуальні дослідження у сфері «розумних» систем теплопостачання зосереджені на інтеграції сенсорних мереж, IoT-пристроїв, а також передових алгоритмів прогнозування та оптимізації, включаючи методи машинного навчання та штучного інтелекту. Це дає змогу перейти від централізованого та реактивного управління до проактивного та адаптивного, забезпечуючи подачу тепла лише тоді, коли це необхідно, та в оптимальній кількості. Проте, незважаючи на існуючі розробки, все ще існує потреба у створенні комплексних, інтегрованих інформаційно-технологічних рішень, які враховуватимуть специфіку багатоквартирних житлових комплексів та забезпечуватимуть синергію між різними компонентами системи

теплопостачання. Тому проектування інтегрованих систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів є актуальним напрямком сучасних досліджень.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» є обґрунтування та розробка концептуальної моделі і інформаційно-технологічної архітектури системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу з урахуванням використання IoT-пристроїв, хмарних технологій, багаторівневої обробки даних та засобів аналітики для підвищення енергоефективності та керованості. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Провести аналітичний огляд предметної області «розумного» теплопостачання.
- Проаналізувати методи моделювання мереж і систем «розумного» теплопостачання.
- Дослідити інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів
- Розробити інформаційно-технологічну архітектуру системи теплопостачання розумного житлового комплексу.
- Запропонувати концептуальний прототип системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу, що враховує сучасні підходи до інтеграції IoT, автоматизації, аналітики та зворотного зв'язку з користувачами.

Об'єкт дослідження: система теплопостачання житлового комплексу в умовах цифрової трансформації.

Предмет дослідження: інформаційно-технологічні принципи проектування та оптимізації систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність даної кваліфікаційної роботи полягає у можливості створення ефективної інформаційно-технологічної архітектури системи теплопостачання, яка включає деталізацію фізичної інфраструктури, рівня збору даних та керування,

а також рівня взаємодії та оптимізації. Прототипування такої системи дає змогу перевірити концептуальні рішення та запропонувати конкретні технічні засоби та програмне забезпечення для їх реалізації. Це робить дослідження не лише своєчасним, а й вкрай важливим для сталого розвитку міської інфраструктури.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ГАЛУЗІ «РОЗУМНИХ» СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ

1.1 Предметна область «розумних» систем керування теплопостачанням

У контексті системи теплопостачання "розумного" житлового комплексу, сучасні виклики енергетичної трансформації, зумовлені Паризькою угодою та необхідністю скорочення викидів вуглецю [1], безпосередньо впливають на сектор опалення, який є одним з найбільших споживачів енергії та джерел викидів CO₂ [2]. На фоні зростання цін на енергоносії, особливо газу в Європі, підвищується актуальність пошуку ефективних та екологічних рішень для житлового сектору.

Саме тому системи централізованого теплопостачання (ЦТ), інтегровані в концепцію "розумного" житлового комплексу, визнаються ключовим елементом у декарбонізації та досягненні кліматичних цілей. Однак, різноманіття програмних інструментів для моделювання та симуляції теплових мереж, які використовують різні підходи, ускладнює вибір оптимального рішення для конкретного житлового комплексу. Це підкреслює доцільність детального огляду та порівняльного аналізу доступних інструментів, їхніх функціональних можливостей та підходів до моделювання, що є критично важливим для створення ефективних "розумних" систем теплопостачання.

Для глибокого розуміння та оптимізації функціонування теплових мереж «розумного» житлового комплексу необхідно сфокусуватися на основних концепціях та принципах їх моделювання. Доцільно провести огляд математичних моделей, що застосовуються саме до таких комплексів, дослідити різні чисельні методи, які використовуються для симуляції та аналізу, та виявити потенційні напрями для подальших досліджень і розробки

інструментів, що враховуватимуть специфіку мікрорайонів та окремих будівель.

Системи централізованого теплопостачання розглядаються як стратегічний інструмент для декарбонізації опалення в "розумних" житлових комплексах, оскільки вони дозволяють інтегрувати локальні джерела відновлюваного тепла, надлишкову відновлювану електроенергію та тепло, що утилізується від інших систем [3]. Ця інтеграція є важливим кроком до створення енергоефективних та екологічно чистих житлових просторів, відповідаючи загальноєвропейським тенденціям щодо збільшення частки ЦТ у забезпеченні потреб громадян в опаленні та гарячому водопостачанні, що підтверджується зростанням підключень новобудов до таких систем. У Європейському Союзі системи «розумного» теплопостачання із встановленою потужністю близько 300 ГВт теплової енергії (2021) забезпечує 12 % кінцевого споживання енергії для опалення приміщень та нагріву води, при цьому понад 17 000 мереж централізованого теплопостачання подають тепло приблизно 70 мільйонам громадян. У 2021 році до систем централізованого теплопостачання було підключено 22 % новобудов у Німеччині [4].

Розвиток систем централізованого теплопостачання з часом прогресував і був класифікований на чотири покоління за історичним розвитком, згідно з дослідженням [5]. Перші системи централізованого теплопостачання, що використовували гарячу пару як теплоносії, застосовувалися у 1880–1930 роках. У 1970-х роках з'явилося друге покоління – ефективніші водяні системи. Сучасні системи централізованого теплопостачання здебільшого належать до третього покоління, яке характеризується використанням ізольованих підземних трубопроводів і нижчими температурами подачі (менше 100 °C).

Подібним чином автори [6] визначили аналогічну класифікацію розвитку систем централізованого охолодження (ЦО) на чотири покоління:

- Перше покоління холодильних систем, впроваджене наприкінці XIX століття, використовувало централізовані конденсатори та випарники.

– Друге покоління, представлене у 1960-х роках, застосовувало компресійні чилери та холодну воду як теплоносії.

– Третє покоління розширило варіанти постачання холоду, використовуючи абсорбційні чилери, компресійні чилери та холодні акумулятори.

– Четверте покоління інтегрує системи охолодження з іншими секторами, часто у взаємодії із системами централізованого теплопостачання (ЦТ), створюючи «розумні» енергетичні системи [7].

Системи централізованого теплопостачання четвертого покоління (4GDH) були запропоновані автором наукової статті [8] для подолання викликів енергетичного переходу та характеризуються низькими температурами подачі в діапазоні 50–70 °C, що має декілька переваг. З боку генерації низька температура подачі дає змогу інтегрувати альтернативні джерела тепла, наприклад:

- утилізоване тепло;
- теплові насоси (ТН);
- біомасові станції.

З боку розподілу це допомагає зменшити теплові втрати. Загалом підвищується ефективність всієї системи централізованого теплопостачання, зокрема «розумного» житлового комплексу, що знижує експлуатаційні витрати та викиди парникових газів. Крім того, можуть використовуватися синергії між секторами опалення та електроенергетики, що відоме як секторна інтеграція [9], наприклад, за допомогою використання відновлюваних джерел енергії на електричному боці для постачання тепла [10].

У науковій літературі широко використовується нова концепція – централізоване теплопостачання та охолодження п'ятого покоління (5GDHC), що описує «розумну» енергетичну систему, яка одночасно забезпечує опалення та охолодження для «прос'юмерів» – споживачів, які також виступають виробниками теплового потоку [11]. Ця система характеризується низькотемпературною мережею з температурами гарячих трубопроводів у

межах 12–20 °C та холодних труб – 8–16 °C. 5GDHC поєднує децентралізовані теплові насоси на рівні будівель з джерелами тепла низької ентальпії, як от геотермальна енергія або утилізоване тепло. Окрім терміну 5GDHC, ця концепція також відома як:

- «ультранизькотемпературні мережі» [12];
- «двонаправлені мережі» [13];
- «енергетичні мережі» [14].

У [15] 5GDHC визначається як перспективна технологія, яка може співіснувати із системами 4GDH, а не як їхнє послідовне продовження. Ця термінологія також розглядається в [16]. Унаслідок розвитку технологій моделювання та імітація мереж централізованого теплопостачання, зокрема «розумного» житлового комплексу, стає дедалі складнішою, враховуючи гідравлічні, теплові та керуючі аспекти. Ці складності також поширюються на проєктування, планування розширення та операційне управління.

1.2 Методологія наукометричного пошуку в галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів

Будемо проводити систематичний огляд літератури з метою всебічного визначення сучасних підходів до моделювання мереж теплопостачання та супутніх інструментів, які підтримують ці підходи до моделювання, відповідно до [17]. Дослідження розділено на декілька ключових етапів.

Початковий аналіз – процес розпочався з аналізу відповідних оглядів за останнє десятиліття, що виявило потребу в детальному огляді математичних підходів до моделювання мереж ДН та інструментів, які застосовні до систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

Стратегія пошуку – наступним етапом було розроблення стратегії пошуку, що використовує категорії ключових слів та булеві оператори в базі даних Scopus (див. таблицю 1.1 [18]). Ця стратегія мала на меті проаналізувати опубліковані наукові статті та матеріали конференцій, і була обмежена

англомовними публікаціями. Як зазначено в таблиці 1.1, ключові слова були згруповані в чотири тематичні категорії та об'єднані за допомогою оператора "AND", що призвело до створення множини пошукових рядків.

Таблиця 1.1 – Стратегія систематичного огляду літератури та відповідні категорії ключових слів [18]

Категорія ключового слова	Ключові слова з відповідними логічними операторами
Категорія 1: Централізоване теплопостачання	(«централізоване опалення» АБО «централізоване охолодження» АБО «централізоване опалення та охолодження» АБО «теплове») І «мережа»
Категорія 2: Підходи до моделювання	«модель*» АБО «модель* підхід» АБО «модель* метод*» АБО «симуляція» АБО «оптимізація» АБО «оптимізація»
Категорія 3: Інструменти та програмне забезпечення	«програмне забезпечення» АБО «інструмент*» АБО «програма*»
Категорія 4: Мережеві аспекти	«дизайн*» АБО «експлуатація*» АБО «управління»

Критерії пошуку:

- заголовки;
- анотації;
- ключові слова;
- роки публікацій.

Систематичний огляд та аналіз даних – зосереджений, систематичний огляд та аналіз повних текстів, що дало можливість зменшити загальну кількість статей, які відповідають предметній області систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Для проведення бібліометричного аналізу цих статей був використаний VOSviewer [19].

Тому доцільно провести дослідження, яке всебічно охоплює найбільш важливі аспекти галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів, зокрема:

- моделювання компонентів;
- гідравлічні та теплові моделі;
- підходи до симуляції;
- алгоритми оптимізації;
- можливості мультиенергетичних мереж.

При цьому доцільно враховувати критерії технічної оцінки інструментів створення систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

1.3 Аналітичний огляд наукових публікацій щодо систем «розумного» теплопостачання

Впродовж останніх років було проведено низку оглядів [18] у сфері систем централізованого теплопостачання (ЦТ) та централізованого теплопостачання й охолодження (ЦТО), кожен із яких висвітлював різні аспекти цієї галузі. Ці аналітичні огляди наукових публікацій застосовні до систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. В таблиці 1.2 подано опис досліджень, що фокусуються на інструментах та підходах до моделювання.

Таблиця 1.2 – Дослідження, що фокусуються на інструментах та підходах до моделювання

Джерело	Рік	Сфера застосування та основні моменти
1	2	3
[20]	2015	Розглянуто підходи до моделювання та відповідні інструменти моделювання, які стосуються енергетичних систем районного рівня

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
[21]	2019	Огляд літератури щодо використання гнучкості в мережах ДНС за допомогою вдосконаленого керування
[22]	2020	Обстежено та класифіковано моделювання та методи оптимізації компонентів систем централізованого теплопостачання з акцентом на тепловій мережі
[23]	2022	Порівняння інструментів моделювання загального призначення для систем централізованої енергетики, обговорюючи їхні основні парадигми моделювання
[24]	2022	Розглянуто останні досягнення в районних системах і декілька стратегій оптимізації
[25]	2022	Узагальнено стан і перспективи спільно використовуваних енергетичних систем і систем 5GDHC в контексті рішень високого рівня управління, бізнес-моделей, інструментів моделювання, платформ, а також юридичних і соціологічних проблем у реалізації
[26]	2023	Оцінено поточні методи моделювання мереж опалення та охолодження. Запропоновано гібридний підхід із використанням останніх технологічних досягнень

Таблиця 1.3 – Дослідження, що фокусуються на концепціях, стратегіях, класифікаціях та загальних досягненнях

Джерело	Рік	Сфера застосування та основні моменти
1	2	3
[27]	2016	Запропоновано новий підхід до класифікації систем централізованого теплопостачання на основі їх географічного розташування, масштабу
[28]	2018	Проаналізовано процеси постачання тепла

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
[29]	2023	Розглянуто системи централізованого теплопостачання з акцентом на оптимізації дизайну прогнозування
[30]	2023	Подано оцінку можливості та бар'єри для мереж централізованого теплопостачання з децентралізованими енергетичними підстанціями на шляху до цілісної декарбонізації, яка базується на з'єднанні секторів та накопиченні енергії

Наприклад, дослідження стратегій оптимізації та керування відіграє важливу роль у розвитку систем централізованого теплопостачання та охолодження. Автори [28] зосередилися на використанні гнучкості в мережах централізованого теплопостачання та охолодження за допомогою передових механізмів керування, тоді як в [21] проведено огляд методів оптимізації в теплових розподільчих мережах.

