

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа  
знань

Виконав: студент \_\_\_\_\_ курсу  
спеціальності \_\_\_\_\_, групи \_\_\_\_\_ СН-42  
122 Комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_ Комарницький С.Я.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ Карнаухов А.К.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Липак Г.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Боднарчук І.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2025

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 25 » червня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Комарницькому Святославу Ярославовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань

Керівник роботи Карнаухов Андрій Костянтинівич, асистент кафедри КН  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 7 » травня 2025 року № 4/7-444

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про динамічні графи знань, онтології та розумні мережі теплопостачання

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

Вступ. 1 Аналіз та предметної області та моделювання процесів «розумного»

теплопостачання. 1.1 Аналіз предметної області «розумного» теплопостачання.

1.2 Моделювання теплоенергосистем «розумних міст». 1.3 Засоби моделювання тепло та

енергоспоживання «розумного міста». 1.4 Аналіз онтологій в галузі «розумного»

теплопостачання. 2 Динамічні графи знань та агенти мереж і систем теплопостачання. 2.1

Динамічні графи знань на базі онтології мереж та систем теплопостачання. 2.2 Агенти для

динамічних графів знань оптимізації процесів виробництва тепла. 2.3 Зв'язані агенти для

міждисциплінарної інтероперабельності. 3 Енергетичний огляд, моделювання та аналіз

процесів «розумного» теплопостачання. 3.1 Комплексний енергетичний огляд процесів

«розумного» теплопостачання. 3.2 Ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом. 3.3

Аналіз енергоспоживання міста та планування сценаріїв. 3.4 Вплив процесів теплогенерації

на якість повітря. 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 27 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 динамічні графи знань, онтології та розумні мережі теплопостачання                                    | 31.01.2025-03.02.2025          |          |
| 3.    | Опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи                                                                       | 04.02.2025-06.02.2025          |          |
| 4.    | Виконання дослідження щодо динамічних графів знань на основі онтологій для керування розумними мережами теплопостачання | 07.02.2025-11.02.2025          |          |
| 5.    | Оформлення розділу «Аналіз та предметної області та моделювання процесів «розумного» теплопостачання»                   | 03.06.2025-05.06.2025          |          |
| 6.    | Оформлення розділу «Динамічні графи знань та агенти мереж і систем теплопостачання»                                     | 06.06.2025-08.06.2025          |          |
| 6.    | Оформлення розділу «Енергетичний огляд, моделювання та аналіз процесів «розумного» теплопостачання»                     | 09.06.2025-11.06.2025          |          |
| 7.    | Виконання завдання до підрозділу «Безпека життєдіяльності»                                                              | 12.06.2025-13.06.2025          |          |
| 8.    | Виконання завдання до підрозділу «Основи охорони праці»                                                                 | 14.06.2025-15.06.2025          |          |
| 9.    | Оформлення кваліфікаційної роботи                                                                                       | 16.06.2025-17.06.2025          |          |
| 10.   | Нормоконтроль                                                                                                           | 18.06.2025-19.06.2025          |          |
| 11.   | Перевірка на плагіат                                                                                                    | 20.06.2025                     |          |
| 12.   | Попередній захист кваліфікаційної роботи                                                                                | 21.06.2025                     |          |
| 13.   | Захист кваліфікаційної роботи                                                                                           | 26.06.2025                     |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |
|       |                                                                                                                         |                                |          |

Студент

(підпис)

Комарницький С.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Карнаухов А.К.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Комарницький Святослав Ярославович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-42 // Тернопіль, 2025 // С. 70, рис. – 13, табл. – 2, кресл. – , додат. – 0, бібліогр. – 73.

**Ключові слова:** граф знань, цифровий двійник, інтероперабельність, енергетичне моделювання, розсіювання викидів.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню процесів керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань. В першому розділі кваліфікаційної роботи подано аналіз предметної області «розумного» теплопостачання. Описано моделювання теплоенергосистем «розумних міст». Досліджено засоби моделювання тепло та енергоспоживання «розумного міста». Проаналізовано онтології в галузі «розумного» теплопостачання.

В другому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано розроблені онтології мереж та систем теплопостачання. Досліджено агенти для оптимізації процесів виробництва тепла. Подано опис зв'язаних агентів для міждисциплінарної інтероперабельності.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано комплексний енергетичний огляд процесів «розумного» теплопостачання. Описано ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом. Проаналізовано енергоспоживання міста та планування сценаріїв. Досліджено вплив процесів теплогенерації на якість повітря «розумного міста».

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано державну систему моніторингу довкілля, як складова частина національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн. Розглянуто умови праці працівників ІТ-галузі.

## ANNOTATION

Network Heating Management Based on a Dynamic Knowledge Graph // Qualification work of the educational level "Bachelor" // Komarnytskyi Sviatoslav // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group SN-42 // Ternopil, 2025 // P. 70, fig. - 13, tabl. - 2, chair. - , annexes. – 0, references - 73.

**Keywords:** knowledge graph, digital twin, interoperability, energy modeling, emission dissipation.

This qualification paper is dedicated to the study of heat supply network management processes based on a dynamic knowledge graph. The first section of the qualification paper provides an analysis of the "smart" heat supply domain. The modeling of heat and power systems for "smart cities" is described. Tools for modeling heat and energy consumption in "smart cities" are investigated. Ontologies in the field of "smart" heat supply are analyzed.

In the second section of the qualification paper, the developed ontologies of heat supply networks and systems are analyzed. Agents for optimizing heat production processes are explored. A description of linked agents for interdisciplinary interoperability is provided.

The third section of the qualification paper presents a comprehensive energy review of "smart" heat supply processes. Resource-efficient "smart" heat provision is described. City energy consumption and scenario planning are analyzed. The impact of heat generation processes on the air quality of a "smart city" is investigated.

The "Life Safety, Occupational Safety Fundamentals" section describes the state environmental monitoring system as an integral part of the national information infrastructure, compatible with similar systems in other countries. Working conditions for IT industry employees are examined.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

AERMOD – Модель регулювання AMS/EPA (модель розсіювання повітря)

API – Інтерфейс прикладного програмування

ARIMA – Авторегресивне інтегроване ковзне середнє

CEA – Аналітик міської енергії

CHP – Когенерація теплової та електричної енергії

DIF – Структура похідної інформації

dKG – Динамічний граф знань

EEA – Європейське агентство з охорони навколишнього середовища

GeoSPARQL – Географічна мова запитів для даних RDF

IRI – Інтернаціоналізований ідентифікатор ресурсу

KG – Граф знань

LSTM – Довга короткочасна пам'ять

MAPE – Середня абсолютна відсоткова похибка

ME – Максимальна похибка

NO<sub>2</sub> – Діоксид азоту

NO<sub>x</sub> – Оксиди азоту

OM – Онтологія одиниць вимірювання

OPEX – Експлуатаційні витрати

OSM – OpenStreetMap

PM<sub>10</sub> – Тверді частинки діаметром менше 10

PM<sub>2.5</sub> – Тверді частинки діаметром менше 2,5

PM – Тверді частинки

PV – Фотоелектрика

RDF – Структура опису ресурсів

RMSE – Середноквадратична похибка

SAREF – Онтологія інтелектуальних застосунків REFERENCE

SARIMAX – Сезонне авторегресивне інтегроване ковзне середнє з екзогенними регресорами

SMAPE – Симетрична середня абсолютна відсоткова похибка

SPARQL – Протокол SPARQL та мова запитів RDF

SQL – Структурована мова запитів

TFT – Трансформатор часового злиття

TWA – Світовий аватар (динамічний граф знань)

W3C – Консорціум Всесвітньої павутини

WHO – Всесвітня організація охорони здоров'я

## ЗМІСТ

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                        | 9  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ              |    |
| ПРОЦЕСІВ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....                          | 11 |
| 1.1 Аналіз предметної області «розумного» теплопостачання.....     | 11 |
| 1.2 Моделювання теплоенергосистем «розумних міст» .....            | 14 |
| 1.2.1 Прогалини в інтегруєбельності .....                          | 17 |
| 1.3 Засоби моделювання тепло та енергоспоживання «розумного        |    |
| міста».....                                                        | 18 |
| 1.3.1 Аналізатор тепло та енергоспоживання «розумного» міста ..... | 18 |
| 1.3.2 Моделювання розсіювання .....                                | 19 |
| 1.3.3 Динамічний граф знань The World Avatar .....                 | 19 |
| 1.4 Аналіз онтологій в галузі «розумного» теплопостачання.....     | 21 |
| 1.5 Висновок до першого розділу .....                              | 22 |
| РОЗДІЛ 2. ДИНАМІЧНІ ГРАФИ ЗНАНЬ ТА АГЕНТИ МЕРЕЖ І СИСТЕМ           |    |
| ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ .....                                              | 23 |
| 2.1 Динамічні графи знань на базі онтології мереж та систем        |    |
| теплопостачання .....                                              | 23 |
| 2.1.1 Динамічний граф знань на основі онтології часових рядів      |    |
| теплопостачання.....                                               | 23 |
| 2.1.2 Динамічний граф знань на основі онтології системи            |    |
| централізованого теплопостачання.....                              | 25 |
| 2.1.3 Динамічний граф знань на основі онтології дисперсії          |    |
| «OntoDispersion» в системах теплопостачання.....                   | 28 |
| 2.1.4 Динамічний граф знань на основі онтології енергоспоживання   |    |
| «розумних» будівель.....                                           | 29 |
| 2.2 Агенти для динамічних графів знань оптимізації процесів        |    |
| виробництва тепла .....                                            | 31 |
| 2.2.1 Агент прогнозування процесів споживання тепла .....          | 33 |



|                                                                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.2 Агент оптимізації мережі централізованого теплопостачання ....                                                                                                | 34        |
| 2.2.3 Агент оцінки викидів .....                                                                                                                                    | 36        |
| 2.2.4 Агент моделювання розсіювання повітряних забруднювачів.....                                                                                                   | 37        |
| 2.2.5 Агент аналітики тепло та енергоспоживання «розумного» міста                                                                                                   | 39        |
| 2.3 Зв'язані агенти для міждисциплінарної інтероперабельності .....                                                                                                 | 40        |
| 2.4 Висновок до другого розділу .....                                                                                                                               | 41        |
| <b>РОЗДІЛ 3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ОГЛЯД, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ</b>                                                                                                          |           |
| <b>ПРОЦЕСІВ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....</b>                                                                                                                    | <b>42</b> |
| 3.1 Комплексний енергетичний огляд процесів «розумного»<br>теплопостачання .....                                                                                    | 42        |
| 3.2 Ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом.....                                                                                                            | 42        |
| 3.3 Аналіз енергоспоживання міста та планування сценаріїв .....                                                                                                     | 45        |
| 3.4 Вплив процесів теплогенерації на якість повітря .....                                                                                                           | 47        |
| 3.5 Висновок до третього розділу .....                                                                                                                              | 52        |
| <b>РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ</b>                                                                                                      | <b>53</b> |
| 4.1 Державна система моніторингу довкілля, як складова частина<br>національної інформаційної інфраструктури, сумісної з<br>аналогічними системами інших країн ..... | 53        |
| 4.2 Умови праці працівників ІТ-галузі.....                                                                                                                          | 57        |
| 4.3 Висновок до четвертого розділу .....                                                                                                                            | 60        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>                                                                                                                                                | <b>61</b> |
| <b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                                                                                          | <b>62</b> |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні теплоенергетичні системи є складними, динамічними та взаємопов'язаними, а їх традиційні методи керування часто не дозволяють повною мірою врахувати всі чинники, що впливають на споживання тепла, виробництво, розподіл та екологічні наслідки. Це призводить до значних втрат енергії, підвищених операційних витрат та негативного впливу на якість повітря в містах.

Використання динамічних графів знань, зокрема таких, як The World Avatar, надає унікальну можливість інтегрувати різноманітні дані з різних джерел – від інформації про споживання тепла в будівлях та часових рядів до даних про дисперсію забруднюючих речовин та онтологій енергоспоживання. Це дає змогу створити цілісну картину функціонування теплопостачальної мережі, що є критично важливим для оптимізації процесів виробництва та розподілу тепла, прогнозування споживання, а також для оцінки та керування викидами. Така інтероперабельність даних через пов'язані агенти відкриває шлях до міждисциплінарних рішень та комплексного енергетичного огляду.

Таким чином, розробка та впровадження систем керування теплопостачанням на основі динамічних графів знань дає можливість перейти від реактивних до проактивних методів управління, забезпечуючи ресурсоефективне постачання тепла, зниження енергоспоживання та покращення якості повітря. Це не тільки відповідає сучасним викликам енергетичної безпеки та екології, але й створює фундамент для подальшого розвитку «розумних» та сталих міст. Тому керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань є актуальним напрямком сучасних досліджень.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» є розробка підходів до керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань для оптимізації процесів

виробництва та споживання тепла в «розумних містах». Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Проаналізувати предметну область "розумного" теплопостачання та існуючі моделі теплоенергосистем.
- Дослідити принципи побудови динамічних графів знань та розробити онтології для мереж теплопостачання.
- Розробити архітектуру та функціонал агентів для оптимізації процесів виробництва та споживання тепла.
- Провести енергетичний огляд, моделювання та аналіз процесів "розумного" теплопостачання.

**Об’єкт дослідження:** процеси функціонування мереж теплопостачання в контексті концепції «розумного міста».

**Предмет дослідження:** методи та моделі керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробці інноваційних підходів до керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань, що дасть можливість значно підвищити ефективність, ресурсоефективність та екологічність теплоенергетичних систем «розумних міст». Запропоновані моделі та агенти для динамічних графів знань, зокрема для прогнозування споживання тепла, оптимізації мереж централізованого теплопостачання, оцінки викидів та моделювання розсіювання забруднювачів, можуть бути безпосередньо впроваджені для оптимізації операційних процесів, зниження енергетичних втрат, покращення якості повітря та сприяння сталому розвитку міської інфраструктури.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

### **1.1 Аналіз предметної області «розумного» теплопостачання**

Зміна клімату, безперечно, є одним із найсерйозніших викликів для людства, що впливає практично на всі аспекти життя [1]. Визнаючи викиди парникових газів основним чинником цього явища, перехід до майбутнього з низьким рівнем вуглецевих викидів широко розглядається як критично необхідний [2]. Декарбонізація енергетичного сектору вимагає суттєвих змін, зокрема посиленого міжгалузевого поєднання, ширшого впровадження розподілених відновлюваних джерел енергії, а також розвитку інтелектуальної інфраструктури й нових підходів до моделювання [3]. Рішення для цього за своєю суттю міждисциплінарного переходу потребують цілісного врахування соціальних, економічних, екологічних та інженерних факторів на різних географічних і часових масштабах [4].

Цифрові технології, зокрема, інфраструктура «розумного» обліку, великі дані, машинне навчання [5], 5G [6] та інтернет речей [7], дедалі більше визнаються важливими для забезпечення економічно ефективної декарбонізації [8]. Застосування кіберфізичних систем [9] в енергетичних дослідженнях значно зросло останніми роками, часто у формі цифрових двійників, які дають змогу досліджувати оптимальні рішення реальних проблем шляхом вивчення їх повноцінних цифрових копій [10]. Цифрові двійники можуть надавати детальне цифрове представлення об'єктів, процесів або цілих систем, описуючи їх поточний стан і поведінку з часом та за різних умов і обмежень. Цифрові двійники вже ефективно вирішили низку реальних проблем [11], однак більшість із них залишаються ізольованими один від одного та позбавлені інтероперабельності через відмінності в налаштуванні, апаратному чи

програмному забезпеченні, що часто є наслідком окремих фінансових ініціатив або бізнес-інтересів [12].

Інтероперабельність визначається як здатність інструментів, систем і даних розуміти функціональність один одного та використовувати її [13], і вона є ключовою для забезпечення повторного використання даних і програмних ресурсів, а також для всебічного й колективного вирішення міжгалузевих питань [14]. Для майбутніх енергосистем ефективна співпраця й координація за межами «традиційного» енергетичного сектору є необхідною для максимального використання синергії дедалі тісніше пов'язаних систем, включно з генерацією електроенергії, забудованим середовищем, охороною здоров'я тощо. Потенційним рішенням цього виклику є концепція підключених цифрових двійників – розподілених колаборативних утворень, які обмінюються даними та обчислювальними можливостями для ефективного вирішення складних завдань [15].

Очікується, що теплове та енергетичне моделювання перейде від моделей, створених окремими установами, до розподілених, колаборативних підходів, які надаватимуть можливість залучати експертів з різних галузей [16]. Проте інтеграція даних між галузями та усунення неоднозначностей при збереженні відкритості й прозорості залишається поширеною проблемою [17]. Дані є надзвичайно різномірними як за форматом, так і за змістом, оскільки різні джерела, наприклад:

- сенсори;
- текстові документи;
- веб-ресурси тощо

Використовують власні формати, наприклад [18]:

- табличні дані;
- геопросторові дані;
- природну мову тощо.

Крім того, відсутність семантичної інтероперабельності може виникати, коли певна інформація є відома лише експертам конкретної галузі або коли

одне й те саме поняття має різне значення в різних сферах; однак узгоджене розуміння моделей, припущень і даних є ключовим [19].

Автори [20] продемонстрували систему сталого енергетичного управління, здатну керувати потоками даних між окремими моделями машинного навчання, районами та містами; проте загального і масштабованого рішення для побудови міжгалузевих моделей досі не реалізовано, що ускладнює відтворення результатів, адаптацію та поєднання вже існуючих моделей [21].

Проект The World Avatar (TWA) [16] створює екосистему, яка забезпечує прозору інтеграцію різнорідних моделей і даних, покращуючи таким чином інтероперабельність між різними форматами та програмним забезпеченням [22]. Він використовує технології зі стеку «Semantic Web» для створення розподіленого динамічного графа знань, який за своєю природою ідеально підходить для вирішення міжгалузевих завдань. Онтології надають однозначні визначення понять і зв'язків для опису релевантних даних та обчислювальних агентів. Ці агенти діють як виконувані компоненти знань, що робить граф динамічним за своєю суттю. Вони поділяють спільну картину світу, забезпечуючи внутрішню узгодженість, та виконують завдання на кшталт оновлення графа, моделювання систем або передачі відповідей у фізичний світ.

Агенти можуть представляти моделі «чорної скриньки», «сірої скриньки» або фізичні моделі, а також можуть обгортати вже існуюче програмне забезпечення чи сторонні інтерфейси прикладного програмування (API), роблячи їх доступними на семантичному рівні. Із початковим фокусом на хімічному та процесному інжинірингу [23], TWA еволюціонував у універсальний інструмент для вирішення питань декарбонізації в енергетичному секторі [24], подолання міжгалузевих проблем інтероперабельності в «розумних» містах і міському плануванні [25], а також підвищення стійкості складних систем [26].

Автори [15] продемонстрували, як динамічний граф знань загального призначення, що базується на онтологіях та автономних семантичних агентах,

ідеально підходить для реалізації підключених цифрових двійників, наприклад, для керування реальними об'єктами, проведення міжгалузевих симуляцій або виконання геопросторового аналізу та аналізу сценаріїв.

Традиційні підходи розглядають відповідні аспекти, як-от енергія будівель, управління операціями або розсіювання забруднюючих речовин у повітрі, окремо. Окремі аналізи, симуляції чи оптимізації часто залишаються ізольованими, ігноруючи взаємозв'язки та перетини у вхідних або вихідних даних. Динамічний граф знань «The World Avatar» поєднує пов'язані дані та обчислювальні агенти, забезпечуючи уніфіковане й автоматизоване моделювання на основі узгодженого світогляду. Агенти введення інтегрують дані з реального світу в граф, тоді як агенти оновлення діють на основі інстанційованої інформації.

## **1.2 Моделювання теплоенергосистем «розумних міст»**

Цілісне енергетичне моделювання для «розумного міста» охоплює широкий спектр аспектів – від прогнозування енергоспоживання до оптимізації виробництва енергії, а також оцінки потенційних наслідків запропонованих сценаріїв. У цьому розділі наведено огляд попередніх досліджень і поточного стану справ у кожній з цих галузей. Кожна тема розглядається окремо відповідно до загальноприйнятої практики в науковій спільноті; однак, як зображено на Рис. 1, ці «сайли» долаються у наступних розділах завдяки підходу динамічного графа знань. Також представлено технології Семантичної павутини «Semantic Web» та «The World Avatar», які забезпечують цю інтеграцію.

Енергетичні системи стають усе більш взаємопов'язаними й вимагають комплексного підходу для підвищення загальної ефективності використання ресурсів та зниження викидів [27].

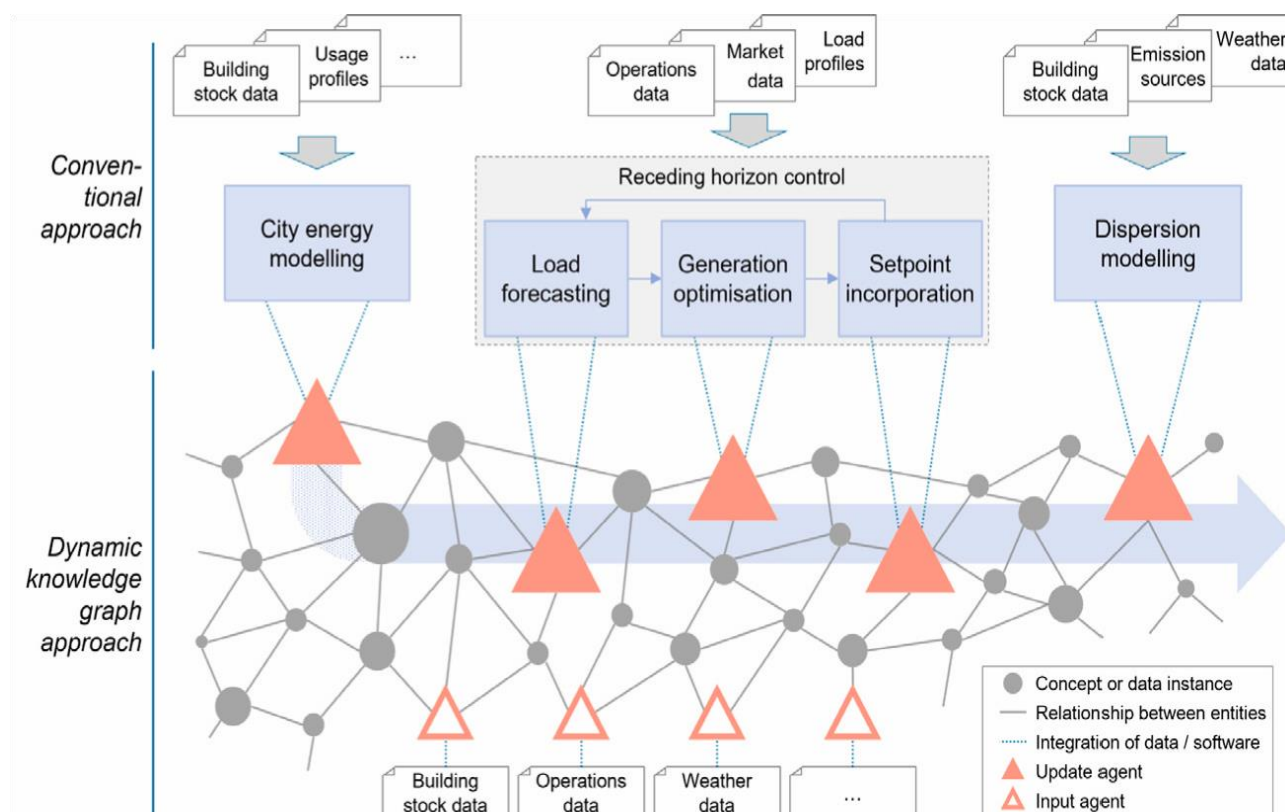


Рисунок 1.1 – Енергетичне моделювання «розумних міст» [53]

Вони тісно пов'язані з низкою ключових викликів XXI століття, зокрема із забезпеченням безпеки, доступності та стійкості енергопостачання, а також із соціально-економічними та екологічними проблемами – від локального забруднення повітря та води до глобальних ініціатив зі сталого розвитку [28]. Цілісний підхід до енергосистем є необхідним для забезпечення ефективного та надійного постачання низьковуглецевої енергії, при цьому слід проводити планування й координацію різноманітних енергетичних носіїв [11]:

- електроенергія;
- газ;
- тепло;
- холод.

У цьому контексті усталені методи моделювання енергетичних систем стикаються з новими викликами, пов'язаними з низкою сучасних тенденцій, які широко обговорюються в науковій літературі [16]:



– зростаючою інтеграцією між секторами та взаємодією між енергетичними векторами на різних рівнях, наприклад, від міжнародного, національного, рівня спільнот до рівня окремих будівель, зростаючою гнучкістю споживання завдяки новим технологіям, як от «розумні» лічильники та переміщення навантаження;

– кращою інтеграцією переривчастих відновлюваних джерел енергії, що потребує детальнішого урахування часу;

– децентралізованим виробництвом енергії та зростанням кількості прос'юмерів, що вимагає вищої просторової деталізації.

Зі зростанням рівня підключеності виникла концепція «інтернету енергії» як загальна парадигма для усунення втрат у системі електропостачання [29], що вимагає моделювальних фреймворків, здатних до оптимізації на різних масштабах із урахуванням декількох просторових і часових роздільностей. Численні дослідження показали, що штучний інтелект може сприяти підвищенню ефективності мережі та оптимізації розподілу й керування енергією в інтегрованих системах [3]. Однак водночас зростає й значущість інтерпретованості моделей і цифрових двійників [30]. Огляд сучасних розробок у сфері «розумних» мереж і цифрових двійників представлений у роботі [31].

Останніми роками спостерігається потужний рух у напрямку відкритих симуляційних і планувальних інструментів як важливих елементів прозорих моделювальних підходів, що поєднують масштаби й галузі [11]. Хоча доведено, що моделі з відкритим кодом і платформи для роботи з даними часто не поступаються за якістю пропрієтарним або комерційним рішенням [2], технічні та ринкові бар'єри досі ускладнюють досягнення повної інтероперабельності. Різні вимоги та обмеження, наприклад, регіональна специфіка, окремих інструментів у поєднанні з відмінностями в їх придатності до певних задач і сценаріїв створюють суттєві труднощі у сфері інтеграції даних та моделей [11].

### 1.2.1 Прогалини в інтероперабельності

Інтероперабельність – це здатність різних систем, пристроїв або застосунків ефективно обмінюватися інформацією та колективно її використовувати. Попри те, що технічна інтероперабельність у сфері енергетики є досить добре налагодженою, усе ще існує потреба в більшій інформаційній, функціональній та бізнес-інтероперабельності [18]. Ландшафт енергетичного моделювання залишається фрагментованим – відсутній уніфікований підхід до гармонізації моделей даних або знань між усіма доменами в ланцюжку створення цінності [32].

Це створює труднощі для інтеграції даних, валідації моделей, порівняння сценаріїв, оцінки політик і часто призводить до упереджених або недостатньо ефективних рішень, оскільки прийняттю рішень бракує важливої інформації для оцінки міждисциплінарних компромісів або супутніх вигод різних сценаріїв. Наприклад, міждисциплінарна інтероперабельність надала б можливість вивчати вплив екстремальних погодних явищ – як от спека, повені, буревії або землетруси – як на забудоване середовище, так і на інфраструктуру «розумних» мереж, що сприяло б виявленню вразливих місць і підвищенню загальної стійкості систем [26]. Інший приклад – аналіз викидів – він міг би вийти за межі суто загальної оцінки обсягів викидів парникових газів, надаючи можливість аналізувати детальні шаблони розповсюдження окремих забруднювачів повітря залежно від різних стратегій постачання енергії, за рахунок інтеграції просторових і погодних даних.

Наявні прогалини в інтероперабельності можна усунути шляхом впровадження стандартів і фреймворків, які сприяють комунікації та співпраці між різними інструментами моделювання, зацікавленими сторонами та платформами, або шляхом покращення обміну інформацією за допомогою спільних моделей даних, онтологій і технологій Семантичного Вебу [19]. У той час як перший підхід зосереджений на ширшому енергетичному секторі, наприклад:

- через інтеграцію сонячних панелей;
- акумуляторного зберігання;
- теплових насосів;
- котлів та електромобілів [32].

Другий підхід у принципі здатен безперешкодно взаємодіяти з будь-якими суміжними галузями, такими як транспорт, сільське господарство чи промислове виробництво [33].

### **1.3 Засоби моделювання тепло та енергоспоживання «розумного міста»**

#### **1.3.1 Аналізатор тепло та енергоспоживання «розумного» міста**

«City Energy Analyst» (CEA) – це відомий обчислювальний фреймворк з відкритим кодом для аналізу міських енергетичних систем [34], який надає дані щодо загального енергоспоживання будівель, потреб у опаленні та охолодженні тощо, а також потенціалу виробництва відновлюваної енергії на місці. CEA має глобальну базу користувачів і застосовувався у багатьох дослідженнях по всьому світу [35].

Інструментарій CEA постачається з вбудованими базами даних, які містять низку припущень, необхідних для проведення симуляцій. Ці бази включають інформацію про властивості будівель, зокрема дані «OpenStreetMap» (OSM) [36] щодо контурів, висоти та призначення будівель, а також довкілля – погодні умови, рельєф тощо [34]. Хоча такий підхід дає змогу користувачам запускати симуляції без надання конкретних вхідних даних, вбудовані припущення не завжди можуть точно відображати реальність. Пріоритетність широкої застосовності над інтеграцією фактичних характеристик конкретних будівель – це свідомий вибір розробників, типовий для багатьох інструментів оцінки енергетики зверху вниз.

### 1.3.2 Моделювання розсіювання

Моделі розсіювання загалом можна поділити на три категорії [37]:

- коробкові моделі – «box models»;
- моделі гаусового шлейфу – «Gaussian plume models»;
- моделі, що базуються на фізичних процесах високого рівня складності.

З огляду на їхню популярність та здатність враховувати широкий спектр вхідних даних [38], наприклад складні рельєфи та забудову на шляху розсіювання, для цього дослідження була обрана модель гаусового шлейфу, яка передбачає, що концентрації забруднювачів слідують гаусовому розподілу.

Зокрема, було обрано AERMOD [39] – стаціонарну модель гаусового шлейфу, яка також використовується Агентством з охорони навколишнього середовища США для оцінки забруднення повітря. AERMOD була обрана завдяки наявності відкритого коду, гарній документації, підтримці декількох джерел викидів і реалістичним вимогам до вхідних даних. Тобто, щоб забезпечити наявність усієї необхідної інформації для запуску моделі.

Модель AERMOD була застосована та валідована для широкого спектру умов [40]:

- як для рівнинної, так і для складної місцевості;
- на різних часових масштабах;
- для різноманітних джерел викидів, як от цементні комбінати чи вугільні електростанції, а також у багатьох інших дослідженнях.

Щоб врахувати вплив будівель на розсіювання забруднювачів повітря, AERMOD використовує перевірену модель підмивання «downwash model», яка враховує релевантні ефекти турбулентності [41].

### 1.3.3 Динамічний граф знань The World Avatar

Як зазначено в [15], проєкт «The World Avatar» має на меті створити цифровий «аватар» світу. Ця концепція всеохоплюючої моделі світу наразі

реалізується з використанням технологій Семантичного Вебу на основі універсального підходу до динамічного графа знань «dynamic Knowledge Graph» (dKG) [8].

Семантичний Веб [42] – це розширення Всесвітньої павутини, мета якого полягає у створенні взаємопов’язаного «вебу даних», де вміст є машинозчитуваним завдяки додаванню структурованих метаданих. Він базується на використанні онтологій і Фреймворку опису ресурсів (RDF) [43] для подання таких метаданих. Онтологія надає явне описання певної предметної області шляхом формального визначення релевантних понять і зв’язків між ними. Завдяки суворій формалізації онтології сприяють однозначному обміну даними, їх повторному використанню, а також дають змогу здійснювати логічне виведення прихованої інформації.