Ще одним важливим напрямом є інтеграція відновлюваних джерел енергії та стратегії декарбонізації. Автори [29] дослідили впровадження децентралізованих енергетичних підстанцій у мережах централізованого теплопостачання та охолодження, наголошуючи на секторальній інтеграції та зберіганні енергії як шляхах до комплексного підходу до декарбонізації. Крім того, в [30] розглянули стратегії зниження температури подачі в існуючих системах централізованого теплопостачання, а у [31] підкреслено значний потенціал систем централізованого теплопостачання та охолодження, акцентуючи на необхідності подальших досліджень і розробок.

У технічному моделюванні автори [25] дослідили різні універсальні та спеціалізовані інструменти моделювання, оцінюючи їхні підходи та придатність для певних типів мереж централізованого теплопостачання та систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів, як їх складових.

У контексті проектування систем та їхньої географічної адаптації [27] запропонували нову класифікацію систем централізованого теплопостачання на основі:

- географічного розташування;
- масштабу;
- щільності теплового навантаження;
- попиту кінцевих споживачів;
- надаючи глибший аналіз;
- адаптований до місцевих умов і вимог.

Аналогічно, автори [26] здійснили широке економічне та технологічне оцінювання технологій опалення та охолодження в Європі, висвітлюючи регіональні відмінності та потенційні економічні наслідки. Попри значний внесок наявних досліджень, бракує комплексного й актуального огляду, зосередженого саме на моделюванні мереж теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

1.4 Бібліографічний аналіз в галузі систем «розумного» теплопостачання за допомогою VOSviewer

Для бібліографічного аналізу було використано програмне забезпечення VOSviewer [19] для створення візуального представлення бібліометричних мереж та карт, з фокусом на аналізі співіснування ключових слів та співцитовання. На рисунку 1.1 подано карту співіснування авторських ключових слів з вибраної наукової літератури, де кола представляють ключові слова, розмір яких визначається частотою їх співіснування [18]. З множини ключових слів сорок три відповідали мінімальному порогу частоти виникнення, з обмеженням на тридцять символів для кожного ключового слова. Градієнт від жовтого до синього внизу представляє часову шкалу. В результаті аналізу [18] були виявлені різні кластери. В центрі знаходяться терміни «district heating» та «district heating network» як основні ключові слова.

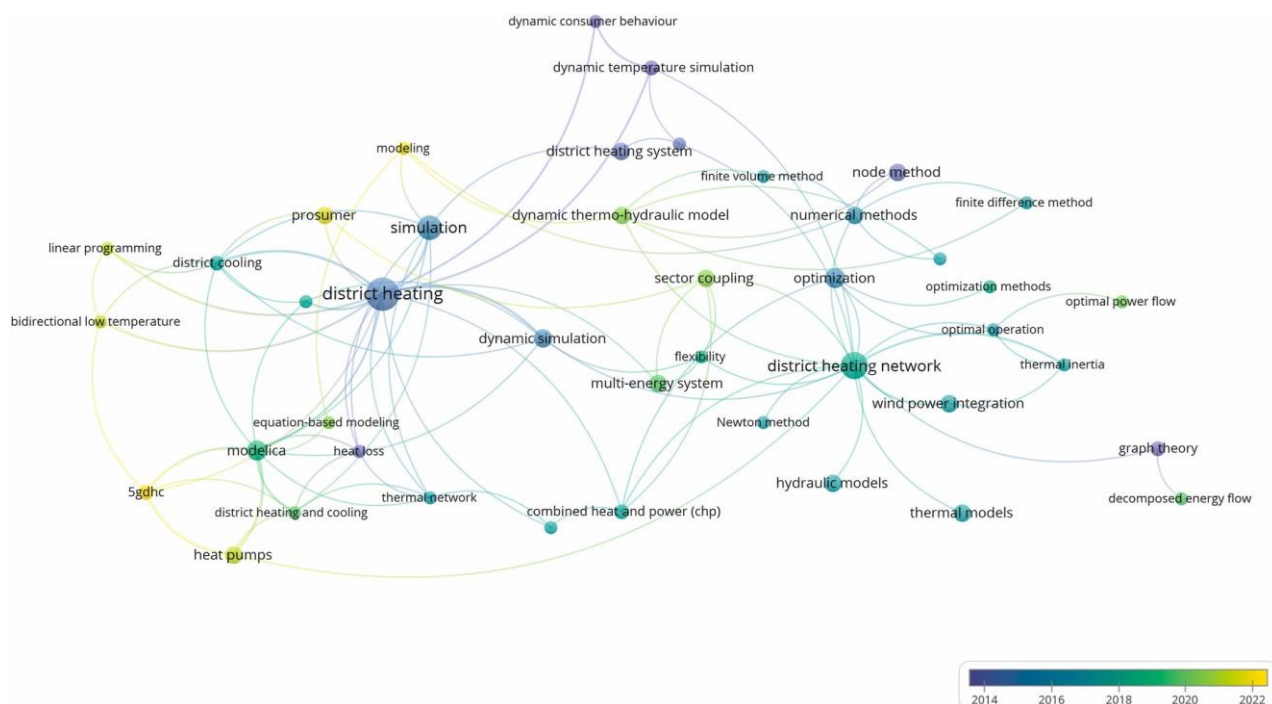


Рисунок 1.1 – Бібліометричний аналіз ключових слів в галузі «розумного» теплопостачання [18]

Тісно пов'язані з ними терміни, як от «simulation», «modeling», «optimization» та «multi-energy systems», що вказує на ключові аспекти досліджень у цій галузі.

Є вузли, пов'язані з оптимізацією та чисельними методами, що тісно пов'язані з «district heating», як от «метод кінцевих об'ємів», «метод вузлів» та «метод кінцевих різниць», що вказує на фокус на чисельних методах для оптимізації систем ДН [18]. Терміни «гідравлічні моделі» та «теплові моделі» з'являються нижче центральних термінів, що становлять фізичне моделювання мереж теплопостачання (ДН).

Зліва жовті кола підкреслюють інноваційні та новітні терміни досліджень, як от «бідирекційна низькотемпературна система», «просумер» і «5GDHC» [18]. Ці терміни безпосередньо пов'язані з «розумними мережами теплопостачання та охолодження» та «тепловими насосами», що вказує на фокус на передових технологіях для енергоефективності та залучення просumerів до систем ДН. Також зазначено, що найбільш цитованими джерелами є журнали Energy, Applied Energy, Applied Thermal Engineering.

1.5 Висновок до першого розділу

В першому розділі кваліфікаційної роботи описана предметна область «розумних» систем теплопостачання. Подана методологія наукометричного пошуку в галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Виконано аналітичний огляд наукових публікацій щодо систем «розумного» теплопостачання. Проведено бібліографічний аналіз в галузі систем «розумного» теплопостачання за допомогою VOSviewer.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

2.1 Моделі та методи формування мереж «розумного» теплопостачання

У галузі моделювання мереж «розумного» теплопостачання було розроблено різні підходи, які застосовувалися в конкретних випадках для розуміння та оптимізації теплових потоків (див. таблицю 2.1).

Таблиця 2.1 – Моделі мереж «розумного» теплопостачання [18]

Джерело	Модель	Опис, застосування
[32]	Метод характеристик	Подано новий числовий підхід до моделювання теплопередачі по довгих трубах
[33]	Стаціонарний режим	Запропоновано метод часткового роз'єднання для розділення великомасштабних систем теплопостачання з довільною топологією на малі радіальні системи для розрахунку потоку енергії
[34]	Квазістаціонарний режим	Розширено стаціонарні методи шляхом об'єднання гідравлічної та динамічної теплової поведінки в єдиній системі рівнянь та одночасного розв'язання
[18]	Метод характеристик	Представлено новий термогідравлічний модульний інструмент моделювання систем ЦТ

Щоб кількісно оцінити вплив і поширеність підходів до моделювання систем «розумного» теплопостачання в академічних дослідженнях, на рисунку 2.1 подано графічний аналіз, заснований на розширеному пошуку в Scopus. Графік демонструє, частоту згадування підходів до моделювання «розумних» теплових мереж в заголовках, анотаціях або ключових словах впродовж

останнього десятиліття. Методика пошуку полягала у поєднанні назви кожного підходу до моделювання з фразою «district heating» [18].

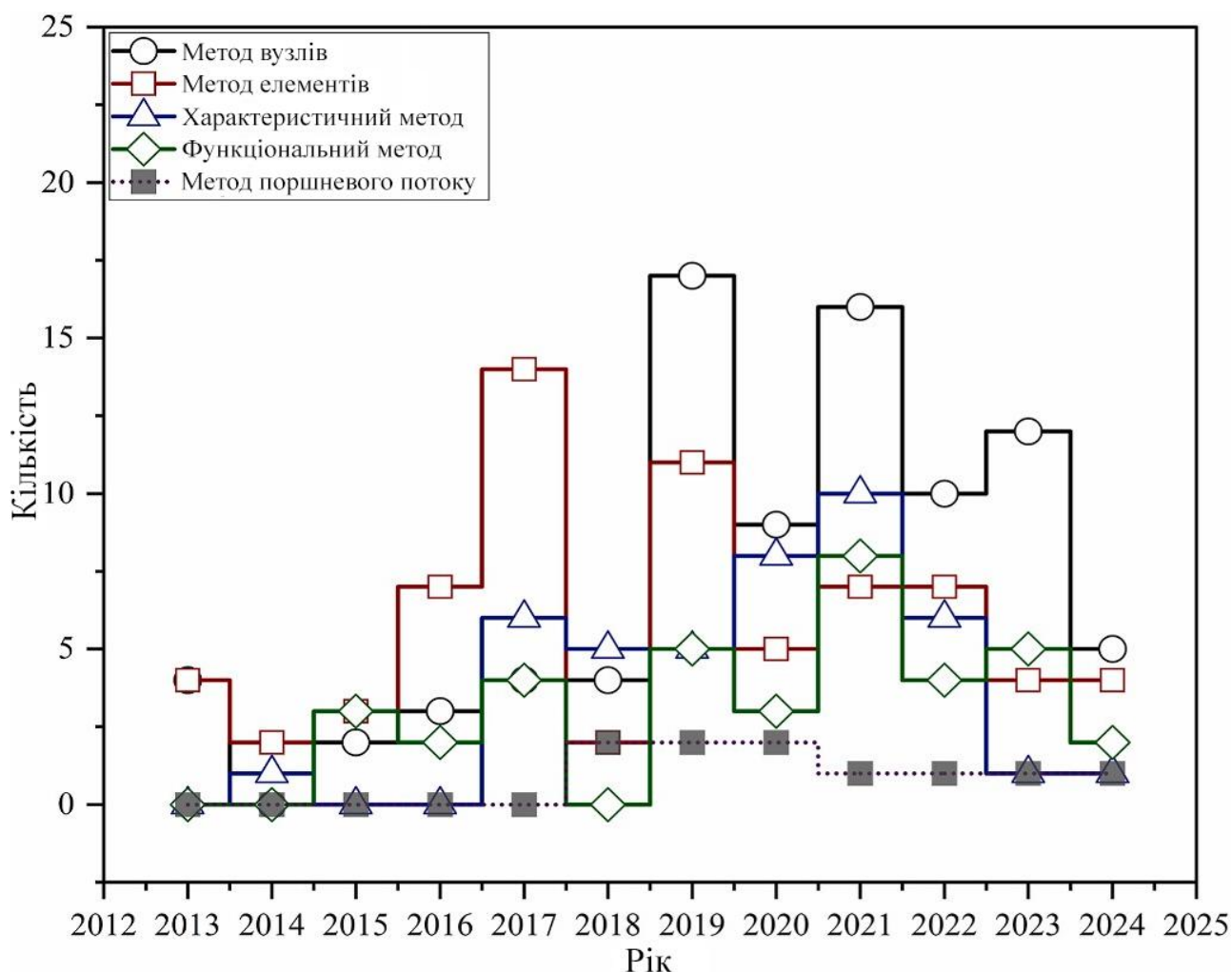


Рисунок 2.1 – Аналіз на основі даних Scopus найбільш пов'язаних підходів до моделювання у дослідженнях «розумних» теплових мереж (district heating) [18]

Початкові стаціонарні моделі, як-от моделі Франца і Грігулла [35], Меніхарта і Хомоннаї [36], а також Валлентена [37], заклали основу, зосереджуючись на теплових втратах у підземних трубопроводах. Ці дослідження варіювалися від експериментальних установок, що демонструють розподіл температур, до формулювання рівнянь для стаціонарних теплових втрат у трубах подачі та повернення, з поступовим підвищенням точності завдяки урахуванню складних конфігурацій трубопроводів та порядків мультипольного розкладу.

Аналітична алгоритмічна техніка [38] означила перехід до врахування часових змін температур у вузлах мережі. Цей метод коригував масові витрати між споживачами задля рівномірної зміни температури, незалежно від температури потоку.

«Метод вузлів» (node method), вперше запропонований автором [39], є технікою просторової дискретизації, яка представляє змінні стану лише у вузлах мережі. У цьому методі температура на виході трубопроводу у заданий момент часу апроксимується як лінійна комбінація минулих вхідних температур, з ваговими коефіцієнтами, що визначаються допоміжними змінними індексації часу. «Метод елементів», заснований на температурному профілі вздовж труби, як зазначено в [40], перевершує «метод вузлів», який покладається на історичні дані температури і потоку в одній точці, через проблему числового розмиття температурного профілю. Хоча «метод елементів» є високоточним, він має два основні обмеження, що стримують його застосування: тривалий час обчислень та поява штучного числового розмиття. Проте сам «метод вузлів» застосовувався у прикладних дослідженнях, зокрема у [41]. Автори використали підхід на основі прогнозного керування для моделювання процесів розповсюдження температури в системах теплопостачання та надали точне рішення рівняння теплопередачі, демонструючи практичну цінність і ефективність.