Представлення даних за допомогою онтологій призводить до формування орієнтованих графів, відомих як графи знань «Knowledge Graphs» (KGs), де вузли визначають поняття, екземпляри або дані, а ребра – зв’язки між ними. KG забезпечують розширювані структури даних, які добре підходять для відображення довільно структурованої інформації. За допомогою уніфікованих ідентифікаторів ресурсів (IRIs) ресурси в KG можна однозначно ідентифікувати, що дає можливість розподіляти дані у мережі, зберігаючи чіткі зв’язки між сутностями. Такі зв’язані дані «Linked Data» [44] відповідають принципам FAIR [14], знахідність, доступність, взаємодія та повторне використання, і сприяють кращій виявлюваності інформації.

Графи знань можна зберігати у спеціалізованих базах даних, зокрема «Blazegraph» [45], які зберігають RDF-дані у форматі трійок суб’єкт–предикат–об’єкт. SPARQL [46] – це мова запитів, створена для взаємодії з семантичною інформацією, яку можна використовувати для запитів і оновлення цих сховищ.

На відміну від звичайних KG, як от «Dbpedia» чи «Wikidata», TWA інтегрує також семантично анотовані обчислювальні можливості – так звані агенти, які працюють з інстанційованими сутностями та роблять граф знань інherentно динамічним [47]. Обчислювальні агенти у межах TWA можна

розглядати як виконувані компоненти знань, які виконують різноманітні завдання:

- інтеграція реальних даних;
- проведення розрахунків;
- оновлення графа;
- передача відповідей до фізичного світу.

Система «Derived Information Framework» (DIF) [48] надає KG-орієнтоване рішення для відстеження залежностей між даними та керування потоками інформації всередині TWA. Забезпечуючи детальне джерело даних на рівні окремих екземплярів, DIF вказує походження будь-якої інформації та агента, відповідального за її отримання. Представляючи внутрішні залежності у графі знань, DIF дає змогу автономне керування даними, що забезпечує поширення інформації по всьому графу.

Поєднання онтологічних описів, інстанційованих даних та автономних агентів робить «The World Avatar» (TWA) потужною, розширюваною системою, яка відповідає принципам FAIR для представлення та логічного аналізу складних доменів знань. Завдяки пов'язаності всіх елементів, ця архітектура підтримує взаємодійну екосистему цифрових двійників – тобто інструментів і сервісів, які описують поведінку взаємопов'язаних систем систем. TWA має модульну та масштабовану архітектуру, що забезпечує децентралізацію та інтероперабельність між гетерогенними джерелами даних і програмним забезпеченням.

#### **1.4 Аналіз онтологій в галузі «розумного» теплопостачання**

У межах TWA онтології служать модульними компонентами для представлення та поєднання знань і даних з різних предметних областей. Там, де це можливо, використовуються наявні онтології, а для виявлених прогалин розробляються нові. Такий підхід поважає наявну предметну експертизу і

забезпечує сумісність з існуючим розумінням у спільноті, водночас задовольняючи вимоги до наданих даних і цільового сценарію використання.

Огляд літератури показав, що відповідні онтології для цільового застосування або не є загальнодоступними, або не охоплюють необхідний рівень деталізації у відповідній галузі. Хоча було запропоновано багато онтологій для представлення часових понять або залежних від часу вимірювань [49], не було виявлено ефективного способу представлення великих обсягів часових рядів.

Для застосувань у сфері інженерних мереж наявні онтології дають змогу представити детальну 3D-топографію, топологію та функціональні властивості [50], проте публічно доступної концептуалізації динамічних експлуатаційних даних для підтримки оптимальної координації ресурсів теплопостачання на рівні району наразі не існує [51].

Існують онтології, спрямовані на представлення даних розсіювання забруднюючих речовин у повітрі [47], однак їм бракує сумісності з GeoSPARQL [52] для геопросторових об'єктів, що обмежує можливість їхнього використання у нових локаціях. Крім того, семантичного рішення для збереження концентрацій забруднюючих речовин, які часто подаються в растровому форматі моделями, досі не розроблено [37].

GeoSPARQL є де-факто стандартом для представлення та запитів геопросторових даних у Семантичному Вебі. Він також розширює мову запитів SPARQL, даючи можливість ефективно обробляти просторові дані.

## **1.5 Висновок до першого розділу**

В першому розділі кваліфікаційної роботи подано аналіз предметної області «розумного» теплопостачання. Описано моделювання теплоенергосистем «розумних міст». Досліджено засоби моделювання тепло та енергоспоживання «розумного міста». Проаналізовано онтології в галузі «розумного» теплопостачання.

## **РОЗДІЛ 2. ДИНАМІЧНІ ГРАФИ ЗНАНЬ ТА АГЕНТИ МЕРЕЖ І СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

### **2.1 Динамічні графи знань на базі онтології мереж та систем теплопостачання**

Розглянемо чотири нові онтології для динамічних графів знань мереж та систем теплопостачання:

- представлення даних часового ряду, а також відповідних аспектів роботи мережі теплопостачання «розумного» мікрорайону;
- розсіювання викидів;
- енергетичного домену будівель.

Застосуємо підхід знизу вгору, з основним акцентом на представлення реальних операційних даних та захоплення вихідних даних з City Energy Analyst [53]. Однак підтримується достатній рівень загальності, щоб забезпечити можливість повторного використання за межами цільового сценарію. Повторне використання вже існуючих онтологій максимізує переваги раніше концептуалізованих знань про предметну область та зв'язани дані, і вимагає використання попередньо визначених імен понять та відносин. Крім того, типові правила найменувань передбачають використання однини для назв понять, префікса «has» – для відношень, «camel case» – для складених фраз та інші специфічні для галузі правила. Консистентність усіх запропонованих онтологій була перевірена за допомогою HermiT reasoner [54].

#### **2.1.1 Динамічний граф знань на основі онтології часових рядів теплопостачання**

У [53] розроблено початковий підхід до легкої онтології часових рядів [55], головним чином для включення опису прогнозів та способу їх отримання. Основна структура графа знань для онтології подана на рисунку 2.1. Онтологія



«OntoTimeSeries» забезпечує легку (light-weight) репрезентацію даних часових рядів у рамках TWA. Вона також використовує загальний опис пов'язаних із прогнозуванням концепцій.

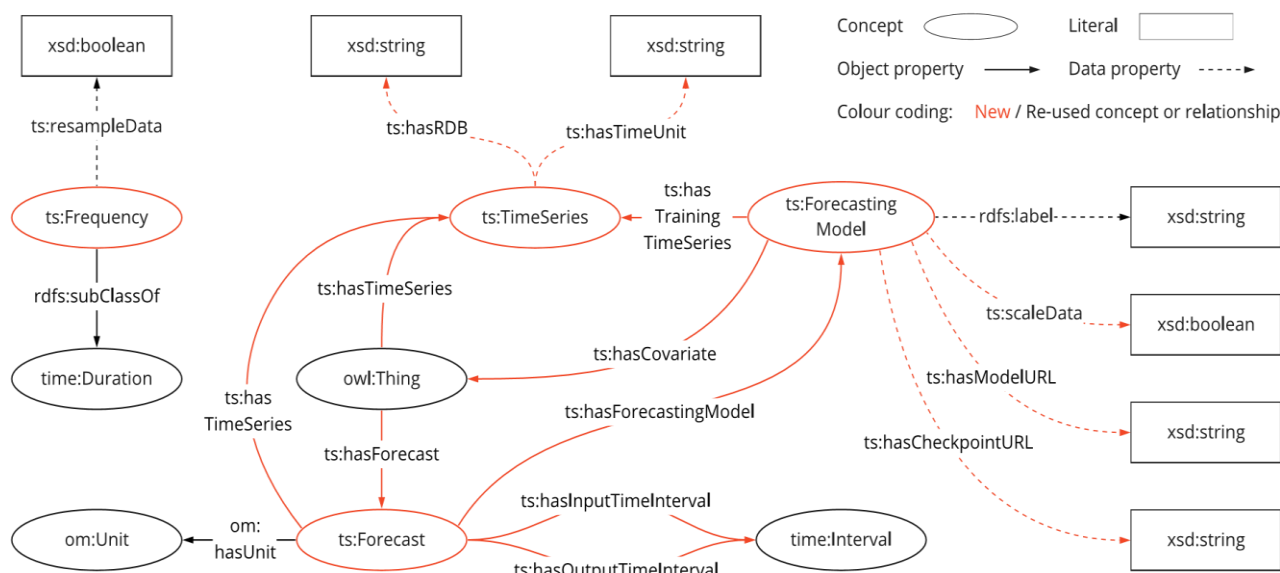


Рисунок 2.1 – Динамічний граф для онтології часових рядів теплопостачання [53]

Хоча розширення SAREF [56] визнає, що будь-яка сутність, наприклад, вимірювання, може бути представлена як окреме значення або як часовий ряд, підхід враховує випадки, коли сутності також мають пов'язані прогнози часових рядів. Відтак, область визначення для властивостей «hasTimeSeries» і «hasForecast» залишається необмеженою. Поняття Forecast (Прогноз) є центральною сутністю для представлення будь-якого прогнозу й асоціюється як із поняттям «TimeSeries», що зберігає фактичні передбачені значення, так і з додатковими метаданими про прогноз для забезпечення належної інформації про джерело даних. При цьому застосовується «ForecastingModel» (модель прогнозування), що використовується для створення прогнозу, довжину історичних часових рядів, які використовувались для навчання та/або масштабування, а також горизонт прогнозування [53].

Для представлення відповідних одиниць вимірювання та часових сутностей, зокрема, інтервал горизонту прогнозу, використовуються поняття з

ОМ та онтології часу W3C. Поняття «ForecastingModel» описує ключові аспекти того, як здійснюється прогнозування, зокрема, навчальний часовий ряд «training TimeSeries», коваріати, які можуть бути використані при створенні прогнозу, а також факт масштабування даних, що часто необхідне при використанні нейромережних методів. Раніше натреновані моделі можуть бути інтегровані шляхом вказання доступних URL-адрес для збережених моделей і контрольних точок, наприклад, збережених моделей «PyTorch» у форматі «pickle». В іншому випадку, можна вказати модель за замовчуванням, використовуючи певну мітку.

На відміну від розширення SAREF [56], явних обмежень на частоту представлених даних не встановлено, однак включено поняття «Frequency» (частота), разом із властивістю «resampleData», яка вказує, чи потрібно повторно вибирати частоти даних під час створення прогнозу, наприклад, для відповідності вимогам певних методів прогнозування.

Онтологія «OntoHeatNetwork» концептуалізує функціонування системи централізованого теплопостачання, тоді як «OntoDispersion» забезпечує семантичний опис поширення забруднюючих речовин у повітрі. Обидві онтології можуть бути пов'язані через спільні екземпляри будівель, що підтримує геопросторовий аналіз викидів, пов'язаних з роботою тепломереж. На схемі позначено існуючі та запропоновані назви понять і зв'язків, усі згадані простори імен.

### **2.1.2 Динамічний граф знань на основі онтології системи централізованого теплопостачання**

Ця онтологія покликана концептуалізувати роботу мережі централізованого теплопостачання. У той час як попередні роботи часто зосереджуються на статичній топології та 3D-представленнях [50], надана інформація не містить детальних геоприв'язок для опису структури мережі, наприклад, трубопроводів, з'єднувачів. Крім того, функціонування мережі має

динамічний характер, зокрема, попит на тепло з боку споживачів та профілі температури потоку.

Оскільки робота [51] не є загальнодоступною для прямого використання, було запропоновано власну онтологію для опису ключових аспектів роботи тепломереж, з використанням деяких елементів дизайну з попередніх досліджень.

Три основні поняття онтології для графа знань:

- «HeatingNetwork» – тепломережа;
- «HeatProvider» – постачальник тепла;
- «HeatGenerator» – генератор тепла.

«HeatingNetwork» з'єднує «HeatProvider» зі споживачами «Consumer» для задоволення їхніх потреб у теплі «HeatDemand», які представлені у вигляді часових рядів. Хоча розташування конкретного споживача наразі залишається неназваним і, відповідно, не моделюється явно, кожен «HeatProvider» підключений до мережі через «GridConnection» із спостережуваними властивостями. До таких властивостей належать:

- тиск;
- температура потоку;
- зворотна температура «om:Temperature»

Це дає змогу оцінити температурний перепад у цих точках і, відповідно, обсяги поданого тепла.

Поняття «HeatProvider» залишається загальним і позначає будь-яку сутність, що постачає тепло в мережу. У рамках цієї моделі визначено два підкласи, релевантні до конкретного випадку:

- «MunicipalUtility» – муніципальна теплова служба;
- «IncinerationPlant» – завод зі спалювання відходів.

Географічне розташування «HeatProvider» не моделюється графом знань безпосередньо в межах цієї онтології. Натомість геопросторові прив'язки реалізуються через посилення на відповідні екземпляри будівель з детальною геометричною та просторовою інформацією, як проілюстровано на рисунку 2.2.

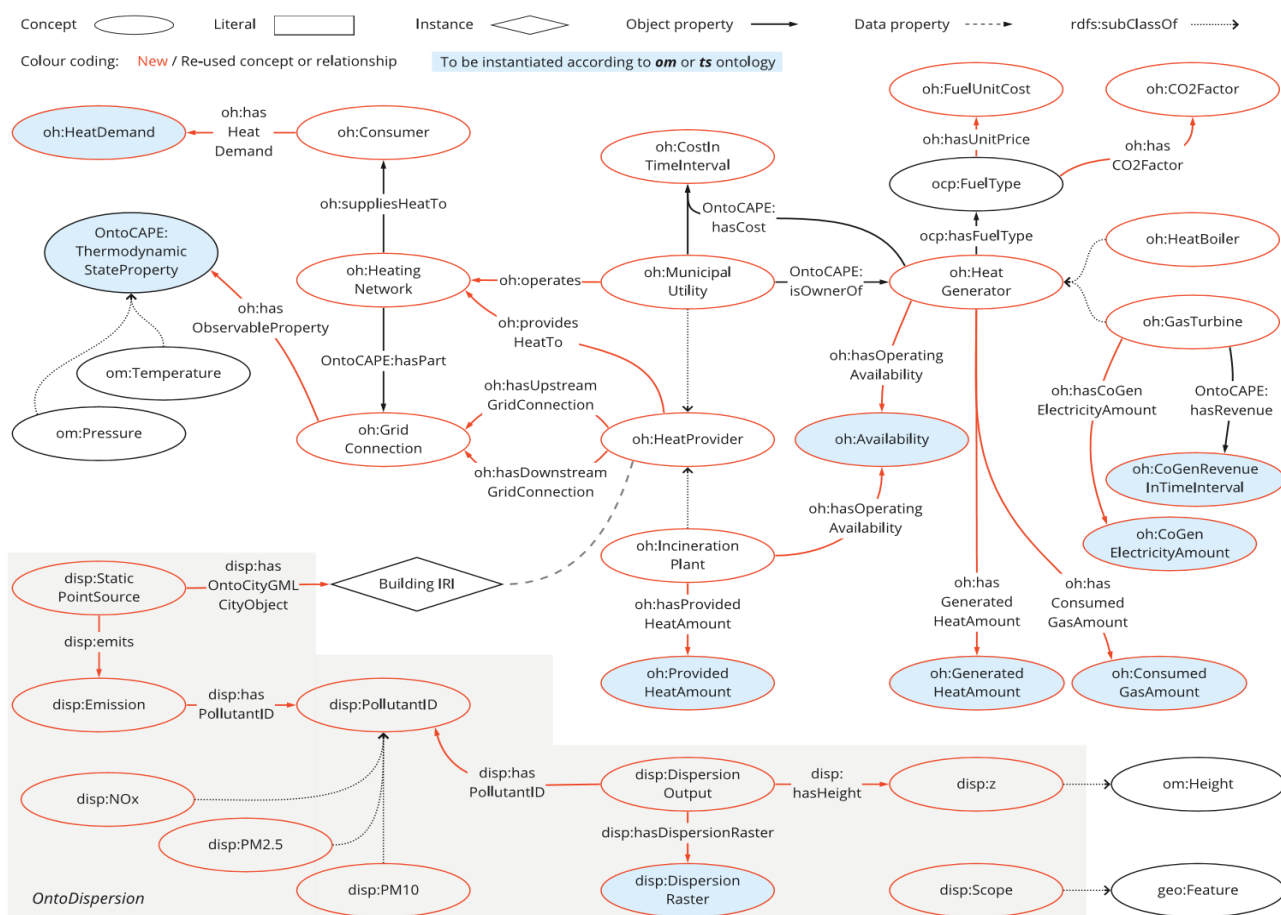


Рисунок 2.2 – Динамічний граф для онтології з’єднаного моделювання теплової мережі та дисперсії викидів [53]

Такий підхід дає можливість зберегти онтологію «OntoHeatNetwork» повністю вільною від геоінформації, використовуючи можливості вже існуючих онтологій. «IncinerationPlant» забезпечує певну кількість «ProvidedHeatAmount» для мережі на основі контракту з оператором мережі.

Муніципальна тепла компанія «MunicipalUtility» може володіти декількома теплогенераторами «HeatGenerators», включно з традиційними тепловими котлами «HeatBoilers» та газовими турбінами з комбінованим виробництвом тепла та електроенергії «GasTurbines CHP». Кожен генератор тепла пов'язаний із поняттями «GeneratedHeatAmount» – обсяг виробленого тепла та «ConsumedGasAmount» – обсяг спожитого газу, які залежать від ефективності генератора та використовуваного «oscp:FuelType» – типу палива.

Витрати моделюються як на рівні окремого генератора, так і на рівні оператора системи.

Оскільки викиди CO<sub>2</sub> безпосередньо впливають на експлуатаційні витрати (OPEX) через вартість сертифікатів на викиди, вони моделюються явно як частина «OntoHeatNetwork», тоді як інші забруднювачі повітря описуються у межах онтології «OntoDispersion». Аналогічно, враховується когенерація електроенергії газовою турбіною, оскільки відповідний дохід знижує витрати на виробництво тепла (OPEX).

Введено поняття «Availability» – доступність, яке враховує періоди зупинок або необхідного простою окремих генераторів. Більшість властивостей будуть представлені у вигляді часових рядів, щоб враховувати динамічні умови, тобто коливання цін, змінний попит на тепло, і узгоджуватись із погодинною стратегією оптимізації, яку застосовує оператор муніципальної тепломережі у цільовому кейсі.

### **2.1.3 Динамічний граф знань на основі онтології дисперсії «OntoDispersion» в системах теплопостачання**

Ця легка онтологія призначена для надання динамічного графа знань семантичної розмітки даних моделювання дисперсії в системах теплопостачання, з метою створення машиночитаних вхідних та вихідних даних для агентів і сприяння міждисциплінарній інтероперабельності між різними моделями. Основні поняття «OntoDispersion» розміщені в нижній частині рис. 2.2, при цьому передбачене зв'язування з онтологією «OntoHeatNetwork».

Геопросторове поняття «Score» (область) визначає домен симуляції для розрахунку дисперсії і є підкласом «geo:Feature», що дає змогу використовувати різноманітні можливості геопросторових запитів та обробки через «GeoSPARQL». Завдяки використанню понять з «GeoSPARQL», онтологія

спроектована так, щоб бути максимально стійкою і легко адаптованою до різних географічних зон.

Універсальні геопросторові можливості мають важливе значення для визначення, які статичні точкові джерела викидів «StaticPointSources», що випускають один або більше типів забруднювачів, розміщені в межах певної зони інтересу. «StaticPointSources» пов'язані з відповідними будівлями, які описують фактичну геометрію вихідних отворів викидів.

Кожен екземпляр «DispersionOutput» містить інформацію про набір растрових даних «DispersionRaster» для будь-якої комбінації типу забруднювача «PollutantID» і симульованої висоти «z». При цьому доцільно не намагатись матеріалізувати растрові дані як RDF-трійки. Натомість, будь-який екземпляр «DispersionRaster» містить лише метадані, наприклад, ім'я «GeoTIFF»-файлу, растрового зображення, збереженого в пов'язаній базі даних «PostGIS».

Таким чином, агент, що виконує запит на дані растрової дисперсії, отримає метадані через SPARQL-запит, після чого зможе виконати відповідний SQL-запит для отримання фактичних значень растрових даних.

#### **2.1.4 Динамічний граф знань на основі онтології енергоспоживання «розумних» будівель**

Енергетичні аспекти відіграють важливу роль у генеральному плануванні міст, а будівлі є основними споживачами міської енергії. Існують онтології для моделювання енергоспоживання будівель у містах [57] та для генерального планування [58], але жодна з них насправді не поєднує ці дві сфери. Ця онтологія має на меті подолати цю прогалину, щоб полегшити обмін інформацією між цими тісно пов'язаними галузями. Фрагмент запропонованої онтології «OntoUBEMMP» показано на рисунку 2.3.

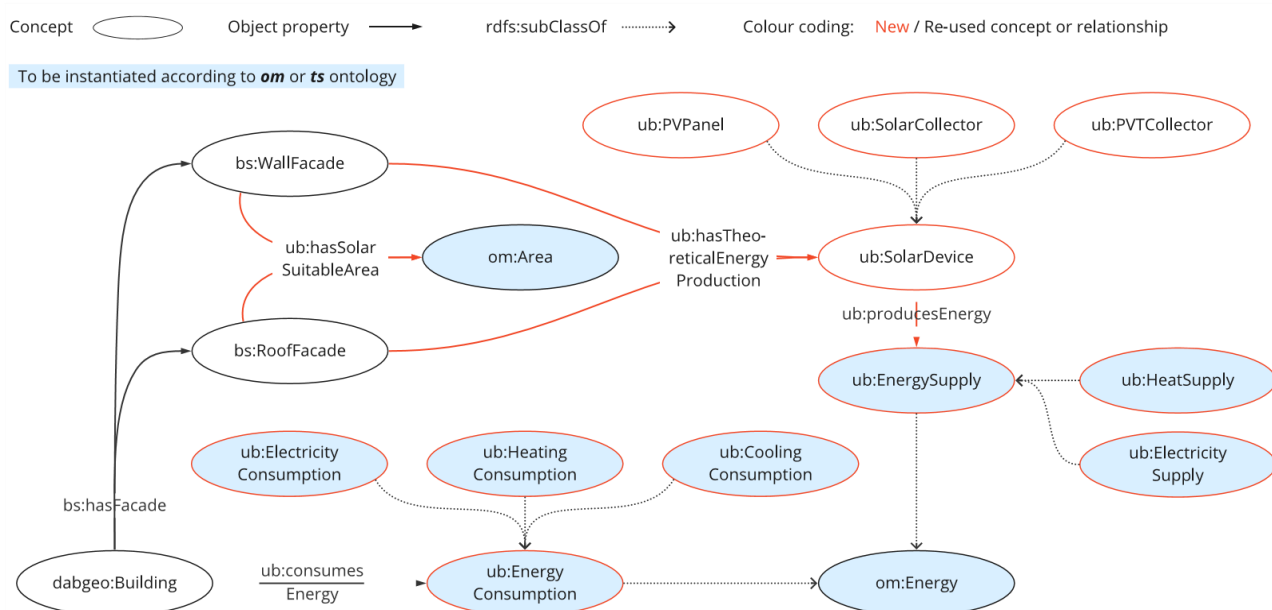


Рисунок 2.3 – Онтологія моделювання енергоспоживання «розумних» будівель у містах та генерального планування [53]

Онтологія «OntoUBEMMP» представляє ключові поняття на перетині моделювання міського енергоспоживання та генерального планування, зокрема, енергетичні потреби будівель і потенціал використання сонячної енергії. Підписи на зображенні позначають наявні або запропоновані назви концептів і зв'язків.

Ключовими поняттями є «dabgeo:Building», «EnergyConsumption» та «EnergySupply», причому основна концепція будівлі спільно використовується з онтологією «OntoBuiltEnv» для забезпечення інтероперабельності між цією енергетично-орієнтованою перспективою та загальнішим описом будівлі, наданим «OntoBuiltEnv». Концепція «EnergyConsumption» пов'язується з відповідним екземпляром будівлі через відношення «consumesEnergy», щоб представити енергетичний попит будівлі.

Відновлювані джерела енергії мають враховуватись під час генерального планування для компенсації «EnergyConsumption». Наприклад, будівля може бути оснащена «SolarDevices» на своїх «bs:RoofFacade» або «bs:WallFacade». Для будівель, які мають придатні площі для генерації сонячної енергії, зв'язки «hasSolarSuitableArea» вказують на ненульову площу, відношення

«hasTheoreticalEnergyProduction» пов'язує ці площі з потенційним «EnergySupply» через відповідні «SolarDevice». Існують різні підкласи «EnergySupply», зокрема «ElectricitySupply» та «HeatSupply», залежно від типу встановленого «SolarDevice».

## 2.2 Агенти для динамічних графів знань оптимізації процесів виробництва тепла

Розроблено декілька агентів. Огляд усіх задіяних агентів подано на рисунку 2.4 та описано нижче. Діаграма послідовності всіх агентів, задіяних в оптимізації виробництва тепла з інтегрованим моделюванням розсіювання викидів (показано для випадку вже інстанційованих маркувань похідних даних).

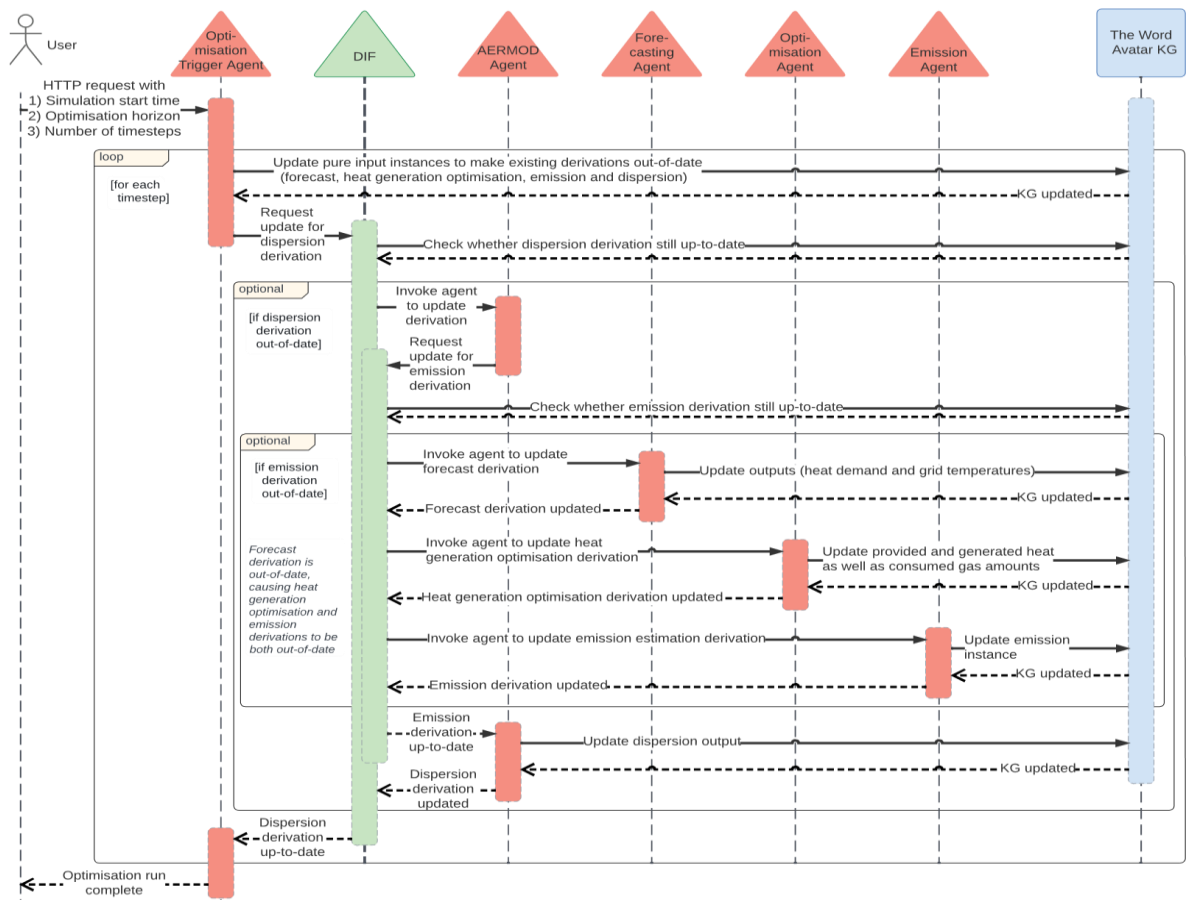


Рисунок 2.4 – Взаємодія агентів в інформаційній системі теплопостачання [53]



Усі агенти упаковані як окремі Docker-сервіси для сприяння розподіленому та платформо-незалежному розгортанню, наприклад, віддалено в хмарі, як реалізовано у [53]. На відміну від монолітних підходів до моделювання, запропонований дизайн, що базується на послідовно зв'язаних атомарних агентах, дає можливість досягти зростаючої складності в архітектурі систем систем, без обмеження на суворо лінійну залежність між компонентами.

В [53] на основі даних мережу було інстанційовано згідно з онтологією «OntoHeatNetwork», використовуючи погодинні історичні часові ряди за один рік. Використовуючи ці інстанційовані часові ряди, агент прогнозування може передбачити будь-яку величину, зокрема попит на тепло в громаді «HeatDemand». Далі агент оптимізації централізованого теплопостачання формує стратегію подачі тепла, оптимізовану за вартістю, для задоволення прогнозованого попиту, враховуючи як внутрішні джерела тепла, так і постачання з зовнішнього заводу зі спалювання відходів.

Відповідні обсяги спаленого природного газу та тепла, отриманого з утилізації відходів, перетворюються агентом оцінки викидів на потоки викидів  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{PM}_{10}$ . Разом із відповідною інформацією про розташування ці потоки викидів передаються агенту моделювання розсіювання для створення карти розсіювання викидів у стаціонарному стані, використовуючи фактичні історичні дані про вітер.

Усі агенти реалізовано як агенти похідних на основі DIF [48] і вони взаємодіють безпосередньо через dKG, що гарантує однозначне відстеження походження результатів – як вони були отримані та від яких вхідних даних залежать. Також було впроваджено агента ініціювання оптимізації, який координує взаємодію між користувачем і автоматизованими процесами прогнозування, оптимізації та подальшого моделювання розсіювання викидів [53].

У той час як динамічне прогнозування навантаження та оптимізація з боку постачання використовують історичні дані, агент «City Energy Analyst» може надавати загальні оцінки енергоефективності будівель у разі відсутності

історичних даних та використовуючи специфічні характеристики конструкції будівель і погодні дані, можуть бути оцінені різні профілі попиту на енергію та її генерації. Така додаткова перспектива забезпечує цінну інформацію про потреби в теплі на рівні окремих будівель, наприклад, у контексті аналізу можливого розширення мережі централізованого теплопостачання.

### 2.2.1 Агент прогнозування процесів споживання тепла

Цей агент надає загальні можливості прогнозування як частину платформи TWA: він може отримувати інстанційовані часові ряди, прогнозувати майбутні значення та інстанціювати відповідні прогнози назад у dKG, використовуючи онтологію «OntoTimeSeries». Агент побудований на основі бібліотеки Python Darts [59] і підтримує прогнозування за допомогою широкого спектра методів – від класичних «прозорих» моделей, наприклад, усталені статистичні методи, зокрема, авторегресивні інтегровані моделі ковзного середнього (ARIMA) та їхні похідні, до «чорних скриньок» з машинного навчання, наприклад, сучасні трансформерні моделі, а також «сірих» моделей, як-от Prophet від Facebook [60].

Для створення будь-якого прогнозу потрібні вхідні дані:

- екземпляр, пов'язаний із часовим рядом, який потрібно передбачити,
- екземпляр «ts:ForecastingModel», що описує модель прогнозування, яка буде використана,
- цільова «ts:Frequency» прогнозу, що має бути створений,
- інтервал «time:Interval», що визначає горизонт прогнозування,
- тривалість «time:Duration», яка вказує, скільки історичних даних потрібно для навчання та масштабування перед створенням прогнозу.

Нові прогнози інстанціюються разом із відповідними метаданими:

- вхідні та вихідні часові інтервали;
- за потреби, одиниця вимірювання.