«Характеристичний метод», який часто розглядається як розширення «методу елементів», передбачає поділ трубопроводу на сегменти та перетворення рівнянь теплоперенесення на звичайні диференціальні рівняння вздовж характеристичних ліній. Цей метод використовувався для динамічного моделювання у [32]. Згідно з [42], «характеристичний метод» є точнішим за «метод вузлів», однак вимагає більше обчислювальних ресурсів.

Автори [43] запропонували іншу динамічну модель, яку назвали «метод функцій» для моделювання систем «розумного» теплопостачання, що використовує дискретне перетворення Фур'є для представлення затримок передачі та втрат у тепловій мережі через лінійну апроксимацію.

Останнім часом зросла зацікавленість у використанні об'єктно-орієнтованого моделювання для систем теплопостачання, зокрема застосування методу «поршневого потоку». Автори [44] продемонстрували ефективність цього підходу, використовуючи лагранжеву специфікацію. А в [45] описано процес розробки бібліотеки на основі Modelica.

Наразі «метод вузлів» залишається найширше використовуваним підходом, і його ефективність з точки зору вищої точності та витрат на обчислення порівняно з методом скінченних різниць була підтверджена в [46]. Водночас цей метод часто передбачає використання цілочисельних змінних, що призводить до збільшення обчислювального навантаження [47]. Щоб подолати цей розрив, доцільно було б створити стандартизовані тестові випадки для систем теплопостачання, подібно до існуючих прикладів для електричних систем [18], як от:

- тестові випадки IEEE;
- Simbench;
- еталонні системи CIGRE.

У цьому параграфі було систематично проаналізовано поточний стан математичних підходів до моделювання в «розумних» системах мережах централізованого теплопостачання (DH) і теплопостачання та охолодження (DHC) шляхом всебічного огляду літератури.

2.2 Моделювання систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів

Для повного використання переваг мереж теплопостачання «розумних» житлових комплексів необхідна відповідна математична модель, а також методи симуляції та оптимізації. Мережі теплопостачання «розумних» житлових комплексів є складними системами, які вимагають інтеграції гідравлічної та теплової динаміки для точного представлення механіки рідин та термодинаміки. Точне моделювання процесів теплопостачання «розумних»

житлових комплексів передбачає симуляцію транспортування енергії в системі, що визначається термофізичними властивостями середовища теплопередачі, зазвичай води. Це вимагає детального розуміння масової витрати, температурних градієнтів та різниць тиску, які рухають потік. Важливо враховувати складну взаємодію гідравлічного опору, втрат тепла та теплової інерції в межах мережі тепlopостачання «розумного міста».

Моделювання тимчасової та просторової динаміки рідин у мережах тепlopостачання (DH) «розумного міста» базується на нелінійних часткових диференціальних рівняннях, які охоплюють гідравлічні аспекти через рівняння, як от рівняння Нав'є-Стокса:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (1.1)$$

де ρ – густина рідини;

$\mathbf{u}$ – вектор швидкості рідини;

t – час;

p – тиск;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості;

∇^2 – оператор Лапласа, що вказує на дифузію імпульсу через в'язкість у рідині;

$\mathbf{g}$ – сила тяжіння на одиницю маси (тобто гравітація).

Теплові аспекти через рівняння транспорту тепла та збереження маси [48]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (1.2)$$

де c_p – питома теплоємність;

T – температура;

k – теплопровідність;

Q – генерація тепла на одиницю об'єму;

∇^2 – оператор Лапласа, що вказує на дифузію тепла в просторі.

Теплові аспекти через рівняння транспорту тепла та збереження енергії [48]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1.3)$$

де T – температура;

α – теплова дифузійність матеріалу;

∇^2 – оператор Лапласа, що вказує на дифузію тепла в просторі.

Оптимізаційні моделі для роботи теплових мереж «розумного міста» базуються на часткових диференціальних рівняннях, часто відомих як моделі теплового оптимального потоку енергії або оптимального теплового потоку [41]. Часткові диференціальні рівняння зазвичай розв'язуються за допомогою чисельних методів для перетворення безперервних рівнянь у систему нелінійних алгебраїчних рівнянь. Ці рівняння можна вирішувати ітераційно, використовуючи традиційні методи.

Через повільніше поширення температурних коливань порівняно з розподілом тиску, гідравлічні та теплові частини підходів можуть бути або з'єднані, або розділені, що також відомо в літературі як інтегровані та розкладені методи.

У розділеному підході до розрахунку гідравлічне завдання обчислюється спочатку, після чого проводяться теплові розрахунки, використовуючи отримані масові витрати з гідравлічного аналізу. Гідравлічне завдання зазвичай вирішується за допомогою методу Харді-Кроса [49] або методу Ньютона-Рапсона [50]. Метод Харді-Кроса аналізує кожну петлю окремо, тоді як метод Ньютона-Рапсона оцінює всі петлі одночасно [50].

Інтегрований гідравлічно-термічний розрахунок поєднує гідравлічну та теплову частини в одну єдину систему і може бути розв'язаний за допомогою методу Ньютона-Рапсона та інтегрованої матриці Якобі [50]. Поєднаний метод досягає ефективнішої збіжності через меншу кількість ітерацій, тоді як

розділений підхід до мережі демонструє повільнішу збіжність, особливо в більших мережах, що вимагає оптимізаційних розглядів [51].

Залежно від характеристик гідравлічних і теплових процесів у мережі ДН «розумного» житлового комплексу, підходи до моделювання для операційного аналізу можна класифікувати (див. таблицю 2.2):

- стаціонарні;
- квазі-динамічні;
- динамічні.

Таблиця 2.2 – Підходи до моделювання для роботи з урахуванням динамічних властивостей «розумної» мережі ДН [18]

Аналіз	Особливості
Стаціонарний	Термічна динаміка знехтована. Гідравлічна динаміка знехтована
Квазідинамічний	Поєднує гідравлічну динаміку як стаціонарну теплову динаміку з динамічною
Динамічний	Розглянута термодинаміка Розглянута гідродинаміка

У стаціонарному аналізі динамічні властивості теплових і гідравлічних процесів ігноруються. Квазі-динамічні або псевдо-динамічні моделі змодельовують гідравлічну задачу як стаціонарну, а теплову задачу як динамічну, і часто зустрічаються в науковій літературі [40]. У динамічному аналізі враховуються як динаміка температури, так і потоку. Більшість з'єднаних підходів [18] базуються на стаціонарному аналізі. Однак автор [34] розширив спільний аналіз, зокрема, динамічну теплову поведінку. Припущення, необхідні для спрощення часткових диференціальних рівнянь, що веде до моделі трубопроводу з одним просторовим виміром, і моделі симуляції для стаціонарної теплової мережі, описані в [46].

Теорія графів або матричний підхід широко використовуються в моделюванні для представлення мережі. Вузли відповідають компонентам

«розумної» теплової мережі, наприклад, джерела тепла, споживачі, з'єднання, а ребра представляють трубопроводи, які з'єднують ці компоненти. Це графічне представлення надає можливість використовувати графічні алгоритми для аналізу та оптимізації мережі.

Гідрравлічне рішення в мережі визначає масові витрати та тиски, використовуючи рівняння для збереження масових витрат у вузлах та втрати тиску вздовж трубопроводу і через тертя трубопроводу. Теплове рішення обчислює температури подачі та зворотного потоку в кожному вузлі, зокрема:

- рівняння для втрат тепла та змін температури вздовж труби;
- передану теплову потужність;
- температури сумішей у вузлах (див. таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Гідрравлічні та теплові рішення в мережах «розумних» житлових комплексів

Модель	Обмеження
Гідрравлічна частина	Збереження маси в кожному вузлі Падіння тиску в петлі
Теплова частина	Втрати тиску вздовж трубопроводу

Загалом було виявлено, що література з математичної оптимізації «розумних» систем та мереж теплопостачання на даний момент часу є обмеженою. Зокрема, обмежено висвітлено питання математичної оптимізації ДН-мереж. Прикладні дослідження здебільшого зосереджуються на окремих кейсах, а також спостерігається серйозний брак валідації моделей на основі реальних умов експлуатації. Це вказує на дефіцит стандартизованих тестових прикладів і розвинених стратегій управління. Крім того, фізично обґрунтоване моделювання для оптимізації процесів експлуатаційного управління «розумними» тепломережами все ще перебуває на початковій стадії розвитку й наразі не є придатним для інженерного застосування. Отже, попри значний прогрес у розвитку інструментів симуляції ДН-мереж, різноманітність підходів

до моделювання та покращення функціональних можливостей, ця сфера досі стикається з викликами щодо стандартизації, валідації та оптимізації.

2.3 Стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» житлових комплексів

Температура та масова витрата є двома основними змінними, що використовуються для керування «розумною» мережею теплопостачання. У наявних системах теплопостачання застосовуються типи керування:

- Постійна витрата – змінна температура або «якісне керування», де масова витрата залишається сталою, а температура подачі змінюється.
- Змінна витрата – постійна температура або «кількісне керування», де масова витрата змінюється залежно від потреб споживачів в енергії, тоді як температура подачі залишається сталою.
- Змінна витрата – змінна температура, коли одночасно змінюються і масова витрата, і температура подачі.

У режимах постійна витрата – змінна температура та змінна витрата – постійна температура значення масової витрати або температури можуть змінюватися поступово [51]. Переваги та недоліки різних стратегій керування для тепломереж наведені в таблиці 2.4 [18].

Таблиця 2.4 – Переваги та недоліки різних стратегій керування для мереж теплопостачання [18]

Стратегія контролю	Математична модель	Обчислювальна складність	Гнучкість	Точність
1	2	3	4	5
Змінна витрата – змінна температура	Змішане цілочисельне нелінійне програмування	Високий	Змінні часові затримки та накопичення енергії	Високий

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5
Змінна витрата – постійна температура	змішане цілочисельне нелінійне програмування	Високий	Змінні часові затримки	Низький
Постійна витрата – змінна температура	Лінійне програмування	Низький	Виправлені затримки часу	Низький

Хоча були запропоновані ітеративні алгоритми для розв’язання цих задач [52], вони можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів навіть для відносно невеликих систем і не завжди сходяться.

Втім, важливо зазначити, що моделювання з постійною температурою або сталою масовою витратою обмежує репрезентативність моделей, особливо у випадку гнучких та інноваційних «розумних» систем четвертого (4GDHC) та п’ятого (5GDHC) поколінь теплопостачання, де різні джерела подачі мають різні температурні рівні [18].

2.4 Інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів

Існуючі програмні інструменти для аналізу мереж теплопостачання «розумних» житлових комплексів і «розумного» централізованого теплопостачання та охолодження (ЦТО) використовують різні підходи до моделювання, відповідність яких залежить від конкретного випадку застосування. Через це фахівці часто стикаються з труднощами у виборі найбільш підходящого інструменту, враховуючи специфічні вимоги до моделювання. У цьому параграфі подано огляд програмного забезпечення, що

використовується для моделювання та аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів і «розумних» систем опалення та охолодження (DHC). Зокрема, підкреслюється, які програми підходять для різних сценаріїв використання, а також надається загальне уявлення про складність моделювання.

Рисунок 2.2 демонструє, як часто в публікаціях згадуються конкретні інструменти для моделювання у поєднанні з терміном «district heating» у назві, анотації або ключових словах.

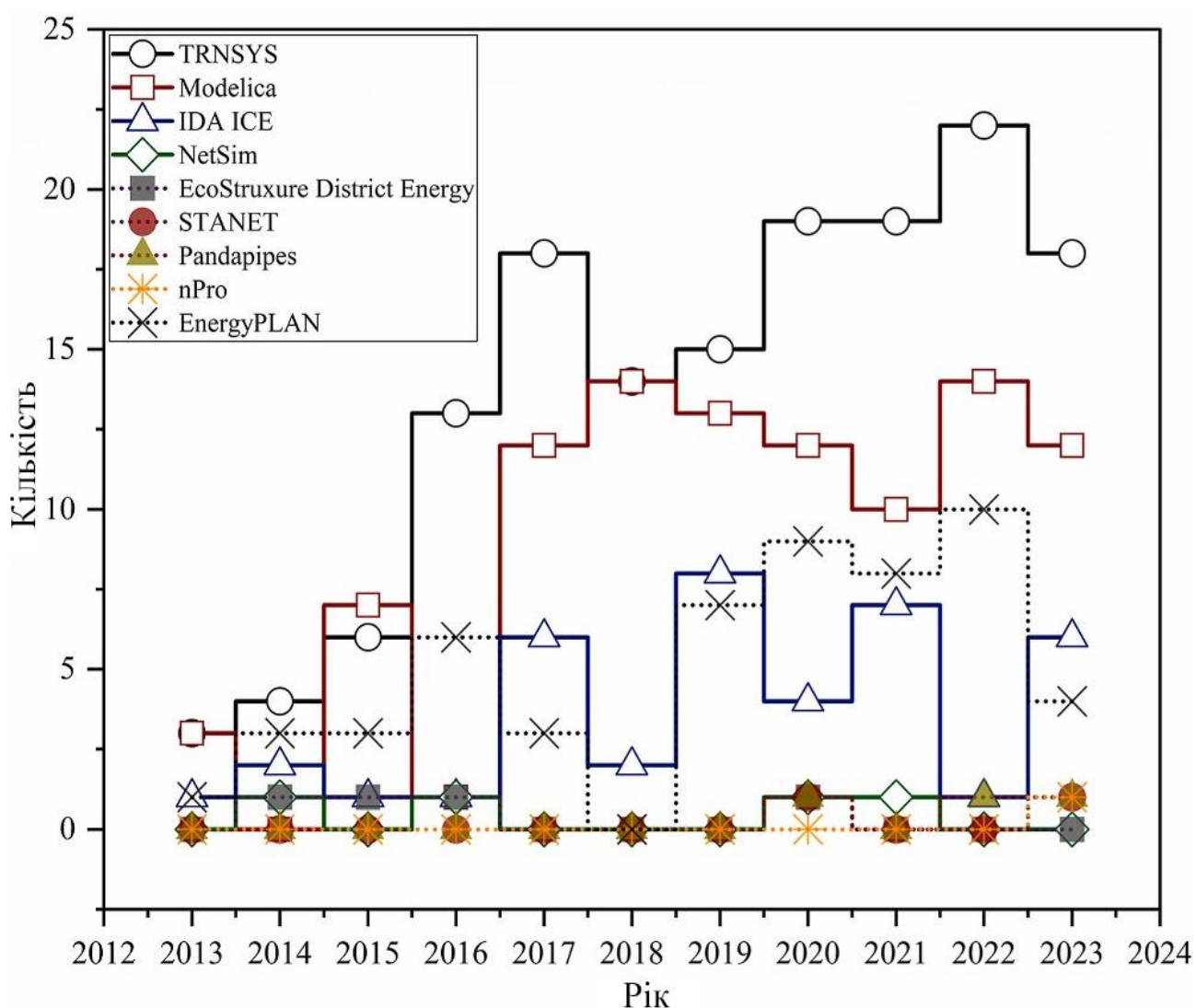


Рисунок 2.2 – Аналіз інформаційно-технологічних інструментів, найбільш асоційованих із дослідженнями в галузі «розумного» теплопостачання [18]

Пошук проводився за наукометричною базою даних Scopus. Це візуальне представлення підкреслює наукову увагу до зазначених інструментів та тенденції у дослідженнях «розумних» систем ДН та ДНС із використанням різного програмного забезпечення для моделювання. Пошук кожного інструменту в базі Scopus здійснювався за поєднанням назви інструменту з терміном «district heating» у назві, анотації та ключових словах публікацій [18].

Серед найбільш часто згадуваних у науковій літературі програм варто відзначити TRNSYS [53], Modelica [54], IDA ICE [55] та EnergyPLAN [56]. Особливо популярною Modelica стала для моделювання «розумних» ДНС-систем впродовж останніх п'яти років. Менше присутні в дослідженнях ДН такі інструменти, як NetSim [57], EcoStruxure District Energy (раніше Termis) [58] та STANET [59]. Таблиця 2.5 містить перелік ключових інструментів аналізу «розумних» систем теплопостачання і описує їх призначення в контексті моделювання, симуляції та оптимізації відповідно до інформації від розробників.

Таблиця 2.5 – Обрані інструменти для огляду [18]

Назва	Моделювання	Оптимізація	Симуляція
1	2	3	4
TRNSYS	Так	Ні	Так
IDA ICE	Так	Так	Так
EcoStruxure District Energy (колишній Termis)	Так	Так	Так
STANET	Так	Ні	Так
ROKA	Так	Ні	Так
Pandapipes	Так	Ні	Так
Dymola	Так	Так	Так
nPro	Так	Так	Так
heatbeat	Так	Так	Так

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4
NetSim	Так	Так	Так
EnergyPLAN	Так	Так	Так

Деякі інструменти, зокрема nPro [60], [61] та pandaripes [62], є відносно новими в цій галузі. Крім того, до цього огляду були додані такі інструменти, як heatbeat [63] та ROKA [64], які були виявлені під час аналітичного огляду наукових публікацій. Остаточний перелік інструментів, включених до цього аналізу, було сформовано на основі результатів аналізу.

Modelica [54] – це об’єктно-орієнтована, рівняння-заснована, декларативна мова моделювання, що підтримує моделювання складних фізичних систем з ієрархічною структурою. Крім того, Modelica дає можливість створення багатодомених систем, неklasичне (акаузальне) моделювання на основі компонентів і здатна працювати з різними граничними умовами даних. Мову підтримують як відкриті, так і комерційні програмні засоби, включно з Modelica Standard Library та низкою відкритих бібліотек компонентів. Також можна створювати нові бібліотеки компонентів.

Modelica-бібліотека IBPSA [65] є багатофункціональним інструментом, що використовує моделі для «розумного» опалення та охолодження, різні типи будівель, накопичувачі енергії (зокрема, резервуари для води та льоду), геотермальні свердловини, матеріали з фазовими переходами та акумулятори. Також вона містить функції для теплопередачі в приміщеннях, багатозонального повітрообміну та електросистем.

Декілька відомих безкоштовних відкритих бібліотек Modelica було розроблено спеціально для моделювання «розумних» DHC-систем, зокрема:

- AixLib від RWTH Aachen University [66]
- Buildings від Lawrence Berkeley National Laboratory [67]
- BuildingSystems від UdK Berlin [68]
- IDEAS від KU Leuven [69]

Усі вони базуються на основній бібліотеці IBPSA [65].

TRNSYS (TRaNsient SYStems) [53] – це графічне програмне середовище, яке в першу чергу використовується для моделювання перехідних (нестационарних) процесів у таких системах, як сонячні установки, енергоефективні будівлі, HVAC-системи, поновлювані джерела енергії, когенераційні установки та паливні елементи. Написана на Fortran, ця платформа може розширюватися шляхом модифікації наявних компонентів TRNSYS або створення нових. Стандартна модель трубопроводу в бібліотеці TRNSYS базується на методі «проточного потоку» (plug flow).

Програмне забезпечення для моделювання будівель IDA ICE [55] часто використовується для моделювання мереж ДНС. Воно пропонує функції термічного та гідравлічного моделювання як у стаціонарному, так і в динамічному режимах, редаговані бібліотеки, модульну архітектуру та імпорту даних з CAD. Остання версія, IDA ICE 5, зосереджується на концепції «просюмера», містить нову модель вузла потоку для одно- або двонаправлених потоків, а також моделі двонаправленого руху для «розумних» ДН-мереж, засновані на методах «plug-flow» і скінчено-різницевого підході. Моделювання на основі рівнянь, що використовує нейтральний формат моделі (NMF), подібний до Modelica, дає змогу розширювати функціонал програмного забезпечення новими моделями.

EcoStruxure District Energy (раніше Termis) від компанії Schneider Electric [58] – це комплексний комерційний інструмент для проєктування, експлуатації та оптимізації «розумних» ДН-мереж, включно з їхніми гідравлічними та термодинамічними аспектами. Його основна перевага полягає у моніторингу роботи в режимі реального часу, статусу мережі, змін у попиті та погодних умовах.

STANET [59] – це програмне забезпечення, призначене для стаціонарних і динамічних розрахунків мереж, зокрема газових, водопровідних, електричних, «розумних» ДН і каналізаційних систем. Воно характеризується модульною структурою та відкритими, редагованими бібліотеками компонентів, а також

використовує дані мереж із зовнішніх джерел, як от ГІС або CAD-системи, надаючи інтерфейси імпорту та можливість розрахунку поведінки окремих компонентів мережі, наприклад, трубопроводи та підключення до будинків. Ітераційний підхід до обчислень забезпечує точний аналіз температурних і тискових характеристик у різних частинах мережі, з відображенням результатів у вигляді наочних карт даних.

ROKA [70] – ще один широко використовуваний інструмент у промисловості, який зосереджений на розрахунках розподілу тиску та температури, а також тепловтрат у «розумних» системах та мережах теплопостачання. Він має широку бібліотеку стандартних типів трубопроводів, налаштовувані криві споживання та насосні характеристики, а також моделі первинної та вторинної сторін теплообмінників для гідравлічного роз'єднання. ROKA використовує метод Ньютона-Рафсона для гідравлічних розрахунків, нелінійну гідравлічну модель на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха, а також лінійно апроксимовану теплову модель, реалізовану через лінійне трасування потоків мас. «Розумні» мережі охолодження та опалення можна поєднувати в єдину систему, що дає змогу інтегрувати як споживачів, так і генератори тепла та холоду.

Pandarpipes [62] – це open-source пакет, призначений для статичного аналізу збалансованих систем потоків рідини. Він дає можливість обчислювати розподіл температури, тиску та швидкості в «розумних» системах та мережах теплопостачання за допомогою алгоритмів «трубного потоку» (pipe flow), подібно до розрахунків навантажень в електричних мережах. Pandarpipes моделює стани мережі як послідовні знімки квазістатичного термогідравлічного рівноважного стану. Хоча він не підтримує створення користувацьких моделей напряду, можливе налаштування граничних умов через так звані «контролери» та моделювання мультиенергетичних мереж через інтеграцію з pandapower.

Широко визнаним інструментом моделювання є безкоштовне програмне забезпечення EnergyPLAN [56]. Воно моделює «розумні» системи

централізованого теплопостачання (ЦТ) у трьох групах: малі децентралізовані системи без використання електромережі, децентралізовані системи з використанням мережі, наприклад:

- когенерація (СНР);
- теплові насоси (НР);
- великі централізовані системи з використанням електромереж;
- великі ТЕЦ.

Модель балансує погодинні теплові навантаження, використовуючи різні джерела тепла – в першу чергу надлишкове тепло з промисловості, спалювання відходів, сонячних і геотермальних джерел, далі – ТЕЦ і теплові насоси з тепловими акумуляторами, і, нарешті, котли для покриття пікових навантажень.

nPro [60] – це інноваційний веб-інструмент для проєктування систем районного теплопостачання та «розумних» теплових мереж. Він використовує енергетичні баланси для моделювання компонентів мережі та розраховує втрати тепла і тиску для окремих ділянок, з погодинною деталізацією та квазістатичним моделюванням. Інструмент послідовно виконує спочатку гідравлічне, а потім теплове моделювання, використовуючи нелінійну гідравлічну поведінку на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха та лінійну апроксимацію розподілу температури відповідно до стандарту DIN EN 13941.

Heatbeat Digital Twin [63] – ще один німецький комерційний програмний інструмент, орієнтований на моделювання та оптимізацію «розумних» систем та мереж централізованого тепла та холоду (DHC). Використовуючи різні мови моделювання, наприклад, Modelica та Python, він забезпечує повну термогідравлічну модель для динамічного моделювання мереж опалення та охолодження.

NetSim [57] – це комерційний інструмент моделювання для розрахунку трубопровідних мереж у «розумних» DHC-системах. Він надає користувачам можливість проєктувати мережі трубопроводів, оптимізувати температуру в трубопроводах і роботу насосів, а також мінімізувати теплові втрати.

Інструмент використовує вузли та трубопроводи для моделювання різних компонентів системи:

- навантаження;
- термостатичні байпаси;
- виробничі установки;
- трьохходові клапани;
- акумулятори.

NetSim застосовує послідовний підхід до термогідравлічного моделювання: спочатку гідравлічне моделювання з використанням рівнянь втрат тиску та формули Коулбрука-Вайта, потім – теплове. Додатково, його динамічний модуль моделює зміни входних температур і навантажень з часом, проводячи серію стаціонарних розрахунків з інтервалами, визначеними користувачем [18].

Більшість сучасних інструментів для моделювання «розумних» систем та мереж централізованого теплопостачання (ДН) використовують послідовний підхід: спочатку вирішуються гідравлічні задачі з використанням рівняння Дарсі-Вейсбаха, а потім – теплові аспекти на основі лінійних апроксимацій. Зокрема, ROKA та STANET спеціалізуються на теплових мережах і зосереджені на термогідравлічних розрахунках. Проте, інтегрований підхід, який одночасно враховує теплові та гідравлічні параметри, можливий завдяки акаузальному моделюванню в Modelica. Останнім часом Modelica привертає все більше уваги для симуляції «розумних» ДНС-мереж і аналізу їхніх термогідравлічних характеристик саме через свій рівнянний або акаузальний підхід.

Певні інструменти, як-от nPro, Heatbeat чи IDA ICE, з'являються з новими технічними можливостями, що дає можливість враховувати специфіку «розумних» систем та мереж 4GDHC та 5GDHC, тоді як інші, наприклад NetSim, більше орієнтовані на традиційні ДНС-системи.

Ще однією перевагою є те, що деякі з цих інструментів (наприклад, Dymola, TRNSYS) підтримують ко-симуляцію за стандартом FMI або

моделювання в режимі реального часу за допомогою платформ HiL. Крім того, деякі інструменти, як-от Dymola та EcoStruxure District Energy (колишній Termis), мають можливості роботи з даними «розумних» систем та мереж у режимі реального часу. У той час як деякі інструменти, зокрема, ROKA (електрика, газ) чи nPro (водень), мають технічну можливість моделювання мультиенергетичних систем, усе ще бракує комплексних інструментів, які детально охоплюють як теплові, так і електричні аспекти.

Інструменти були порівняні за їхніми підходами до моделювання, сферою застосування та функціональними можливостями, з акцентом на їхні переваги та обмеження. Огляд літератури показав широке застосування цих інструментів у моделюванні «розумних» систем та мереж ДН і ДНС. Зокрема, спостерігається зростання інтересу до акаузального моделювання для симуляції систем 4GDHC і 5GDHC. У той час як більшість комерційних інструментів наразі використовують послідовне моделювання, розділяючи гідравлічні та теплові аспекти, наукова література все частіше підтримує інтегровані підходи. Також зростає інтерес до динамічної симуляції та аналізу «розумних» систем та мереж у режимі реального часу. Нові інструменти починають використовувати функціонал для 4GDHC і 5GDHC, а також можливість ко-симуляції, що свідчить про поступовий перехід до більш комплексного й інтегрованого моделювання.