Агент підтримує більшість моделей прогнозування, які доступні в Darts. Модель, що буде використана, визначається інстанційованими властивостями відповідного екземпляра «ts:ForecastingModel» у dKG, причому «Prophet» використовується за замовчуванням для будь-яких часових рядів. Підтримуються прогнози як з коваріатами, так і без них – залежно від наявності відношень «ts:hasCovariate» у цільовій моделі. Крім того, можна навчати та зберігати користувацькі моделі в TWA для подальшого прогнозування. Це потребує створення власних екземплярів «ts:ForecastingModel» із властивостями:

- доступні через URL файли моделей;
- відповідні коваріати;
- параметри масштабування.

Таким чином, агент пропонує як готові можливості прогнозування та гнучкість для використання спеціально налаштованих моделей за потреби.

Агент може прогнозувати будь-який довільний часовий ряд і використовується, зокрема, для прогнозування попиту на тепло та температур у мережі централізованого теплопостачання, застосовуючи Temporal Fusion Transformers (TFT) [61] у межах цього дослідження. У порівнянні з багатьма іншими методами глибокого навчання, трансформери на основі attention-механізмів (TFT) забезпечують кращу пояснюваність і інтерпретованість завдяки інформації про ваги уваги, які вказують, на що модель звертає увагу. Навчені моделі TFT є точнішими, ніж налаштовані моделі SARIMAX, які застосовувались раніше [62], особливо на довгих горизонтах прогнозування.

### **2.2.2 Агент оптимізації мережі централізованого теплопостачання**

Цей агент використовує раніше розроблену оптимізаційну процедуру для мінімізації загальної вартості виробництва тепла для постачальника теплової енергії в мережі централізованого теплопостачання [62]. Оптимізація здійснюється за ієрархічним підходом на основі принципу порядку переваги

(merit-order) для визначення оптимального з точки зору OPEX (операційних витрат) короткострокового теплового міксу для системи, що складається з декількох газових котлів, газової турбіни з когенерацією (CHP), а також зовнішнього джерела тепла з заводу з утилізації відходів.

У цьому дослідженні демонструється здатність dKG (розподілених графів знань) підтримувати взаємодіючі цифрові двійники для отримання ширшої енергетичної перспективи, а також семантична інтеграція наявної моделі у платформу TWA. Зацікавленого читача відсилаємо до роботи Hofmeister et al. [62], де ефективність цієї оптимізації продемонстрована на основі реальних експлуатаційних даних.

Якщо початкова версія оптимізації покладалась на внутрішньо створені прогнози SARIMAX для ключових вхідних даних, то цей агент підвищує модульність і сприяє архітектурі мікросервісів, яку забезпечують орієнтовані на завдання цифрові двійники, використовуючи зовнішньо інстанційовані прогнози.

Для проведення оптимізації агенту потрібно п'ять екземплярів `ts:Forecast` та один екземпляр `time:Interval`. Інтервал визначає горизонт оптимізації – тобто період, для якого потрібно сформулювати стратегію подачі тепла, а п'ять прогнозів стосуються:

- прогнозованого `oh:HeatDemand` (попиту на тепло),
- чотирьох температур `om:Temperature` (температур подачі та зворотної води з боку заводу утилізації відходів і міської тепломережі) впродовж цього періоду.

Окрім цих ключових вхідних даних, додаткова інформація запитується агентом із dKG під час його роботи.

Після успішного завершення оптимізації результати інстанціюються назад у dKG згідно з онтологією `OntoHeatNet`:

- екземпляр `oh:ProvidedHeatAmount`, який описує обсяг тепла, що постачається з заводу утилізації відходів;

- екземпляри `oh:GeneratedHeatAmount` та `oh:ConsumedGasAmount` для кожного газового котла і газової турбіни СНР, що вказують обсяг тепла, який має бути вироблений, і відповідний обсяг спожитого газу;
- екземпляр `oh:CoGenElectricityAmount`, що описує обсяг електроенергії, співвиробленої газовою турбіною при генерації необхідного тепла;
- екземпляр `oh:Availability` для кожного джерела тепла, що вказує його очікувану доступність у наступні часові кроки.

Усі результати оптимізації інстанціюються як `ts:Forecast` для відповідних концептів, щоб не конфліктувати з інстанційованими історичними даними. Нові результати автоматично замінюють попередні інстанційовані значення.

Під час першого запуску агент запитує історичні дані про споживання газу, виробництво тепла і, якщо доречно, виробництво електроенергії, щоб налаштувати моделі споживання газу та когенерації на основі [62].

### 2.2.3 Агент оцінки викидів

Цей агент оцінює рівні викидів, пов'язані з виробництвом тепла шляхом спалювання природного газу, тобто в газових котлах або газовій турбіні з когенерацією – СНР, або відходів (тобто на заводі з утилізації відходів). Наразі оцінка обмежується основними повітряними забруднювачами:  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{PM}_{10}$  [63], і ґрунтується на літературних коефіцієнтах викидів, а не на детальних моделях горіння – як для перевірки концепції, так і через відсутність детальної інформації щодо внутрішньої роботи заводу з утилізації відходів.

Агент реалізовано як «derivation agent», тому всі необхідні вхідні дані мають бути доступні в графі знань (KG). До них належать:

- один екземпляр «`dh:ProvidedHeatAmount`»;
- один або більше екземплярів «`dh:ConsumedGasAmount`», які представляють (оптимізовані) часові ряди для зовнішньо отриманого тепла або обсягів спожитого газу відповідно.

Колекція обсягів спожитого газу може відповідати декільком газовим котлам і газовим турбінам, розміщеним у межах однієї будівлі, які викидають відпрацьовані гази через спільну димову трубу.

Екземпляр `disp:SimulationTime` позначає мітку часу, для якої потрібно оцінити викиди, тобто для якої згодом буде змодельовано розсіювання забруднень. Нарешті, екземпляр `disp:StaticPointSource` вказує місце, де відбуватиметься викид оцінених забруднень.

#### **2.2.4 Агент моделювання розсіювання повітряних забруднювачів**

Цей агент використовує AERMOD [64] для моделювання розсіювання різних повітряних забруднювачів у певній зоні інтересу. Він враховує інстанційовані дані про вітер і потоки викидів, тобто масову витрату та температуру, з декількох точкових джерел, щоб створити карти концентрації забруднень.

Після виклику агент виконує три основні кроки:

- Запитує відповідні вхідні дані з графа знань (KG),
- Виконує симуляцію в AERMOD з використанням цієї інформації,
- Інстанціює результати назад у граф знань.

Як показано на рисунку 2.5, основними вхідними параметрами є «`disp:Score`» – область моделювання та «`disp:SimulationTime`» – час симуляції.

«`disp:Score`» визначає полігон домену симуляції, тобто прямокутник, а «`disp:SimulationTime`» задає часовий крок, для якого виконується розрахунок розсіювання. Зверніть увагу, що це вхідне значення також використовується агентом оцінки викидів.

Агенту потрібна принаймні одна інстанція «`disp:StaticPointSource`», наприклад, димар, що викидає забруднення, яка знаходиться в межах «`disp:Score`», для моделювання шлейфу.

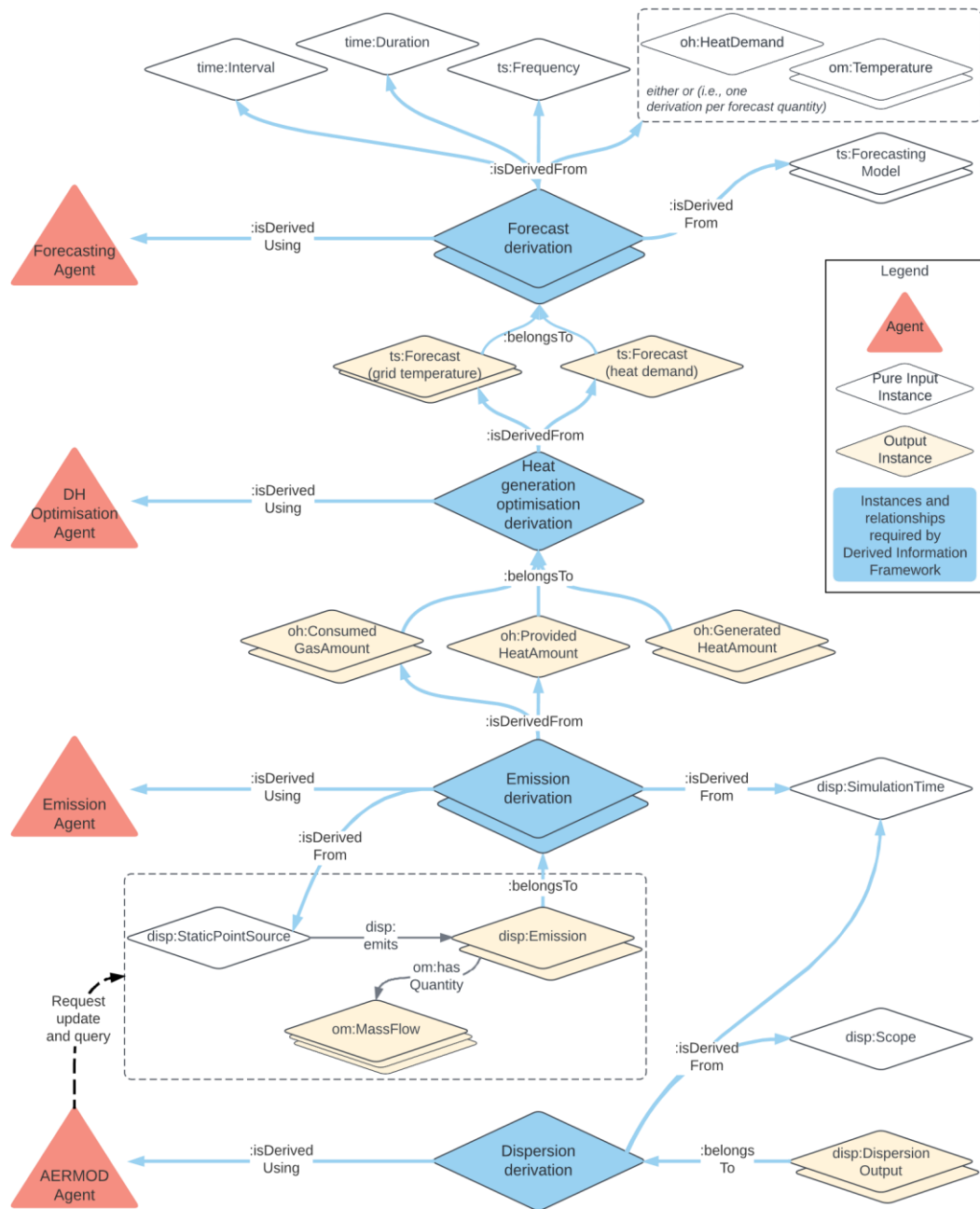


Рисунок 2.5 –Схематичне зображення маркування у графі знань, що імітує контур керування з прогнозуванням «model predictive control loop» [53]

Інстанції «disp:StaticPointSource» не пов’язуються напряму з похідними моделями розсіювання, щоб забезпечити можливість роботи з мобільними джерелами, наприклад, стрілки, які можуть входити і виходити з «disp:Score», що робить явне маркування надто складним. Натомість агент використовує «disp:Score», щоб отримати відповідні будівлі та джерела викидів у межах області симуляції для відповідного моменту часу. «disp:SimulationTime» також використовується для запиту фактичних (історичних) погодних даних на цей

час. Після отримання всієї необхідної інформації, агент формує вхідні файли та запускає AERMOD. Потім результати розсіювання обробляються у вигляді растрових даних і оновлюється інстанція «disp:DispersionOutput» у dKG.

Хоча в дослідженні [53] використовується AERMOD, його можна замінити на будь-яку іншу модель розсіювання, наприклад, EPISODE [65], з мінімальними змінами до загального робочого процесу. При цьому необхідно буде розробити нового агента, однак запропонована онтологія цілком підходить для представлення відповідних понять, наприклад, «disp:DispersionRaster».

### **2.2.5 Агент аналітики тепло та енергоспоживання «розумного» міста**

Цей агент розраховує різні аспекти енергоефективності будівель за допомогою CEA як рушія симуляцій. Щоб подолати обмеження вбудованих припущень CEA, фактичні дані про забудову з dKG інтегруються для проведення аналізів, орієнтованих на конкретну будівлю, зокрема:

- геометрія;
- призначення будівлі;
- геометрія навколишніх споруд;
- погодні та топографічні дані.

Реалізація зберігає широку застосовність CEA, одночасно впроваджуючи детальний підхід знизу-вгору, орієнтований на окремі будівлі.

Після виклику агент CEA намагається отримати геометрію цільової будівлі – тобто вказаних через IRI у запиті HTTP, а також геометрію навколишніх будівель. Отримані з TWA геометрії замінюють стандартні контури OSM у CEA. Далі агент намагається отримати інформацію про призначення будівлі з TWA, щоб сформувати найбільш релевантні профілі енергоспоживання. Після збору вхідних даних на рівні будівлі агент звертається до dKG по фактичну погодну інформацію в цільовій локації.



## 2.3 Зв'язані агенти для міждисциплінарної інтероперабельності

Окремі агенти з'єднуються між собою через вхідні та вихідні екземпляри за допомогою вбудованої системи виведення інформації TWA. Це гарантує, що коли з dKG запитується конкретна інформація, усі залежні вхідні дані на попередніх етапах перевіряються першочергово, щоб з'ясувати, чи є вони актуальними, або ж потребують оновлення перед отриманням. Використовуємо цю інфраструктуру для автоматичного моделювання розсіювання забруднюючих речовин у повітрі щоразу, коли виконується нова оптимізація теплогенерації та інстанціюються відповідні потоки викидів.

Агент запуску оптимізації виконує роль агента зовнішнього введення. Для ініціювання оптимізації очікується HTTP POST-запит, який вказує:

- 1) час початку оптимізації;
- 2) горизонт оптимізації – тобто кількість часових кроків, які слід враховувати в межах кожної оптимізації;
- 3) загальну кількість наступних часових кроків, які необхідно оптимізувати.

Після отримання та перевірки запиту агент створює або оновлює відповідні екземпляри у dKG, а потім ініціює запит на оновлення до агента моделювання розсіювання (AERMOD), через DIF. DIF оцінює, чи вже існує актуальна інстанція результатів моделювання розсіювання, порівнюючи час створення відповідного екземпляра з часом створення вхідних даних. За необхідності ініціюється оновлення, і DIF проходить ланцюжок залежностей у зворотному порядку – моделювання розсіювання залежить від результатів оцінки викидів, яка, у свою чергу, залежить від оптимізації теплогенерації, що базується на прогнозах теплового попиту та температур мережі. DIF запускає оновлення завдяки виклику відповідних агентів, починаючи з агента прогнозування, відповідального за найвищий рівень залежностей, щоб забезпечити правильну каскаду інформації. Коли вся інформація актуалізована, симулюються запитані результати розсіювання, що позначає завершення

поточної оптимізації [53]. Цей цикл повторюється до досягнення вказаної кількості часових кроків для оптимізації.

## **2.4 Висновок до другого розділу**

В другому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано розроблені онтології мереж та систем теплопостачання. Зокрема, подано опис онтології часових рядів теплопостачання, онтології системи централізованого теплопостачання, онтології дисперсії «OntoDispersion» в системах теплопостачання та онтології енергоспоживання «розумних» будівель. Досліджено агенти для оптимізації процесів виробництва тепла, зокрема, агент прогнозування процесів споживання тепла, агент оптимізації мережі централізованого теплопостачання, агент оцінки викидів, агент моделювання розсіювання повітряних забруднювачів та агент аналітики енергоспоживання «розумного» міста. Подано опис зв'язаних агентів для міждисциплінарної інтероперабельності.

## **РОЗДІЛ 3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ОГЛЯД, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ «РОЗУМНОГО» ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

### **3.1 Комплексний енергетичний огляд процесів «розумного» теплопостачання**

Використання розроблених онтологій і семантичних агентів, пов'язаних через інфраструктуру виведених даних «Derived Information Framework», відкриває нові можливості та інсайти, зокрема:

- нативне для графа знань управління системою централізованого теплопостачання;
- уточнення аналізу енергоспоживання будівель завдяки останнім інстанційованим даним про будівельний фонд;
- міждисциплінарне розуміння поширення забруднень повітря, спричинених виробництвом тепла.