2.5 Висновок до другого розділу

В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено моделі та методи мереж «розумного» теплопостачання. Описано моделювання систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Розглянуто стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» житлових комплексів. Досліджено інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ «РОЗУМНОГО» ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Інформаційно-технологічна архітектура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу

На рисунку 3.1 подана комплексна інформаційно-технологічна архітектура системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу, яка демонструє багатошаровий підхід до збору, обробки та аналізу даних.

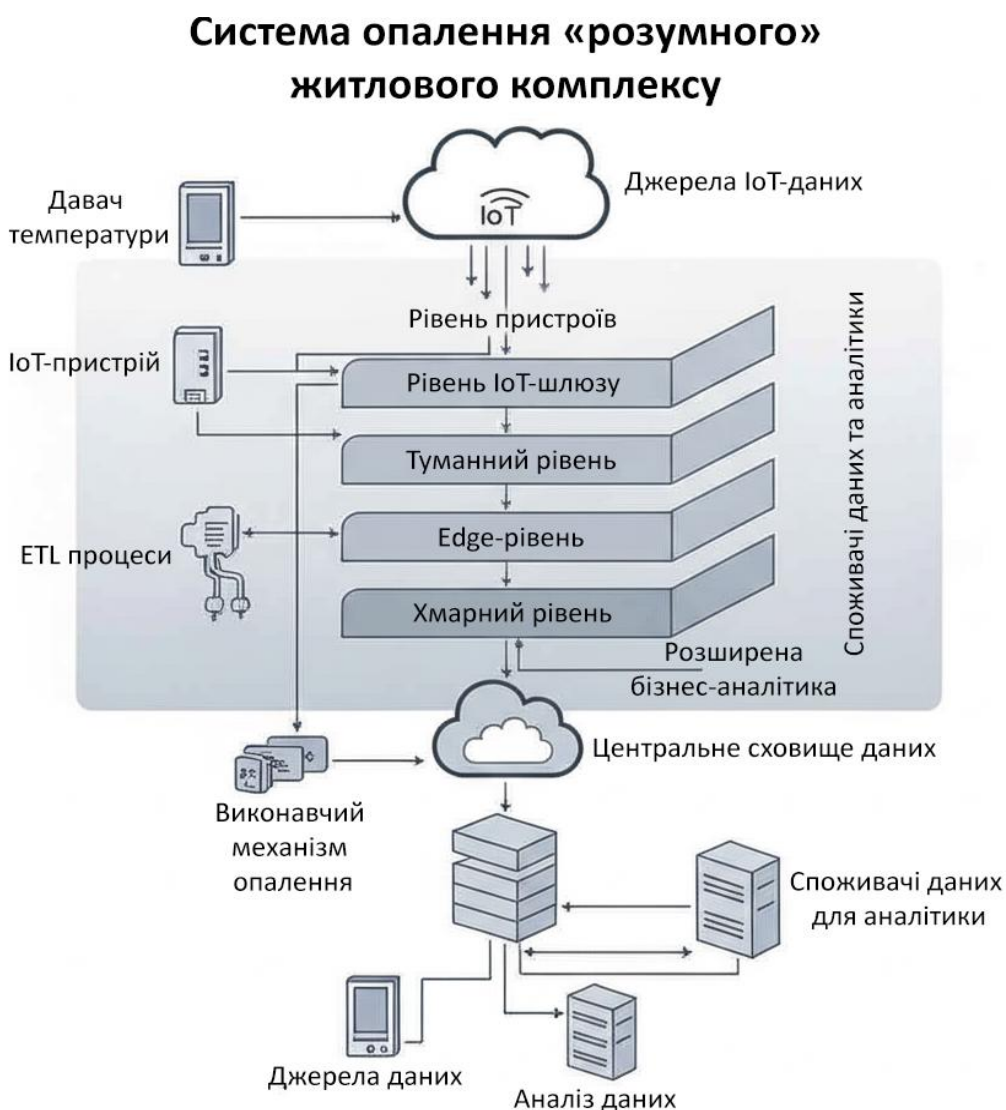


Рисунок 3.1 – Комплексна інформаційно-технологічна архітектура системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу

В її основі лежить Рівень пристроїв, що є найнижчим і найближчим до фізичного середовища. Цей рівень охоплює різноманітні давачі, зокрема, давачі температури, та інші IoT-пристрої, які безпосередньо збирають первинну інформацію [71] про стан «розумної» системи опалення та навколишнього середовища. Крім того, на цьому ж рівні розташовані виконавчі механізми опалення, які отримують команди для регулювання теплопостачання, замикаючи цикл зворотного зв'язку в автоматизованій системі.

Дані, зібрані на рівні пристроїв, спрямовуються до наступного етапу – Рівня IoT-шлюзу. Цей рівень відіграє роль своєрідного «моста», забезпечуючи зв'язок між численними різнорідними IoT-пристроями та вищими рівнями архітектури. Основне завдання IoT-шлюзу – агрегація, попередня обробка та фільтрація даних, перш ніж вони будуть передані далі [72]. Така локальна обробка даних на початкових етапах дає змогу зменшити обсяг трафіку, що надходить до центральних серверів, та знизити затримки, що є критично важливим для оперативного реагування системи опалення.

Після IoT-шлюзу дані рухаються до Туманного рівня (Fog Layer) та Edge-рівня (Edge Layer), які забезпечують розподілену обробку даних ближче до джерела їх генерації. Туманний рівень може виконувати більш складні обчислення та аналітику, ніж IoT-шлюз, тоді як Edge-рівень фокусується на швидкій обробці критично важливих даних з мінімальною затримкою [73]. Ці проміжні рівні дають можливість реалізовувати сценарії локального керування та швидкого реагування на зміни в системі опалення, наприклад, автоматичне коригування температури на основі даних з давачів в окремій зоні житлового комплексу.

Кінцевим пунктом для більшості даних є Хмарний рівень (Cloud Layer), який надає масштабовані ресурси для зберігання, обробки та глибокого аналізу великих обсягів інформації [74]. На цьому рівні розміщується Центральне сховище даних, яке слугує єдиним джерелом істини для всієї системи теплопостачання. Тут дані збираються, інтегруються та нормалізуються за допомогою ETL-процесів (Extract, Transform, Load), які забезпечують

вилучення даних з різних джерел, їх трансформацію у відповідний формат та завантаження до сховища. Ці процеси є життєво важливими для забезпечення якості та цілісності даних, необхідних для ефективної аналітики.

Зрештою, оброблені та підготовлені дані з Центрального сховища даних використовуються для розширеної бізнес-аналітики та надаються споживачам даних для аналітики. Це дає змогу не тільки відстежувати поточний стан системи опалення, але й прогнозувати її поведінку, оптимізувати енергоспоживання, виявляти аномалії та покращувати ефективність роботи всього комплексу. Інформація може бути подана у вигляді звітів, дашбордів або інтегрована в інші системи управління «розумним» житловим комплексом, забезпечуючи прийняття обґрунтованих рішень та підвищуючи комфорт мешканців.

3.2 Фізична інфраструктура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу

На рисунку 3.2 зображена фізична інфраструктура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу, яка включає три основні блоки, які взаємодіють між собою на основі сучасних інформаційних та комунікаційних технологій.

«Джерела тепла» – це різноманітні технологічні рішення для генерації теплової енергії, як от:

- центральні котельні;
- індивідуальні теплові пункти;
- теплові насоси;
- сонячні колектори;
- геотермальні джерела тощо.

Кожне з цих джерел, у контексті «розумного» комплексу, повинно бути обладнане давачами та контролерами для збору даних про температуру, тиск, обсяги виробництва тепла та ефективність роботи. Ці дані передаються через

провідні або безпроводні мережі (наприклад, Ethernet, Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT) до центральної системи управління для моніторингу та оптимізації.

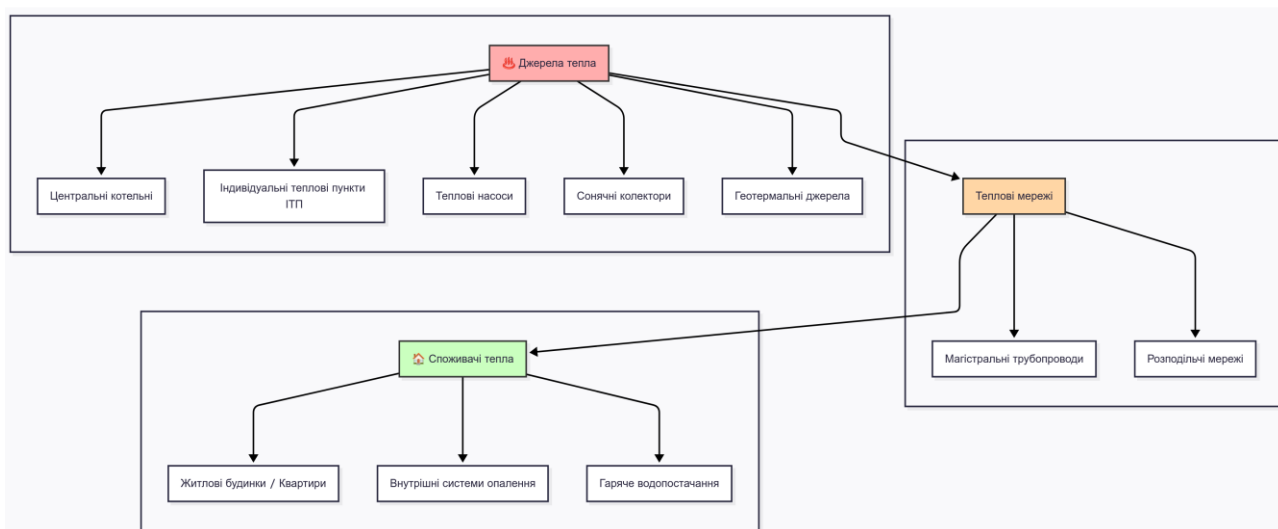


Рисунок 3.2 – Фізична інфраструктура системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу

«Теплові мережі», що відповідають за транспортування тепла від джерел до споживачів. Цей блок складається з магістральних трубопроводів та розподільчих мереж. З точки зору ІКТ, ця частина інфраструктури також має бути оснащена датчиками для вимірювання температури та тиску теплоносія на різних ділянках, а також лічильниками для обліку спожитого тепла. Передача даних з цих елементів дає змогу відстежувати втрати тепла, виявляти аварії та оптимізувати розподіл енергії. Комунікація тут може бути реалізована через оптоволоконні лінії, GPRS/3G/4G/5G модеми або інші технології передачі даних на великі відстані [75].

«Споживачі тепла», до яких належать житлові будинки/квартири, внутрішні системи опалення та системи гарячого водопостачання. У «розумному» житловому комплексі, кожен кінцевий споживач, або принаймні кожна будівля, повинна мати інтелектуальні лічильники тепла та індивідуальні або централізовані термостати з можливістю дистанційного керування. Ці пристрої збирають дані про фактичне споживання тепла та дають змогу

мешканцям або системі управління комплексу регулювати подачу тепла для досягнення оптимального комфорту та енергоефективності. Обмін даними між кінцевими пристроями та центральною системою може здійснюватися за допомогою домашніх мереж (Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave), а потім агрегуватися через шлюзи для передачі в хмарні платформи або локальні сервери управління [76].

3.3 Рівень збору даних та керування системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу

На рисунку 3.3 подано структуру рівня збору даних та керування системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу.

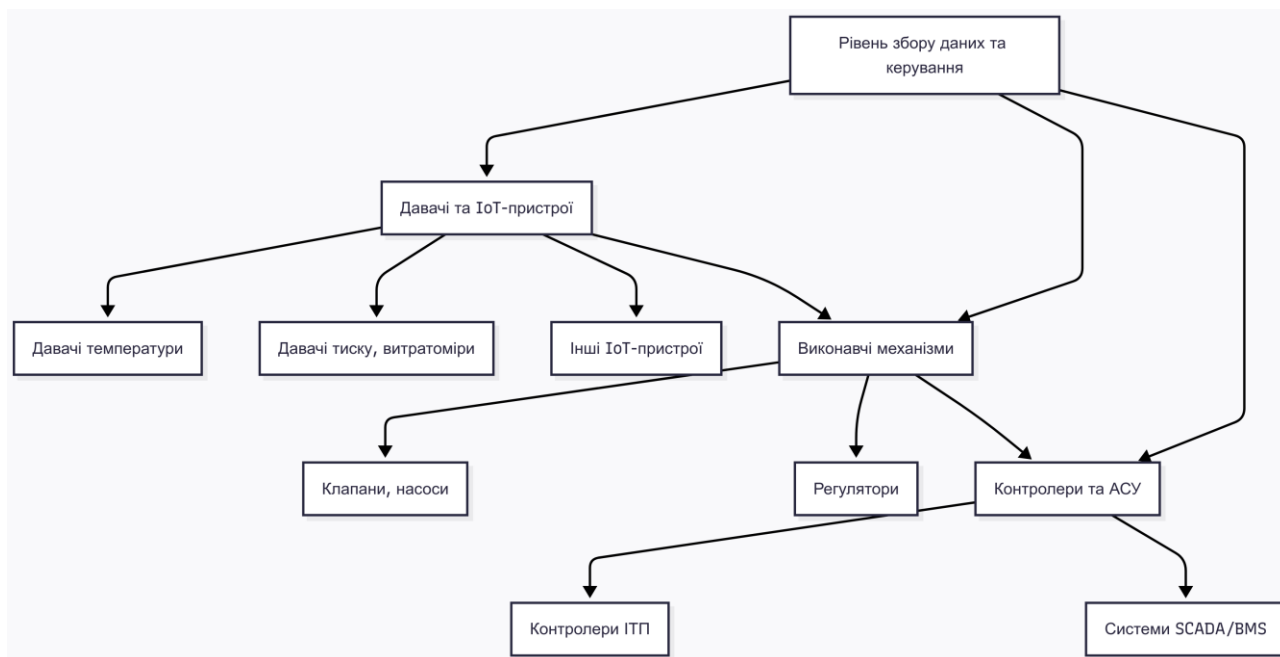


Рисунок 3.3 – Структура рівня збору даних та керування системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу

Рівень збору даних та керування системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу є центральною ланкою, що об'єднує сенсорні дані та

виконавчі механізми для забезпечення інтелектуального управління. Цей рівень складається з трьох ключових компонентів:

- давачів та IoT-пристроїв;
- виконавчих механізмів;
- контролерів та систем АСУ/SCADA/BMS.