The «World Avatar» пропонує універсальний інтерфейс візуалізації для дослідження та взаємодії з базовими даними. Він підтримує як Marbox – переважно для географічної інформації, так і Cesium – переважно для деталізованого геометричного відображення. Обидва є добре відомими інструментами візуалізації. Важливо розуміти, що представлені візуалізації не є самими цифровими двійниками. Натомість цифрові двійники – це динамічна сукупність знань, даних і моделей, вбудована в динамічний граф знань, який працює у фоновому режимі, а візуалізація – лише один зі способів доступу до неї. Інші варіанти включають мобільний застосунок [66], VR-окуляри, а також єдиний SPARQL-ендпоінт.

### **3.2 Ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом**

Міська мережа централізованого «розумного» теплопостачання [53] була інстанційована на основі реальних даних, зокрема історичних даних про

роботу, погодні умови та ринкові показники. Дані про роботу включають деталі щодо самої мережі, а також підключених постачальників тепла, тоді як ринкові умови охоплюють часові ряди цін на електроенергію, газ і сертифікати на викиди CO<sub>2</sub>. Інстанційовані дані про тепломережу містять:

- профіль загального теплового попиту всіх підключених споживачів;
- експлуатаційні межі мережі, наприклад, мінімальний об'ємний потік для забезпечення гідродинамічної стабільності;
- також параметри підключення міської котельні та заводу з утилізації відходів, зокрема зафіксовані температури подачі й звороту.

Дані про об'єкти [53] містять:

- інформацію про будівлі, в яких розміщено окремі генератори тепла;
- їх конструктивні характеристики, наприклад, номінальна теплова потужність;
- динамічні властивості – часові ряди згенерованого тепла й електроенергії, а також спожитого газу.

Інтеграція між різними рівнями, тобто від міського масштабу до детальних характеристик котлів, разом із динамізмом, притаманним нативному керуванню через dKG, поєднує в собі та перевершує можливості ізолюваних моделей енергосистем і підходів, заснованих на геоінформаційних системах. На рисунку 3.1 зображено знімок динамічної панелі прогнозу теплового попиту.



Рисунок 3.1 – Прогноз теплового попиту [53]

Вона демонструє останні історичні дані про міський попит на тепло серед усіх споживачів централізованого опалення, а також прогноз попиту на наступні 24 години. Панель оновлюється автоматично з кожним новим прогнозом, надаючи реальні інсайти щодо поточного стану системи. Окрім візуалізації у вигляді часового ряду (праворуч), індикатор (ліворуч) показує поточний стан відносно мінімальних і максимальних значень (як експлуатаційних, так і спостережених).

Рисунок 3.2 ілюструє оптимальний розподіл навантаження між трьома традиційними тепловими котлами, однією газовою турбіною з когенерацією (CHP) та зовнішнім постачанням тепла з розташованого поблизу заводу з утилізації відходів для покриття прогнозованого попиту.

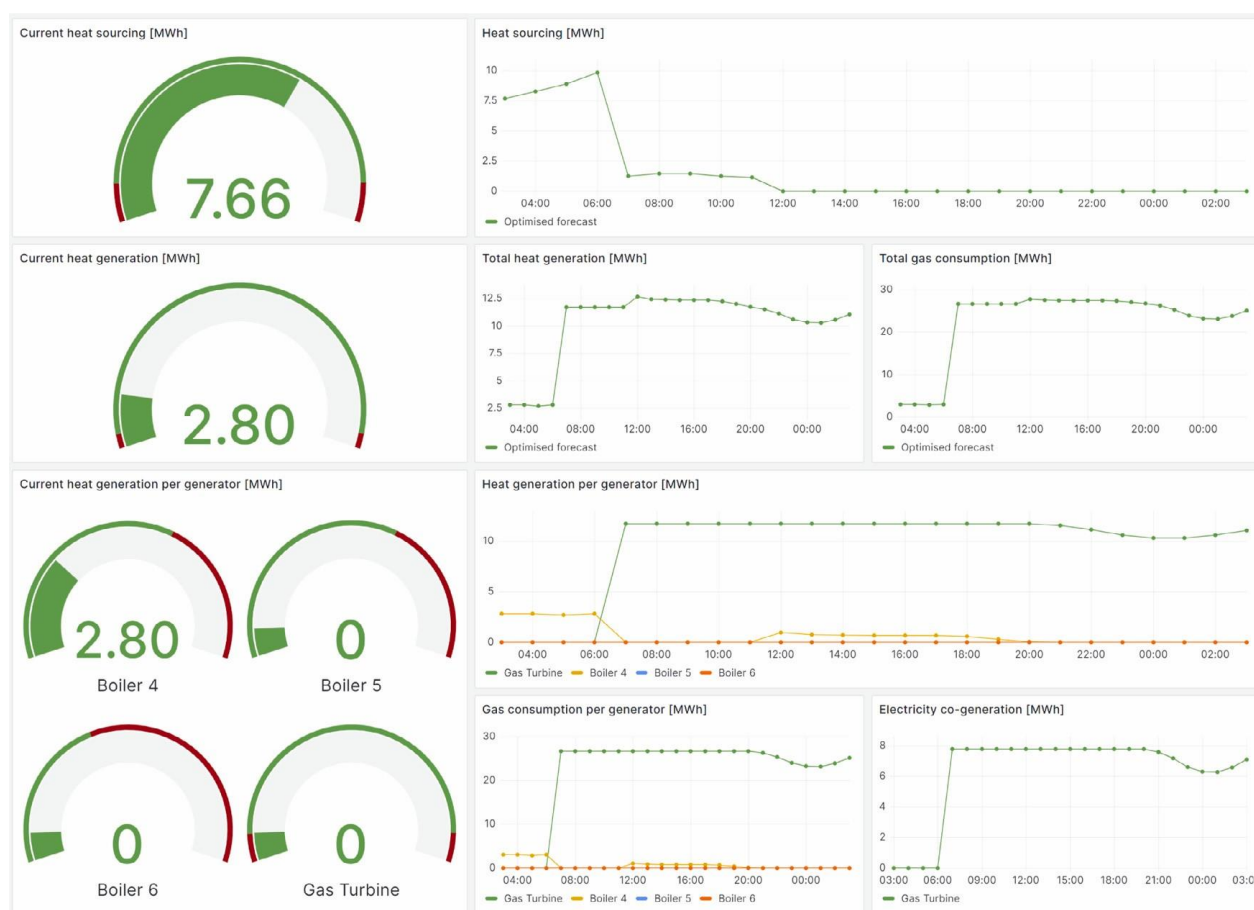


Рисунок 3.2 – Оптимізоване теплогенерування [53]

Панель приладів з відображенням розподілу теплової енергії між генераторами та зовнішніми джерелами, оптимізованого за витратами, з

урахуванням заводу з утилізації відходів, трьох традиційних газових котлів та газової турбіни (на основі прогнозованого теплового попиту).

### 3.3 Аналіз енергоспоживання міста та планування сценаріїв

Оскільки фактичні (історичні) енергетичні дані не завжди доступні, виникає потреба в альтернативному підході для оцінки відповідних показників та отримання висновків у ширшому масштабі, зокрема щодо різних аспектів енергоефективності будівель, як от попит на різні типи енергії та потенціал локального виробництва сонячної енергії [53].

Результати роботи агента зберігаються у TWA та прикріплюються до відповідної будівлі, після чого їх можна переглядати через єдиний візуалізаційний інтерфейс. Наприклад, рисунок 3.3 демонструє річний попит на тепло для обраного району, що дає змогу швидко ідентифікувати будівлі та території з високим або низьким тепловим споживанням.

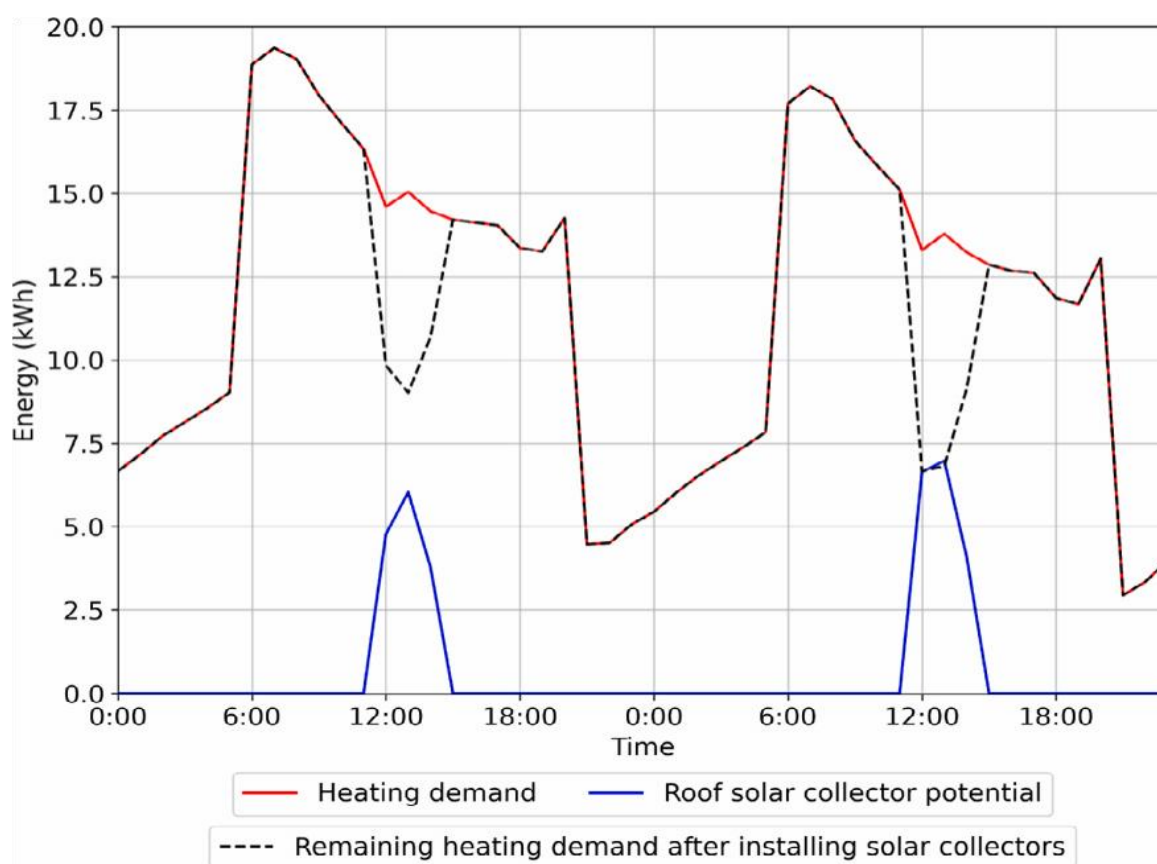


Рис.унок 3.3 – Річний попит на тепло для обраного району [53]

На відміну від офіційного інструментарію СЕА, для базових симуляцій використовуються фактичні дані про будівельний фонд, тобто:

- геометрія будівель;
- геометрія навколишніх будівель;
- цільове використання об'єктів.

Також використовуються погодні та рельєфні дані, щоб отримати будівельно-орієнтовані оцінки.

Картографічна візуалізація дає змогу швидко ідентифікувати будівлі з високим або низьким тепловим попитом, а часові ряди дають змогу аналізувати профілі навантаження окремих будівель. Хоча рисунок 3.4 дає переважно якісні уявлення, достовірність результатів була оцінена як для споживання електроенергії, так і для потенціалу сонячної генерації на місці.

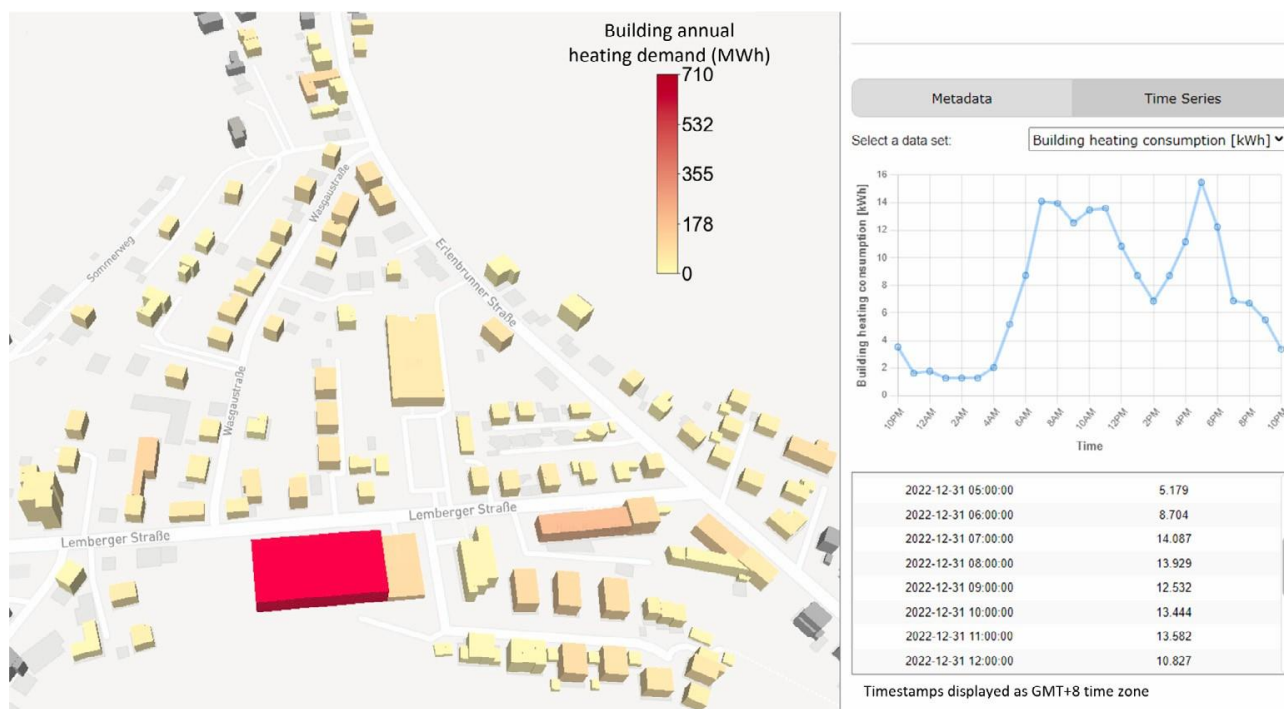


Рисунок 3.4 – Профілі теплового навантаження [53]

Оцінка порівнює результати, створені агентом, з фактичними історичними даними споживання або з офіційними оцінками PV-потенціалу [53]. Завдяки використанню детальніших даних про будівлі та погодних умов з

TWA, можна досягти значного покращення точності порівняно з нативним CEA, тобто базовим інструментарієм CEA без змін.

Окрім сумарних річних значень, агент CEA також надає часові ряди загального теплового попиту та потенціалу сонячної генерації, що дає змогу оцінити можливі енергозбереження при встановленні сонячних колекторів. Базовий аналіз може розглядати використання тепла від сонячних панелей на даху для прямого покриття потреби будівлі в опаленні без урахування теплових накопичувачів. Така спрощена оцінка дає попереднє уявлення про залишкову потребу в теплі з інших джерел, як от газ або централізоване тепlopостачання, разом із потенційною економією енергії завдяки місцевому виробництву.

Часові ряди теплового попиту та сонячної генерації можуть бути використані для оцінки потенційної економії енергії від локальних сонячних установок. Цей функціонал може допомогти у створенні детальних теплових карт попиту на опалення в місті з урахуванням або без врахування локальної генерації сонячної енергії. Будівельно-орієнтовані результати перевершують точністю більшість загальнодоступних наборів даних, які зазвичай обмежуються простими растровими картами з роздільною здатністю «50×50 м» або «100×100 м» [67]. У поєднанні з фактичними даними про розміщення теплових мереж, ця інформація може використовуватись для оцінки потенційних сценаріїв розширення мереж як з погляду загального просторового розподілу попиту на тепло, так і з урахуванням характерних профілів споживання залежно від реального використання будівель.