Взаємодія між цими елементами є двосторонньою, забезпечуючи як надходження даних, так і передачу команд управління.

Давачі та IoT-пристрої формують першу лінію збору інформації, безпосередньо знімаючи параметри з фізичної інфраструктури [77]. До них відносяться давачі температури, що використовуються для моніторингу температури теплоносія у трубопроводах, в приміщеннях або на зовнішньому повітрі, зокрема:

- давачі температури NTC/PT100/PT1000 для трубопроводів (наприклад, Siemens QAE2121, Danfoss MBT 1600);
- безпроводні термометри (наприклад, Fibaro Z-Wave Temperature Sensor, Sonoff SNZB-02) для моніторингу температури повітря в приміщеннях.

Також залучаються давачі тиску та витратоміри, які контролюють тиск у системі теплопостачання та обсяги споживаної або транспортованої теплової енергії. Тут можуть використовуватися:

- давачі тиску Danfoss MBS 3000, Siemens QBE2103;
- ультразвукові витратоміри (наприклад, Siemens FUS1010, Kamstrup MULTICAL).

Крім цього, можуть бути використані інші IoT-пристрої, як от:

- давачі вологості;
- освітленості;
- присутності;
- якості повітря.

Зазначені типи давачів збирають дані про тепловий комфорт та допомагають оптимізувати роботу системи. Ці пристрої можуть використовувати бездротові технології LoRaWAN, Zigbee, Wi-Fi або NB-IoT,

для передачі даних на центральні сервери або шлюзи, забезпечуючи гнучкість розгортання та масштабованість.

Виконавчі механізми, які є другим компонентом цього рівня, відповідають за фізичне впливання на систему для регулювання теплопостачання. До них належать клапани, що керують потоком теплоносія, та насоси, які забезпечують його циркуляцію. Зокрема:

- регулюючі клапани з електроприводом (наприклад, Siemens Acvatix, Danfoss ABQM) для точного контролю потоку;
- циркуляційні насоси з частотним регулюванням (наприклад, Grundfos ALPHA2, Wilo Yonos Pico) для оптимізації споживання енергії.

Ці механізми отримують команди від контролерів або систем управління, що базуються на даних, зібраних давачами, для зміни параметрів системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Вони можуть бути оснащені інтегрованими модулями зв'язку для безпосередньої взаємодії з керуючими пристроями або ж підключатися до них через дротові інтерфейси, як от Modbus, BACnet або аналогові/дискретні входи/виходи.

Контролери та АСУ (автоматизовані системи управління) є інтелектуальним ядром цього рівня. До них належать контролери ІТП (індивідуальних теплових пунктів), які безпосередньо керують локальними процесами в теплових пунктах системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу, регулюючи подачу тепла до будівлі відповідно до заданих параметрів або погодних умов. Наприклад, контролери Siemens Climatix, Danfoss ECL Comfort.

Системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) та BMS (Building Management System) є вищим рівнем управління, що інтегрує дані з усіх давачів та контролерів, даючи операторам можливість:

- моніторити всю систему;
- візуалізувати дані;
- аналізувати тенденції;
- централізовано керувати всіма аспектами теплопостачання.

Комунікація між цими елементами та вищими рівнями (наприклад, хмарними платформами) здійснюється через Ethernet, VPN або захищені бездротові канали, забезпечуючи надійну та безпечну передачу даних для аналізу та оптимізації процесів теплопостачання «розумного» житлового комплексу.

3.4 Рівень взаємодії та оптимізації системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу

На рисунку 3.4 подано структуру рівня взаємодії та оптимізації системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу.

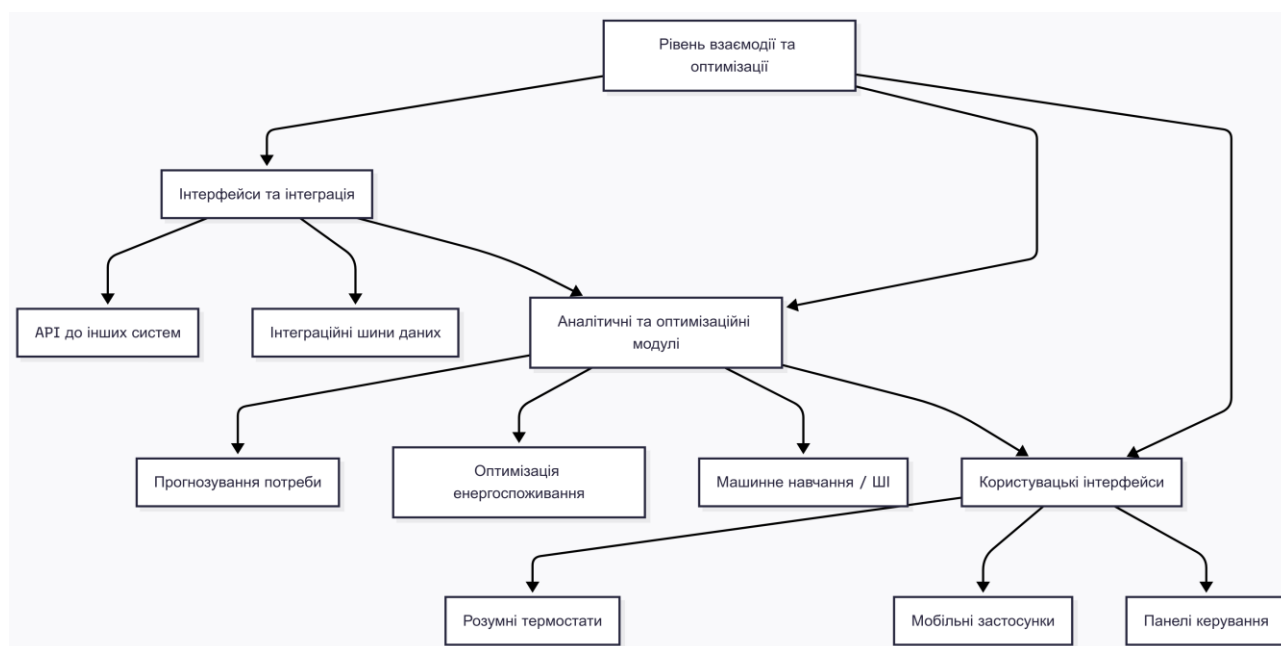


Рисунок 3.4 – Структура рівня взаємодії та оптимізації системи керування теплопостачанням «розумного» житлового комплексу

Рівень взаємодії та оптимізації системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу – це верхній, аналітичний та користувацький шар. Він відповідає за:

- інтеграцію з іншими системами;
- обробку зібраних даних для прогнозування та оптимізації;

– надання зручних інтерфейсів для взаємодії з користувачами та операторами.

Цей рівень починається з Інтерфейсів та інтеграції, які забезпечують зв'язок «розумного» теплопостачання з зовнішнім світом та іншими компонентами «розумного» міста. Зокрема, це API (Application Programming Interface) для взаємодії з іншими системами, як от системи управління «розумними» будівлями (BMS), системи енергоменеджменту або платформи «розумного міста». Також сюди входять «Інтеграційні шари даних», що дають можливість об'єднувати та стандартизувати дані з різних джерел, забезпечуючи їх сумісність та доступність для подальшого аналізу. Комунікація на цьому рівні відбувається через стандартні мережеві протоколи, як от HTTP/HTTPS, MQTT, AMQP, а також спеціалізовані протоколи для IoT та автоматизації будівель, наприклад, BACnet/IP або Modbus/TCP, що забезпечує гнучкість та розширюваність системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу.

Центральною частиною цього рівня є «Аналітичні та оптимізаційні модулі». Вони приймають інтегровані дані та використовують їх для виконання ключових функцій [78]. Для передбачення майбутніх потреб у тепловій енергії модуль Прогнозування потреби аналізує:

- історичні дані про споживання тепла;
- погодні умови;
- зайнятість приміщень тощо.

Оптимізація енергоспоживання використовує ці прогнози та дані в режимі реального часу для розробки оптимальних стратегій керування джерелами тепла та мережами, зменшуючи витрати енергії без шкоди для комфорту. Модулі Машинного навчання та штучного інтелекту впроваджують складні алгоритми для виявлення закономірностей, адаптації до змінних умов та самонавчання системи, підвищуючи її ефективність.

Користувацькі інтерфейси забезпечують зручну взаємодію з системою для кінцевих споживачів та операторів. Вони інтегрують Розумні термостати (наприклад, Nest, Ecobee) у квартирах, які дають мешканцям змогу

контролювати температуру та програмувати режими опалення. Мобільні застосунки надають доступ до функціоналу системи зі смартфонів, даючи можливість моніторити споживання, отримувати сповіщення та дистанційно керувати налаштуваннями. Панелі керування, наприклад, сенсорні екрани у вестибюлях або на робочих місцях операторів, пропонують ширший функціонал для оперативного контролю та адміністрування всієї системи теплопостачання. Для цього рівня потрібно використовувати програмне забезпечення:

- Платформи IoT – наприклад, ThingsBoard, OpenHAB, Home Assistant, AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Google Cloud IoT Core.
- Системи BMS/SCADA – наприклад, Siemens Desigo CC, Schneider Electric EcoStruxure Building Operation, Johnson Controls Metasys, Honeywell Enterprise Buildings Integrator.
- Системи енергоменеджменту (EMS) – наприклад, Schneider Electric Power Monitoring Expert, Siemens Energy Manager.
- Платформи аналітики даних – інструменти для обробки великих даних (Big Data), такі як Apache Spark, Apache Flink, або хмарні сервіси для аналітики.
- Машинне навчання та ШІ фреймворки – наприклад, TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn для розробки та впровадження алгоритмів прогнозування та оптимізації.
- Системи візуалізації даних – наприклад, Grafana, Power BI, Tableau для створення інформативних дашбордів та звітів.
- Backend-фреймворки та мови програмування – наприклад, Python (з Django/Flask), Node.js (з Express), Java (з Spring Boot) для розробки серверної логіки та API.
- Фронтенд-фреймворки – наприклад, React, Angular, Vue.js для розробки користувацьких інтерфейсів мобільних та веб-застосунків.
- Бази даних – наприклад, PostgreSQL, MongoDB, InfluxDB (для часових рядів) для зберігання зібраних даних.

– Хмарні сервіси – для розміщення платформ, аналітичних модулів та баз даних [79].

Архітектура цього рівня потребує використання сучасних підходів до обробки даних, як от мікросервісна архітектура для забезпечення гнучкості та масштабованості аналітичних та оптимізаційних модулів. Це дає змогу незалежно розробляти, розгортати та масштабувати окремі функції, забезпечуючи високу відмовостійкість та адаптивність системи до зростаючих потреб. Використання контейнерних технологій, наприклад, Docker та Kubernetes, може значно спростити управління розгорнутими сервісами та їх масштабування.

Ключовим аспектом є також забезпечення кібербезпеки на всіх рівнях взаємодії [80]. Інформаційні системи теплопостачання «розумних» житлових комплексів потребують:

- шифрування даних під час передачі та зберігання;
- використання надійних механізмів автентифікації та авторизації для доступу до API та користувацьких інтерфейсів;
- впровадження систем моніторингу безпеки для виявлення та запобігання кібератакам.

Регулярні аудити безпеки та оновлення програмного забезпечення є обов'язковими для підтримки високого рівня захисту «розумної» системи теплопостачання житлового комплексу.

Особливе значення в контексті «розумного» житлового комплексу має персоналізація та адаптивність [81]. Системи цього рівня повинні не лише оптимізувати енергоспоживання на рівні всього комплексу, але й адаптуватися до індивідуальних вподобань та поведінки мешканців. Це досягається завдяки аналізу даних від розумних термостатів та інших давачів у квартирах, даючи системі можливість автоматично налаштовувати тепловий режим для кожного помешкання, враховуючи його унікальні особливості та графік присутності. Інтеграція з календарями або системами бронювання приміщень також може

дати змогу автоматично коригувати подачу тепла, мінімізуючи його споживання у періоди відсутності мешканців.