### **3.4 Вплив процесів теплогенерації на якість повітря**

Окрім уявлень про енергетичну поведінку будівель та їхнє оптимізоване тепlopостачання, однією з ключових переваг «The World Avatar» є можливість отримання міждисциплінарних інсайтів: моделювання розсіювання викидів запускається автоматично після кожної оптимізації теплогенерації, щоб миттєво оцінити можливі наслідки обраної стратегії тепlopостачання — з



урахуванням декількох джерел – для рівня впливу повітряних викидів на різні частини населення навколишніх територій. Ця демонстрація концепції насамперед зосереджена на зв'язку між динамічною оптимізацією витрат та геопросторовими наслідками викидів, тоді як детальний аналіз потенційних наслідків для здоров'я поки що залишається поза межами розгляду.

Інстанційовані карти розсіювання можна накладати на дані про будівлі або щільність населення, щоб дослідити різні аспекти та потенційні наслідки викидів, пов'язаних із теплогенерацією. На рисунку 3.5 продемонстровано значення викидів  $\text{NO}_x$  показано у поєднанні з інстанційованим фондом будівель, де кольори вказують на тип використання будівель, а синій колір представляє переважно житлову забудову.

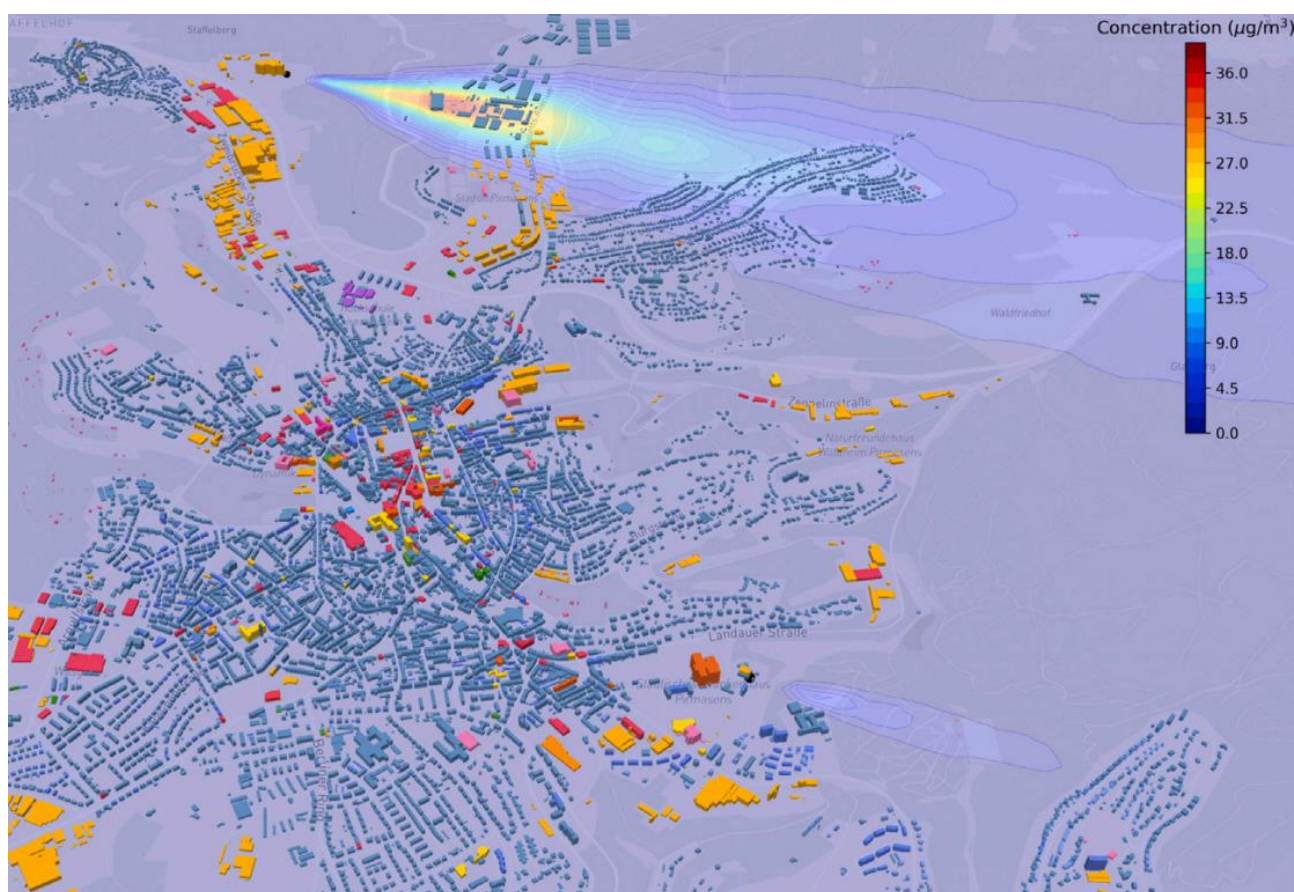


Рисунок 3.5 – Інтегроване моделювання розсіювання викидів [53]

Щоб відповідати реальним умовам експлуатації, динамічна оптимізація виконується з годинною дискретизацією. Відповідно, моделювання

розсіювання викидів також виконується для кожної оптимізованої години, що дає один інстанційований растр розсіювання на кожен тип забрудника та задану висоту. Як типовий гаусівський модельний інструмент, AERMOD підтримує різні типи викидів; однак у цьому дослідженні основна увага приділяється  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{PM}_{10}$  як основним забрудникам, при цьому  $\text{NO}_x$  зазвичай демонструє найвищі відносні концентрації [53]. Хоча моделювання може враховувати різні висоти щодо підстильної поверхні, головна увага зосереджена на рівні землі – тобто 0 м, що має найбільше значення для пішоходів та широкого загалу.

Рисунок 3.6 демонструє вплив додаткового забруднення повітря на населення міста для двох різних стратегій теплопостачання, шляхом накладання візуалізації розсіювання на растрову карту щільності населення. Не зважаючи на схожі погодні умови, окремі географічні зони зазнають суттєво різного рівня впливу.

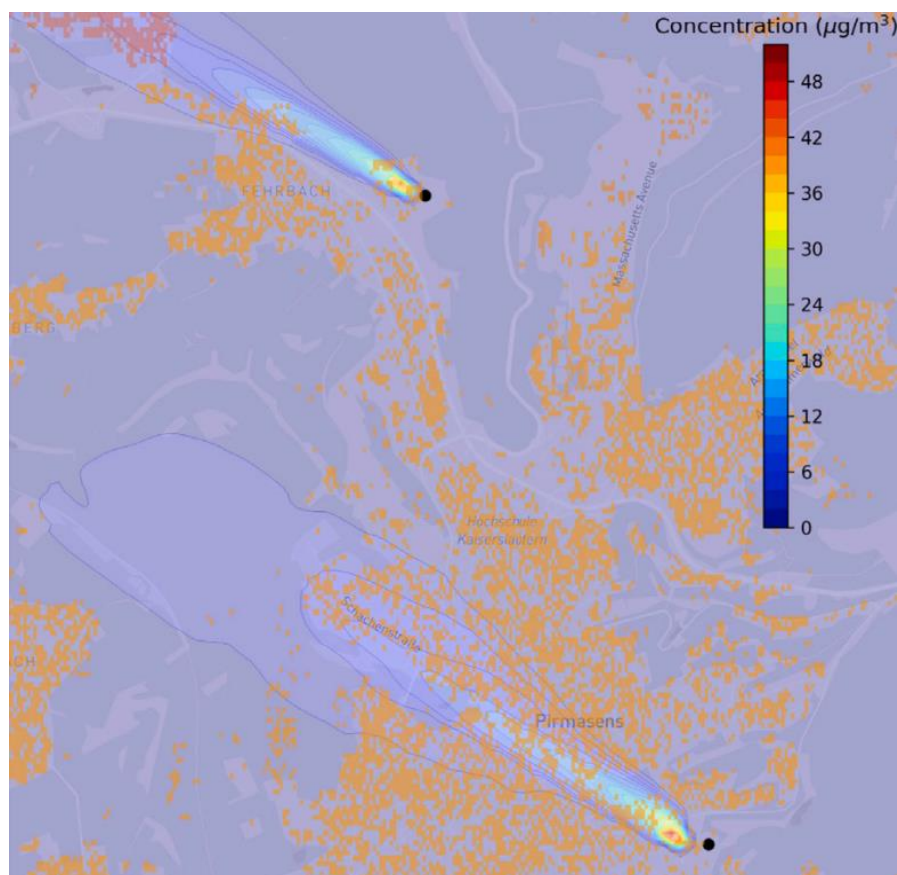


Рисунок 3.6 – Вплив викидів [53]

Інтегроване моделювання повітряних забруднень, спричинених теплогенерацією, дає змогу отримати уявлення про екологічні наслідки різних стратегій виробництва/постачання тепла з урахуванням фактичних (історичних) метеоданих. На рисунку проілюстровано історичний сценарій впродовж двох послідовних годин, коли запуск газової турбіни когенераційної установки було визнано економічно доцільним згідно з результатами оптимізації.

Через різне географічне розташування джерел тепла, обрана стратегія постачання створює різні сценарії впливу на навколишнє середовище з урахуванням метеоумов (зокрема вітру). У поданому сценарії декілька житлових будинків зазнають впливу відносно високих концентрацій  $\text{NO}_x$ , тоді як у другому ці зони зміщуються до районів, де відсутня житлова забудова.

Інтегроване моделювання розсіювання забруднень надає уявлення про рівень впливу додаткових повітряних забруднювачів на певні частини населення внаслідок виробництва тепла. Показано на прикладі змодельованих результатів оптимізації, накладених на растрову карту щільності населення.

У стратегії на рисунку 3.6 рівномірніше розподіляє джерела тепла між двома доступними об'єктами, що знижує загальний рівень концентрацій; проте шлейф викидів від муніципальної теплоелектростанції впливає на центральні райони з високою щільністю населення. У майбутньому цей компроміс планується враховувати в рамках багатокритеріальної оптимізації, яка поєднує теплову генерацію з потенційними наслідками для здоров'я населення.

Окрім візуалізації на карті, віртуальні сенсори можуть бути розміщені в довільних точках для дослідження рівня забруднення повітря з часом. Ці сенсори зчитують дані з підлеглих растрових файлів і відображають відповідні значення у вигляді часових рядів для кожного типу забруднювача в бічній панелі візуалізації, як показано на рисунку 3.7.

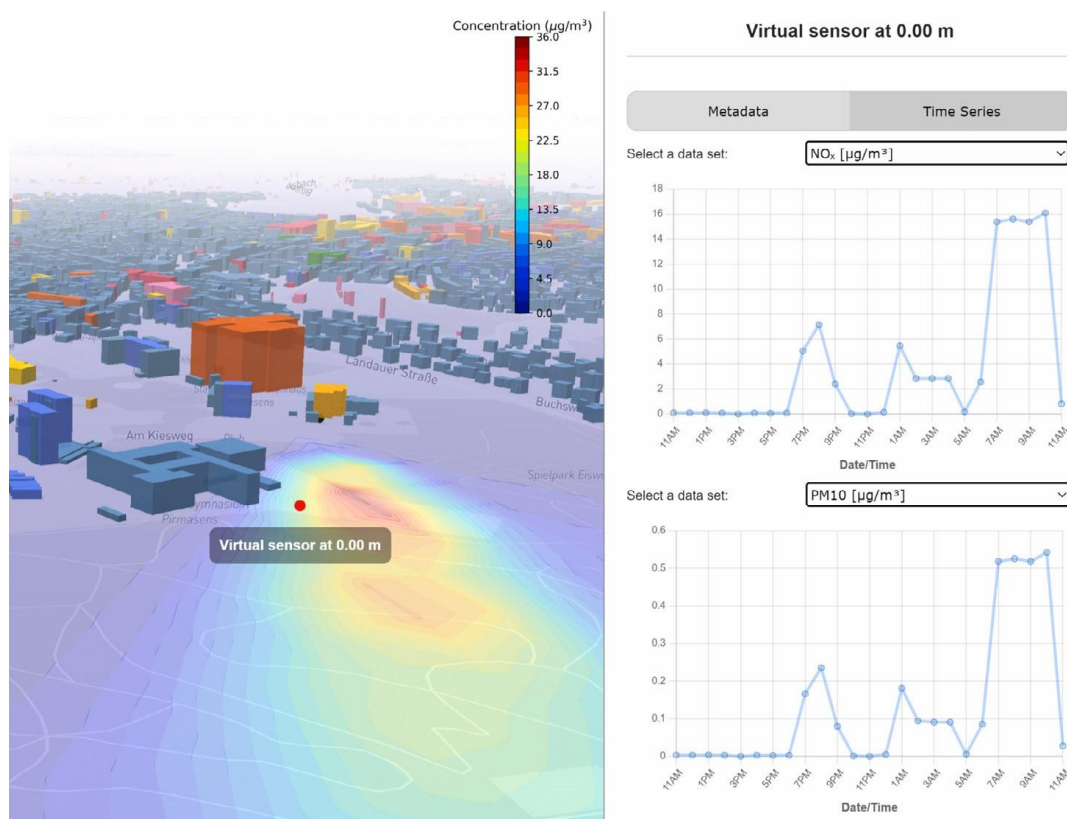


Рисунок 3.7 – Часові ряди викидів [53]

Віртуальні сенсори дають можливість перевіряти змодельовані концентрації викидів для будь-яких точок інтересу, а також часові масштаби.

Зображені профілі викидів для різних забруднювачів виглядають подібно через використання гаусового моделювання розсіювання. Результати не можна було явно верифікувати на основі фактичних місцевих даних про якість повітря через відсутність історичних даних, тобто вимірів сенсорів, у досліджуваній зоні. Однак, враховуючи численні попередні дослідження калібрування AERMOD [53], отримані значення принаймні мають орієнтовне значення. Крім того, змодельовані значення добре узгоджуються з відповідними межами викидів, а також з опублікованими погодинними та середньодобовими показниками, наданими оператором сміттєспалювального заводу [68]. Хоча поточна модель розсіювання є навмисно спрощеною для цього доказу концепції, робочий процес легко дає змогу включати складніші моделі в майбутніх версіях без значних модифікацій.

### **3.5 Висновок до третього розділу**

В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано комплексний енергетичний огляд процесів «розумного» тепlopостачання. Описано ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом. Проаналізовано енергоспоживання міста та планування сценаріїв. Досліджено вплив процесів теплогенерації на якість повітря «розумного міста».

## РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### **4.1 Державна система моніторингу довкілля, як складова частина національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн**

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» присвячена процесам керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань. Отже, доцільно розглянути державну систему моніторингу довкілля як ключовий елемент національної інформаційної інфраструктури, що має бути сумісною з аналогічними міжнародними системами. Ефективне управління міськими ресурсами та поліпшення екологічної ситуації в «розумних містах» неможливі без належної інтеграції даних про стан навколишнього середовища. З огляду на важливість екологічної складової для розвитку сучасних міських територій, необхідно створити систему [69], яка забезпечить своєчасний доступ до актуальної екологічної інформації, дає змогу виявляти та оперативно реагувати на екологічні загрози, а також ефективно управляти природними ресурсами.

Державна система моніторингу довкілля є важливим елементом національної інформаційної інфраструктури, що забезпечує постійний контроль за станом навколишнього середовища та оперативне інформування громадськості, державних органів і наукових установ про екологічні зміни. Ця система збирає, обробляє та зберігає дані щодо стану атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтів, біорізноманіття, а також фізичних і хімічних параметрів довкілля. Це дає можливість формувати комплексну картину екологічної ситуації в країні. Державна система моніторингу повинна забезпечувати високу точність даних, оперативність у реагуванні на екологічні зміни, а також бути інтегрованою в загальнодержавну та міжнародну інфраструктуру обміну даними для ефективного глобального моніторингу екологічних змін.



У рамках національної інформаційної інфраструктури моніторинг довкілля реалізується через складну архітектуру, що охоплює різноманітні давачі, станції моніторингу, супутникові та авіаційні спостереження, а також телекомунікаційні мережі для передачі даних. Зібрана інформація надходить до централізованих баз даних, де її обробляють та аналізують. Важливо створити механізми, які дають змогу оперативно отримувати зведену інформацію для державних органів, науковців та громадян, забезпечуючи своєчасне реагування на надзвичайні екологічні ситуації. Система також має прогнозувати стан довкілля на основі поточних даних та можливих сценаріїв зміни клімату, що сприятиме розробці ефективних заходів для збереження екологічної рівноваги.