3.5 Висновок до третього розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи описано інформаційно-технологічну архітектуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Проаналізовано фізичну інфраструктуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Розглянуто рівень збору даних та керування системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Описано рівень взаємодії та оптимізації системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Організація оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру

В контексті функціонування системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу, організація оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру є абсолютно критичною. «Розумні» системи опалення, хоч і забезпечують автоматизацію та ефективність, залишаються вразливими до зовнішніх факторів, таких як аварії на тепломережах, обриви електропостачання, стихійні лиха або техногенні катастрофи. У таких випадках швидке та ефективне оповіщення мешканців і відповідальних служб може запобігти серйозним наслідкам, зокрема переохолодженню, обмороженню або навіть загрозі життю, якщо пошкодження системи теплопостачання призводить до небезпечних умов, наприклад, витік гарячої води або газу. Без налагодженої системи оповіщення, навіть найсучасніша смарт-система теплопостачання не зможе гарантувати безпеку та комфорт мешканців під час кризи.

Правовою основою для організації оповіщення населення під час загрози або виникнення надзвичайних ситуацій (НС) є низка законодавчих актів. До них належать Конституція України, Кодекс Цивільного захисту України, Постанови Кабінету Міністрів, зокрема «Про затвердження Положення про організацію оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій та зв'язку у сфері цивільного захисту» та «Положення про єдину державну систему цивільного захисту», а також накази центрального органу виконавчої влади з питань НС, відповідні розпорядження обласних державних адміністрацій та інші нормативні документи.

Одним із ключових завдань Цивільного захисту України, як державної системи органів управління, сил та засобів, створених для організації та забезпечення захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій

техногенного, екологічного, природного та воєнного характеру, є оперативне оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій як у мирний, так і у воєнний час, а також постійне інформування про поточну обстановку.

Система централізованого оповіщення – це комплекс організаційно-технічних заходів, апаратури та технічних засобів оповіщення, а також каналів зв'язку та мереж проводового, радіо- і телевізійного мовлення. Її призначення полягає в своєчасному доведенні сигналів та інформації з питань цивільної оборони (цивільного захисту) до центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ, організацій та безпосередньо до населення [82]. Для привернення уваги громадян перед передачею важливої інформації вмикаються сирени та інші сигнальні засоби. Їхній звук є попереджувальним сигналом «УВАГА ВСІМ».

Загалом, система оповіщення складається із загальнодержавної, регіональних та спеціальних систем централізованого оповіщення, а також локальних, об'єктових систем оповіщення та систем циркулярного виклику. Ці системи забезпечують оповіщення та подальше інформування:

- Чергових служб міністерств та інших центральних органів виконавчої влади через службові телефони.
- Чергових служб місцевих органів виконавчої влади.
- Чергових аварійно-рятувальних служб.

Основні завдання оповіщення, визначені керівними документами, полягають у забезпеченні своєчасного проходження інформації між органами управління щодо ступенів готовності, оповіщенні керівного складу та населення про загрозу радіоактивного, хімічного і бактеріологічного ураження, про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій у мирний і особливий період, а також постійному інформуванні про поточну обстановку [83].

Система оповіщення функціонує за принципом відбору каналів з єдиної національної системи зв'язку. Апаратура оповіщення розташована на відповідних об'єктах органів управління, електрозв'язку, чергових відділах

МВС, на радіо-телепередавальних центрах та інших визначених підприємствах і установах. Для оперативного доведення відповідної інформації до керівного складу за допомогою телефонів застосовуються стійки циркулярного виклику та апаратура автоматизованого багатоканального оповіщення.

Для передачі попереджувального сигналу "УВАГА ВСІМ" використовуються електричні сирени централізованого та автономного включення, наявна кількість яких в основному забезпечує озвучення території, де проживає населення. Інформація до населення доводиться через радіотрансляційні вузли, радіо-телепередавальні центри по проводовому мовленню, до якого підключено радіоточки та вуличні гучномовці, а також через визначені радіо- та телевізійні канали.

У разі виникнення надзвичайної ситуації безпосередньо на потенційно небезпечних підприємствах за їхній кошт створюються об'єктові системи оповіщення. Локальні системи оповіщення створюються на потенційно небезпечних об'єктах, зона ураження від яких, у разі виникнення на них надзвичайної ситуації, досягає заселених територій або інших підприємств, установ, організацій. До їхнього складу входять абонентські радіоточки мережі радіомовлення та відомчих радіотрансляційних вузлів, вуличні гучномовці, пристрої запуску електросирен та самі електросирени, система централізованого виклику, магнітофони та магнітні стрічки із записаними текстами звернень.

Готовність систем оповіщення забезпечується завдяки таким заходам:

- Організація цілодобового чергування відповідних служб.
- Налагодження телефонного зв'язку чергових служб потенційно небезпечних підприємств (чиї зони ураження можуть поширюватися на заселені території або інші підприємства, установи, організації) з оперативно-черговою службою пункту управління облдержадміністрації та черговими службами органів МВС у містах та районах області.
- Завчасно підготовка персоналу чергових служб до дій у надзвичайних ситуаціях.

- Впровадження автоматизованих систем оповіщення із застосуванням сучасних технологій.

- Проведення якісного експлуатаційно-технічного обслуговування апаратури оповіщення та інших технічних засобів зв'язку й оповіщення.

Забороняється від'єднання або вимкнення телекомунікаційних мереж, абонентських ліній, які використовуються для запуску електросирен, а також демонтаж вуличних гучномовців без попереднього погодження з відповідними органами Департаменту.

Ефективна система оповіщення та зв'язку дає змогу оперативно інформувати мешканців про характер надзвичайної ситуації, необхідні дії (наприклад, перекрити воду, вимкнути прилади, евакуюватися), а також про терміни та способи відновлення теплопостачання. Крім того, надійний зв'язок між диспетчерськими службами, комунальними підприємствами та аварійними бригадами забезпечує швидке реагування на пошкодження, оперативну діагностику та ліквідацію наслідків. Це мінімізує час простою системи, зменшує матеріальні збитки та, найголовніше, запобігає гуманітарній катастрофі, забезпечуючи життєво важливе тепло у житлових приміщеннях. Отже, інтеграція таких систем у загальну інфраструктуру «розумного» житлового комплексу є запорукою його стійкості та безпеки.

Без ефективної організації оповіщення та зв'язку, навіть найсучасніша система теплопостачання «розумного» житлового комплексу ризикує стати безпорадною перед лицем непередбачуваних обставин. Можливі збої в автоматизованих системах, спричинені зовнішніми факторами, підкреслюють важливість людського фактора та здатності до швидкої комунікації. Налагоджені канали зв'язку дають можливість не лише оперативно інформувати мешканців, а й ефективно координувати дії аварійних служб, що є запорукою швидкого відновлення функціонування системи та мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій для комфорту та безпеки проживання.

4.2 Організація безпечних умов праці при роботі з IoT-обладнанням

Під час встановлення та подальшого обслуговування IoT-пристроїв, особливо тих, що застосовуються в системах теплопостачання «розумного» житлового комплексу, вкрай важливо дотримуватися чинних норм охорони праці та стандартів безпеки, передбачених українським законодавством. Зокрема, це стосується положень Кодексу законів про працю (КЗпП) та вимог стандартів ДСТУ. Монтаж такого обладнання, як камери, контролери, сенсори руху та мікрокомп'ютери (наприклад, Raspberry Pi 4), має бути організований таким чином, щоб не створювати жодних загроз безпеці персоналу, який з ним взаємодіє [84].

Обов'язковим є проведення попереднього обстеження місця робіт для виявлення потенційних небезпек – наприклад, наявності високовольтних електричних мереж, поганої видимості або ускладненого доступу до точки монтажу. Також необхідно проводити інструктаж з техніки безпеки для персоналу, який здійснює монтаж, враховуючи специфіку пристроїв. Обладнання слід встановлювати на безпечній висоті для запобігання травмам, використовуючи надійні кріплення [85].

Під час експлуатації необхідно регулярно перевіряти стан обладнання, проводити профілактичні огляди та своєчасно виконувати роботи з технічного обслуговування. Зокрема, очищення оптичних елементів камер, перевірку надійності з'єднань, а також функціонування давачів, контролерів та мікрокомп'ютерів.

Важливим аспектом гарантування безпечних умов праці при взаємодії з IoT-пристроями є дотримання електробезпеки. Відповідно до ДСТУ EN 60204-1:2015 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги», при роботі з електрообладнанням слід враховувати такі заходи безпеки: використовувати виключно сертифіковане обладнання, що відповідає державним стандартам безпеки, має відповідне маркування та сертифікати якості; забезпечити належне заземлення всіх металевих частин обладнання;

проводити регулярні перевірки стану ізоляції електричних кабелів та з'єднань; обладнати систему захистом від короткого замикання; використовувати джерела безперебійного живлення [86].

Обов'язковим є проведення регулярних навчань з електробезпеки для технічного персоналу. Всі працівники, які взаємодіють з електрообладнанням, мусять мати відповідну кваліфікацію та регулярно проходити атестацію.

Системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу часто використовують низьковольтні пристрої, як-от Raspberry Pi 4, що живляться в діапазоні 5–12 Вольт. Попри низьку напругу, слід враховувати такі елементи безпеки:

- Всі низьковольтні пристрої повинні бути підключені через адаптери з відповідними характеристиками напруги та струму, рекомендовані виробником.

- Неприпустимим є використання кабелів та блоків живлення, які не відповідають вимогам стандартів або рекомендаціям виробника.

- Робота з платами Raspberry Pi та аналогічними пристроями має проводитися в антистатичних умовах для уникнення електростатичних пошкоджень пристроїв.

- Забороняється виконувати будь-які маніпуляції з обладнанням під напругою (заміна елементів, підключення давачів, камер чи інших пристроїв під час роботи).

- Рекомендації щодо організації робочого місця оператора та технічного персоналу (ергономіка, освітленість, шумовий режим) є важливими.

- Необхідною умовою забезпечення високої продуктивності праці та здоров'я персоналу є правильна організація робочих місць для операторів і технічних працівників.

Основні рекомендації:

- Робочі місця мають бути оснащені ергономічними меблями, що забезпечують комфортні умови праці (крісла з регульованою висотою, столи з регульованою висотою, підставки для моніторів тощо).

- Освітленість робочих зон повинна відповідати ДБН (Державні будівельні норми); рекомендується освітленість не менше 300–500 люксів для робочих місць з моніторами [87].

- Робочі місця мають бути ізольованими від надмірного шуму відповідно до стандарту (рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБ), що сприяє концентрації уваги та запобігає передчасній втомі.

- Монітори та дисплеї повинні бути розташовані таким чином, щоб уникнути відблисків та надмірного напруження очей персоналу.

Організація безпечних умов праці при роботі з IoT-обладнанням є критично важливою для забезпечення надійності та стійкості системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу. Це охоплює не лише дотримання всіх норм електробезпеки, зокрема, правильне заземлення та використання сертифікованих адаптерів живлення для низьковольтних пристроїв, але й забезпечення ергономічних робочих місць, належного освітлення та мінімізації шуму для персоналу, який займається встановленням, обслуговуванням та моніторингом цих пристроїв. Адже помилки, спричинені перевтомою, стресом або порушеннями правил безпеки, можуть призвести до збоїв у роботі давачів, контролерів чи комунікаційних модулів, що безпосередньо вплине на ефективність функціонування системи теплопостачання, її здатність оперативно реагувати на зміни та, зрештою, на комфорт і безпеку мешканців.

4.3 Висновок до четвертого розділу

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи описано організація оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру. Водночас розглянуто організацію безпечних умов праці при роботі з IoT-обладнанням.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота комплексно досліджує систему теплопостачання «розумного» житлового комплексу, аналізуючи її предметну область, наукометричні аспекти, методи моделювання та керування, а також розробляє інформаційно-технологічну архітектуру та прототип системи, що підтверджує її значущість для оптимізації енергоспоживання та підвищення комфорту в «розумному» сучасному житлі.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Описана предметна область «розумних» систем теплопостачання.
- Подана методологія наукометричного пошуку в галузі систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.
- Виконано аналітичний огляд наукових публікацій щодо систем «розумного» теплопостачання.
- Проведено бібліографічний аналіз в галузі систем «розумного» теплопостачання за допомогою VOSviewer.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Досліджено моделі та методи мереж «розумного» теплопостачання.
- Описано моделювання систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.
- Розглянуто стратегії керування процесами теплопостачання «розумних» житлових комплексів.
- Досліджено інструменти аналізу систем теплопостачання «розумних» житлових комплексів.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Описано інформаційно-технологічну архітектуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу.
- Проаналізовано фізичну інфраструктуру системи теплопостачання «розумного» житлового комплексу.

- Розглянуто рівень збору даних та керування системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу.

- Описано рівень взаємодії та оптимізації системи тепlopостачання «розумного» житлового комплексу.

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано організація оповіщення і зв'язку у надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру. Водночас розглянуто організацію безпечних умов праці при роботі з IoT-обладнанням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Delbeke J, Runge-Metzger A, Slingenberg Y, Werksman J. The paris Agreement, Towards a Clim.-Neutral Europe: Curbing the Trend 2019:24–45. <https://doi.org/10.4324/9789276082569-2>.
- 2 International Energy Agency. Renewables 2022. 2022.
- 3 DHC Market Outlook 2023. <https://www.euroheat.org/data-insights/outlooks/market-outlook-2023>.
- 4 Euroheat & Power. DHC market outlook insights & trends. 2023.
- 5 Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Eric J, Hvelplund F, Vad B. 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- 6 Østergaard PA, Werner S, Dyrelund A, Lund H, Arabkoohsar A, Sorknæs P, Gudmundsson O, Thorsen JE, Mathiesen BV. The four generations of district cooling - a categorization of the development in district cooling from origin to future prospect. *Energy* 2022;253. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124098>.
- 7 Lund H, Østergaard AP, Connolly D, Mathiesen BV. Smart energy and. *Smart Energy Systems* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>.
- 8 Lund H, Duic N, Østergaard PA, Mathiesen BV. Future district heating systems and technologies: on the role of smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy* 2018;165:614–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
- 9 BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Positionspapier: 10 Thesen zur Sektorkopplung. 2017. p. 1–17.
- 10 Lund H. Renewable heating strategies and their consequences for storage and grid infrastructures comparing a smart grid to a smart energy systems approach. *Energy* 2018;151:94–102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.010>.

11 Gjoka K, Rismanchi B, Crawford RH. Fifth-generation district heating and cooling: opportunities and implementation challenges in a mild climate. *Energy* 2024;286. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129525>.

12 Reiners T, Gross M, Altieri L, Wagner HJ, Bertsch V. Heat pump efficiency in fifth generation ultra-low temperature district heating networks using a wastewater heat source. *Energy* 2021; 236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121318>.

13 Lickleder T, Hamacher T, Kramer M, Perić VS. Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers. *Energy* 2021; 230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120825>.

14 Henchoz S, Chatelan P, Marechal F, Favrat D. Key energy and technological aspects of three innovative concepts of district energy networks. *Energy* 2016; 117:465–77. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.065>.

15 Lund H, Østergaard PA, Nielsen TB, Werner S, Thorsen JE, Gudmundsson O, Arabkoohsar A, Mathiesen BV. Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy* 2021;227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.

16 Sulzer M, Werner S, Mennel S, Wetter M. Vocabulary for the fourth generation of district heating and cooling. *Smart Energy* 2021;1. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100003>.

17 Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. 2015.

18 Kuntuarova, S., Lickleder, T., Huynh, T., Zinsmeister, D., Hamacher, T., & Perić, V. (2024). Design and simulation of district heating networks: A review of modeling approaches and tools. *Energy*, 132189.

19 Jan van Eck N, Waltman L. VOSviewer manual. 2023.

20 Allegrini J, Orehounig K, Mavromatidis G, Ruesch F, Dorer V, Evins R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:1391–404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>.

- 21 Sarbu I, Mirza M, Crasmareanu E. A review of modelling and optimisation techniques for district heating systems. *Int J Energy Res* 2019;43:6572–98. <https://doi.org/10.1002/er.4600>.
- 22 Mahmoud M, Ramadan M, Naher S, Pullen K, Baroutaji A, Olabi A-G. Recent advances in district energy systems: a review. 2020.
- 23 Lindhe J, Javed S, Johansson D, Bagge H. A review of the current status and development of 5GDHC and characterization of a novel shared energy system. *Sci. Technol. Built Environ.* 2022;28:595–609. <https://doi.org/10.1080/23744731.2022.2057111>.
- 24 Sporleder M, Rath M, Ragwitz M. Design optimization of district heating systems: a review. *Front Energy Res* 2022;10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.971912>.
- 25 Brown A, Foley A, Lavery D, McLoone S, Keatley P. Heating and cooling networks: a comprehensive review of modelling approaches to map future directions. *Energy* 2022;261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125060>.
- 26 Mitterrutzner B, Callegher CZ, Fraboni R, Wilczynski E, Pezzutto S. Review of heating and cooling technologies for buildings: a techno-economic case study of eleven European countries. *Energy* 2023;284. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129252>.
- 27 Talebi B, Mirzaei PA, Bastani A, Haghighat F. A review of district heating systems: modeling and optimization. *Front. Built Environ.* 2016;2. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00022>.
- 28 Vandermeulen A, van der Heijde B, Helsen L. Controlling district heating and cooling networks to unlock flexibility: a review. *Energy* 2018;151:103–15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.034>.
- 29 Angelidis O, Ioannou A, Friedrich D, Thomson A, Falcone G. District heating and cooling networks with decentralised energy substations: opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation. *Energy* 2023;269. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126740>.

- 30 Guelpa E, Capone M, Sciacovelli A, Vasset N, Baviere R, Verda V. Reduction of supply temperature in existing district heating: a review of strategies and implementations. *Energy* 2023;262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125363>.
- 31 Werner S. International review of district heating and cooling. *Energy* 2017;137: 617–31. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>.
- 32 Denari'e A, Aprile M, Motta M. Heat transmission over long pipes: new model for fast and accurate district heating simulations. *Energy* 2019;166:267–76. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.186>.
- 33 Zhang S, Gu W, Yao S, Lu S, Zhou S, Wu Z. Partitional decoupling method for fast calculation of energy flow in a large-scale heat and electricity integrated energy system. *IEEE Trans Sustain Energy* 2021;12:501–13. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.3008189>.
- 34 Dancker J, Wolter M. Improved quasi-steady-state power flow calculation for district heating systems: a coupled Newton-Raphson approach. *Appl Energy* 2021;295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116930>.
- 35 Franz G, Grigull U. Warmeverluste von beheizten Rohrleitungen im Erdboden/" Heat Losses of Buried Pipes, *Warme Und Stoffübertragung Bd. 2 S, vols.*"109–117; 1969.
- 36 Menyhart J, Homonnay G. Warmeverluste der MODERNEN BEISSWASSER·FERNLEITUNGEN. 1976.
- 37 Wallent'en P. Steady-state heat loss from insulated pipes, [licentiate thesis, division of building physics]. *Byggnadsfysik LTH, lunds tekniska hogskola*. 199" 1.
- 38 Glück Bernd. Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. VED verlag für bauwesen. 1985.
- 39 Benonysson A, Bohm B. H.F. Ravn3t, operational optimization in A district heating system. 1995.
- 40 Benonysson A. Dynamic modelling and operational optimization of district heating systems. Ph.D. dissertation. Technical University of Denmark; 1991.

- 41 Sandou G, Font S, Tebbani S, Hiret A, Mondon C. Predictive control of a complex district heating network. In: Proceedings of the 44th IEEE conference on decision and control, and the European control conference, CDC-ECC '05. IEEE Computer Society; 2005. p. 7372–7. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583351>.
- 42 Stevanovic VD, Zivkovic B, Prica S, Maslovaric B, Karamarkovic V, Trkulja V. Prediction of thermal transients in district heating systems. *Energy Convers Manag* 2009;50:2167–73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.034>.
- 43 Zheng J, Zhou Z, Zhao J, Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. *Appl Therm Eng* 2017;123:682–8. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083>.
- 44 Oppelt T, Urbaneck T, Gross U, Platzer B. Dynamic thermo-hydraulic model of district cooling networks. *Appl Therm Eng* 2016;102:336–45. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.168>.
- 45 Schweiger G, Larsson PO, Magnusson F, Lauenburg P, Velut S. District heating and cooling systems – framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization. *Energy* 2017;137:566–78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.115>.
- 46 Maurer J, Ratzel OM, Malan AJ, Hohmann S. Comparison of discrete dynamic pipeline models for operational optimization of District Heating Networks. *Energy Rep* 2021;7:244–53. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.150>.
- 47 Frolke L. Market design for future district heating systems. 2022.
- 48 Batchelor GK. An introduction to fluid dynamics. 2000.
- 49 W.D. Hurst, N.S. Bubbis, Application of the Hardy cross method to the analysis of a large distribution system, n.d..
- 50 Liu X. Combined analysis of electricity and heat networks. 2013.
- 51 Maurer J. Transactive control of coupled electric power and district heating networks. 2022.
- 52 Gu W, Wang J, Lu S, Luo Z, Wu C. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings. *Appl Energy* 2017;199:234–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.004>.

- 53 Transsolar Energietechnik GmbH. Trnsys. <https://trnsys.de/en>.
- 54 Modelica Association. Modelica Language. 2023. <https://modelica.org/>.
- 55 EQUA Simulation AB. Ida ice. <https://www.equa.se/de/ida-ice>.
- 56 Lund H, Thellufsen JZ, Østergaard PA, Sorknæs P, Skov IR, Mathiesen BV. EnergyPLAN – advanced analysis of smart energy systems. Smart Energy 2021;1. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
- 57 Vitec energy, NetSim - grid simulation. 2023. <https://www.vitec-energy.com/netsim-grid-simulation/>.
- 58 Schneider Electric. EcoStruxure distric energy. 2023. <https://www.se.com/es/es/download/document/EcoStruxureDisticEnergy/>.
- 59 Fischer-Uhrig Engineering GmbH. Stanet. <https://www.stafu.de/de/home.html>.
- 60 Wirtz M. nPro: a web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. Energy 2023;268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126575>.
- 61 nPro - District Energy Planning Tool, (n.d.). <https://www.npro.energy>.
- 62 Lohmeier D, Cronbach D, Drauz SR, Braun M, Kneiske TM. Pandapipes: an open- source piping grid calculation package for multi-energy grid simulations. Sustainability 2020;12:1–39. <https://doi.org/10.3390/su12239899>.
- 63 Heatbeat engineering GmbH, heatbeat. 2023. n.d. <https://heatbeat.de/de/>.
- 64 Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH, ROKA3. <https://www.roka3.de/>.
- 65 Wetter M, Van Treeck C, Helsen L, Maccarini A, Saelens D, Robinson D, Schweiger G. IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation - ongoing developments, lessons learned and challenges. In: IOP conf ser earth environ sci. Institute of Physics Publishing; 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012114>.
- 66 Mueller D, Constantin A, Fuchs M, Müller D, Lauster M, Constantin A, Fuchs M, Remmen P. AixLib-an open-source Modelica library within the IEA-EBC annex 60 framework. www.github.com/RWTH-EBC/AixLib; 2016.

67 Wetter M, Zuo W, Nouidui TS, Pang X. Modelica buildings library. J. Build Perform Simul 2014;7:253–70. <https://doi.org/10.1080/19401493.2013.765506>.

68 Nytsch-Geusen C, Huber J, Ljubijankic M, Radler J. Modelica BuildingSystems - eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. Bauphysik 2013;35:219. <https://doi.org/10.1002/bapi.201310045>.

69 Jorissen F, Reynders G, Baetens R, Picard D, Saelens D, Helsen L. Implementation and verification of the ideas building energy simulation library. J. Build Perform Simul 2018;11:669–88. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1428361>.

70 Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH. 2023, ROKA3.

71 Duda, O., Kunanets, N., Matsiuk, O., & Pasichnyk, V. (2018). Information-communication technologies of IoT in the “smart cities” projects. Proceedings of the 11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications.

72 Дуда, О., & Станько, А. (2023). Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст». Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №4, 10-19. ISSN 2307-5732. DOI 10.31891/2307-5732.

73 Duda, O., Kochan, V., Kunanets, N., Matsiuk, O., Pasichnyk, V., & Sachenko, A. (2019). Data processing in IoT for smart city systems.

74 Duda, O., Matsiuk, O., Kunanets, N., Pasichnyk, V., & Veretennikova, N. (2020). Selection of effective methods of big data analytical processing in information systems of smart cities. CEUR Workshop Proceedings, 2643, 68–78.

75 Duda, O., Mykytyshyn, A., Mytnyk, M., & Stanko, A. (2023). Information technology sets formation and TNTU Smart Campus services network support. CEUR Workshop Proceedings, 3628, 661–671.

76 Орлов М. В., Дуда О. М., Жовнір Ю. І., Грибовський О.М. Інструменти методології DevOps в інформаційних системах на основі

технологій IoT. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, Випуск 57, 2024, с. 128-138. ISSN 2524-0552; eISSN 2524-0560, DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-15>.

77 Орлов М.В., Грибовський О.М., Жовнір Ю.І., Дуда О.М., Від концепції до реальності: роль методології devops в екосистемах iot. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 35 (74) № 6 2024. Частина 2. Видавничий дім «Гельветика». 2024. с. 163-170. ISSN 2663-5941 (Print), ISSN 2663-595X (Online) DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/22>.

78 Дуда, О., Мацюк, О., Пасічник, В. В., & Кунанець, Н. Е. (2018). Концепт «розумне місто» та інформаційні технології BigData.

79 Duda, O., Kunanets, N., Matsiuk, O., & Pasichnyk, V. (2022). Cloud-based IT infrastructure for “smart city” projects. In D. Bădică, V. Kołodziej, M. Ganzha, & M. Paprzycki (Eds.), Dependable IoT for human and industry (pp. 389–409). Springer.

80 Stanko, A., Mykytyshyn, A., Totosko, O., Koroliuk, R., & Duda, O. (2024). Artificial Intelligence of Things (AIoT): Integration challenges and security issues. CEUR Workshop Proceedings, 3842, 92–105.

81 С. Пасічник, А. Мага, Н. Кунанець, О. Лозицький, Б. Петрушина, О.Дуда, А. Рибак. Проектування інтерфейсів інформаційної системи «розумне домогосподарство» з використанням методу персон." Вісник національного університету «Львівська політехніка» серія Інформаційні системи та мережі, Випуск 15, (2024): с. 273 - 289. ISSN 2524-065X (print). ISSN 2663-0001 (online), DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2024.15.273>

82 Організація оповіщення і зв'язку. <https://czndep.zht.gov.ua/SOZ.html>.

83 Організація оповіщення та зв'язку. <https://nmc.dsns.gov.ua/zk/news/ostanni-novini/164>.

84 НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. – Затверджено наказом Міністерства праці та соціальної політики України.

85 НПАОП 40.1-1.32-01. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Міністерство енергетики України.

86 Стручок В.С. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник. 2022.

87 ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення". https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2.