Інтеграція державних систем моніторингу довкілля з міжнародними платформами та базами даних є необхідною умовою для обміну екологічною інформацією на глобальному рівні [70]. Це дає змогу забезпечити узгодженість та стандартизацію збору, зберігання та передачі екологічних даних, що є критично важливим для прозорості та ефективності моніторингових процесів. Завдяки розвитку технологій обміну даними та досягненням у сфері взаємодії систем, різні країни мають можливість створювати спільні платформи для моніторингу, інтегруючи та обмінюючись інформацією про стан навколишнього середовища.

Можливість здійснювати моніторинг у реальному часі є надзвичайно важливою для швидкого реагування на екологічні загрози. Наприклад, завдяки інтеграції національних систем моніторингу з міжнародними платформами, ми можемо отримувати актуальні дані про зміни кліматичних умов, рівень забруднення води та повітря, а також стан природних ресурсів у різних куточках світу. Ці дані можна використовувати не лише для аналізу поточної екологічної ситуації, а й для прогнозування можливих наслідків та розробки ефективних механізмів адаптації до змін.

Завдяки такій інтеграції різні країни та міжнародні організації можуть спільно реагувати на глобальні екологічні загрози: зміну клімату, забруднення атмосфери, деградацію ґрунтів і втрату біорізноманіття. Спільне використання

даних дає можливість краще оцінити масштаб та вплив цих проблем на різні регіони світу, що сприяє точнішому визначенню пріоритетів для подальших дій. Крім того, це дає можливість створювати глобальні стратегії, спрямовані на пом'якшення наслідків екологічних проблем та забезпечення сталого розвитку на планетарному рівні.

Міжнародне співробітництво у сфері екологічного моніторингу також має важливе значення для підвищення ефективності впровадження заходів, спрямованих на збереження природних ресурсів та захист навколишнього середовища. Наприклад, за допомогою глобальних баз даних можна створити єдину інформаційну платформу, яка дасть змогу відстежувати виконання міжнародних угод та зобов'язань, що стосуються охорони довкілля. Це не лише підвищує рівень прозорості в міжнародних відносинах, але й дає можливість точніше вимірювати прогрес у досягненні сталого розвитку.

Забезпечення сумісності національних систем моніторингу довкілля з міжнародними системами, такими як Європейська система моніторингу довкілля чи система ООН з моніторингу клімату та екологічних змін, є важливим елементом глобальної екологічної безпеки. Системи, що підтримують відкриті стандарти обміну даними, дають змогу інтегрувати національні платформи з глобальними екологічними ініціативами, сприяючи створенню єдиного інформаційного простору для моніторингу довкілля. Ці платформи повинні враховувати специфіку кожної країни, зокрема, її географічні та кліматичні умови, щоб створювати персоналізовані моделі для прогнозування екологічних змін.

Важливим аспектом є також застосування сучасних технологій для обробки та аналізу значних обсягів інформації. Завдяки хмарним технологіям, штучному інтелекту та алгоритмам машинного навчання можна створювати автоматизовані системи прогнозування екологічних змін. Ці системи працюють на основі величезних масивів даних, що збираються в реальному часі. Такі рішення можуть не лише передбачати розвиток екологічних загроз, а й пропонувати оптимальні методи їх нейтралізації, що значно підвищує



ефективність екологічної політики як на національному, так і на міжнародному рівнях.

Таким чином, система моніторингу довкілля є ключовим компонентом національної інформаційної інфраструктури. Вона забезпечує швидке реагування на екологічні зміни та сприяє міжнародній співпраці у боротьбі з глобальними екологічними викликами. Інтеграція цих систем у концепцію «розумних міст» дає можливість здійснювати моніторинг на більш локальному рівні, оперативно реагувати на зміни у навколишньому середовищі, а також сприяти збереженню екологічної рівноваги у світовому масштабі.

Державна система моніторингу довкілля, інтегрована в національну інформаційну інфраструктуру та сумісна з міжнародними аналогами, відіграє ключову роль у керуванні мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань. Функціонування таких мереж є надзвичайно чутливим до зовнішніх факторів, зокрема кліматичних умов, температури повітря, опадів, швидкості вітру та інших екологічних параметрів. Дані, що надходять у реальному часі від системи моніторингу довкілля, дають можливість динамічному графу знань формувати точніші прогнози щодо потреби в теплі, оптимізувати режим роботи котелень та розподіл теплоносія. Наприклад, завчасне попередження про різке зниження температури або сильні вітри дає змогу системі автоматично коригувати параметри теплопостачання, запобігаючи перевантаженням або недостатньому обігріву, а також мінімізуючи споживання ресурсів.

Більш того, міжнародна сумісність цієї системи моніторингу довкілля відкриває доступ до ширшого спектра екологічних даних та моделей, що може бути використано для уточнення та вдосконалення динамічного графа знань у керуванні тепломережами. Аналіз глобальних кліматичних тенденцій, а також даних про екологічні аномалії, отриманих від міжнародних партнерів, дає можливість системі передбачати довгострокові зміни та адаптувати стратегії теплопостачання до нових умов.

## 4.2 Умови праці працівників ІТ-галузі

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню процесів керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань. Розробка інноваційних інтелектуальних методів керування для різнотипових «розумних» застосунків та систем не можлива без сучасних інформаційних та комунікаційних технологій. Хоча інформаційні технології вже давно стали невіддільною частиною нашого повсякденного життя, а провідні світові компанії встановили стандарти роботи з ними, в Україні цей процес ще триває.

Праця в ІТ-галузі, попри її привабливість, може негативно впливати на здоров'я, якщо не дотримуватися правил безпеки. Невпинна концентрація на робочих завданнях, розмиті межі між професійним та особистим часом, а також значне інтелектуальне навантаження можуть призвести до перевтоми та виснаження організму.

На відміну від необмежених можливостей комп'ютерів, людський мозок має свої обмеження (див. таблицю 6.1). Він не може безкінечно обробляти інформацію, не втрачаючи ефективності. Продуктивність нашого мозку залежить від багатьох чинників, таких як якість сну, харчування та загальний стан здоров'я [71]. Для підтримання працездатності людському організму потрібні певні умови, а саме:

- Температурний режим: людський організм не може довго перебувати в умовах сильної спеки чи холоду, тому потрібна відповідна температура.
- Достатня кількість кисню: для нормального функціонування мозку та інших органів організму необхідно отримувати достатньо кисню.
- Харчування: їжа забезпечує організм енергією, необхідними вітамінами та мінералами.
- Відпочинок: під час відпочинку організм відновлює сили та ресурси, тому потрібен достатній сон.

– Відсутність шкідливих впливів: шкідливі фактори, зокрема, куріння, алкоголь, забруднене повітря, можуть пошкодити організм і спричинити його передчасне старіння [72].

Таблиця 6.1 – Порівняльна характеристика ПЕОМ та людини

| Характеристики ПЕОМ                                                                                                                                                                                                                                                                           | Властивості людини                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сьогоднішні комп'ютери пропонують користувачам розширені можливості для персоналізації та адаптації програмного забезпечення. Це дає змогу автоматизувати рутинні операції, вибирати найкращі параметри для обчислень і навіть регулювати точність результатів відповідно до поточних потреб. | Людський мозок, хоч і є надзвичайно складним, все ж має обмежені обчислювальні можливості. Ми не можемо виконувати складні розрахунки так швидко й точно, як це роблять сучасні комп'ютери. До того ж, у процесі тривалих обчислень ми схильні робити помилки, що знижує достовірність кінцевих результатів. |
| Штучний інтелект показує дивовижну гнучкість, пристосовуючись до невідомих ситуацій та засвоюючи інформацію навіть із невеликого обсягу даних. Водночас його ключові властивості залишаються незмінними.                                                                                      | Наша здатність розв'язувати складні логічні задачі визначається низкою факторів, зокрема набутим досвідом, віком та рівнем освіти. Хоча постійні тренування підтримують розумову активність та гостроту мислення, ці здібності можуть поступово зменшуватися з віком.                                        |
| Коли людина втрачає інтерес до своєї роботи, вона стає байдужою до її результатів і перестає прагнути до якісного виконання.                                                                                                                                                                  | Особи, які прагнуть досконалості у своїй діяльності, зазвичай глибоко залучені в робочий процес. Ця залученість робить їх сприйнятливішими до зовнішніх факторів та змін у середовищі. Щоб підтримувати високий рівень мотивації та продуктивності, їм потрібні регулярні зміни в умовах праці.              |

В таблиці 6.2 подано порівняльні дані окремих характеристик людини та ПЕОМ [72].

Таблиця 6.2 – Порівняльні дані окремих характеристик людини та ПЕОМ

| Показники                                    | Характеристика |                 |
|----------------------------------------------|----------------|-----------------|
|                                              | Людина         | ПЕОМ            |
| Імовірність помилкових дій, відносні одиниці | 10-2           | 10-6            |
| Час виконання операцій                       | 0,4            | 10-2-10-3       |
| Час звернення до пам'яті                     | 10-2-102       | 10-8-10-2       |
| Час оперативної пам'яті                      | 3 секунди      | Тисячі<br>годин |

Традиційні робочі місця з комп'ютерами поступово стають надбанням минулого. Сучасні офіси все більше трансформуються в комфортні простори, що поєднують зони для праці та відпочинку. Лаунж-зони та кімнати відпочинку стали невід'ємною частиною цієї тенденції, оскільки вони сприяють створенню приємнішої та продуктивної атмосфери.

Сучасні компанії прагнуть створювати нестандартні робочі простори, які не лише забезпечують комфорт, а й стимулюють креативність та продуктивність. Яскравими прикладами є офіси Google у Цюриху з їхнім унікальним дизайном у вигляді вуликів, або офіс Bahnhof, розташований у колишньому бомбосховищі. Такі неординарні рішення перетворюють офіс на місце, де співробітники почувуються затишно та натхненно.

Все більше компаній усвідомлюють важливість здоров'я та добробуту своїх працівників. Тому багато офісів сьогодні оснащені спортивними залами, басейнами та ігровими кімнатами. Це дає можливість співробітникам відпочити, розслабитися та підтримувати фізичну форму безпосередньо на робочому місці.

Сучасні працівники все більше цінують комфорт та різноманітність у робочому середовищі. Можливість зайнятися спортом або просто відпочити в

офісі допомагає задовольнити ці потреби та підвищити рівень задоволеності роботою. У результаті компанії, які надають такі можливості, можуть розраховувати на більш лояльних та продуктивних співробітників [73].

Сидяча робота програмістів часто викликає відчуття втоми наприкінці дня. Однак це не завжди свідчить про повне виснаження організму. Регулярні фізичні навантаження допомагають подолати цю втому, покращують кровообіг та додають сил. Тому багато ІТ-спеціалістів обирають активний відпочинок як спосіб компенсувати малорухливий спосіб життя.

Робота програміста, хоч і відбувається переважно за комп'ютером, пов'язана з впливом багатьох несприятливих факторів. Це можуть бути як фізичні чинники, такі як шум, недостатнє освітлення, протяги, так і фактори, пов'язані з роботою комп'ютерної техніки, наприклад, електромагнітне випромінювання та візуальне навантаження.

Умови праці працівників ІТ-галузі мають безпосередній вплив на ефективність керування мережами теплопостачання на основі динамічного графа знань. Адже розробка, впровадження, підтримка та безперебійне функціонування таких складних систем залежать від кваліфікації та добробуту ІТ-спеціалістів. Неналежні умови праці, такі як надмірні робочі години, постійний стрес, незбалансоване навантаження або відсутність комфортного робочого середовища, можуть призвести до професійного вигорання, зниження концентрації уваги та зростання кількості помилок.

#### **4.3 Висновок до четвертого розділу**

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи описано державну систему моніторингу довкілля, як складова частина національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн. Розглянуто умови праці працівників ІТ-галузі.

## ВИСНОВКИ

Запропонований у кваліфікаційній роботі підхід поєднує динамічний граф знань та спеціалізованих програмних агентів, створює єдине інтероперабельне середовище для ефективного та екологічно свідомого керування складними системами теплопостачання «розумного» міста.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Подано аналіз предметної області «розумного» теплопостачання.
- Описано моделювання теплоенергосистем «розумних міст».
- Досліджено засоби моделювання тепло та енергоспоживання «розумного міста».

- Проаналізовано онтології в галузі «розумного» теплопостачання.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Проаналізовано розроблені онтології мереж та систем теплопостачання.

- Досліджено агенти для оптимізації процесів виробництва тепла.
- Подано опис зв'язаних агентів для міждисциплінарної інтероперабельності.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Подано комплексний енергетичний огляд процесів «розумного» теплопостачання.

- Описано ресурсоефективне забезпечення «розумним» теплом.
- Проаналізовано енергоспоживання міста та планування сценаріїв.
- Досліджено вплив процесів теплогенерації на якість повітря «розумного міста».

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано державну систему моніторингу довкілля, як складова частина національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн. Розглянуто умови праці працівників ІТ-галузі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Inderwildi O, Zhang C, Wang X, Kraft M. The impact of intelligent cyberphysical systems on the decarbonization of energy. *Energy Environ Sci* 2020;13(3):744–71. <http://dx.doi.org/10.1039/c9ee01919g>.
- 2 Fodstad M, Crespo del Granado P, Hellemo L, Knudsen BR, Pisciella P, Silvest A, Bordin C, Schmidt S, Straus J. Next frontiers in energy system modelling: A review on challenges and the state of the art. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;160:112246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112246>.
- 3 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.
- 4 Pfenninger S, Hawkes A, Keirstead J. Energy systems modeling for twentyfirst century energy challenges. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;33:74–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>.
- 5 Palka, O., Dmytrotsa, L., Duda, O., Kunanets, N., & Pasichnyk, V. (2024). Information and technological tools for analysis and visualization of open data in smart cities. *CEUR Workshop Proceedings*, 3742, 1–12.
- 6 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.
- 7 Орлов М. В., Дуда О. М., Жовнір Ю. І., Грибовський О.М. Інструменти методології DevOps в інформаційних системах на основі технологій ІоТ. *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>.
- 8 Lim MQ, Wang X, Inderwildi O, Kraft M. The world avatar – A world model for facilitating interoperability. In: Inderwildi O, Kraft M, editors. *Intelligent decarbonisation: can artificial intelligence and cyber-physical systems help achieve*

climate mitigation targets? Cham: Springer International Publishing; 2022, p. 39–53. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-86215-2\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-86215-2_4).

9 Орлов М.В., Грибовський О.М., Жовнір Ю.І., Дуда О.М., Від концепції до реальності: роль методології devops в екосистемах іот. 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>.

10 Tzachor A, Sabri S, Richards CE, Rajabifard A, Acuto M. Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals. *Nat Sustain* 2022;5(10):822–9. <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-022-00923-7>.

11 Wu N, Zhang F, Wang J, Wang X, Wu J, Huang J, Tan J, Jing R, Lin J, Xie S, Zhao Y. A review on modelling methods, tools and service of integrated energy systems in China. *Prog Energy* 2023;5(3):032003. <http://dx.doi.org/10.1088/2516-1083/acef9e>.

12 Quek HY, Sielker F, Akroyd J, Bhavé AN, von Richthofen A, Herthogs P, Yamu CvdL, Wan L, Nocht T, Burgess G, Lim MQ, Mosbach S, Kraft M. The conundrum in smart city governance: Interoperability and compatibility in an ever-growing ecosystem of digital twins. *Data Policy* 2023;5:e6. <http://dx.doi.org/10.1017/dap.2023.1>.

13 Eibeck A, Lim MQ, Kraft M. J-Park simulator: An ontology-based platform for cross-domain scenarios in process industry. *Comput Chem Eng* 2019;131:106586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106586>.

14 Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ, et al. The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data* 2016;3(1):160018. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

15 Akroyd J, Mosbach S, Bhavé A, Kraft M. Universal digital twin - A dynamic knowledge graph. *Data-Cent Eng* 2021;2:e14. <http://dx.doi.org/10.1017/dce.2021.10>.



16 ur Rehman U, Faria P, Gomes L, Vale Z. Future of energy management systems in smart cities: A systematic literature review. *Sustainable Cities Soc* 2023;96:104720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2023.104720>.

17 Pfenninger S, Hirth L, Schlecht I, Schmid E, Wiese F, Brown T, Davis C, Gidden M, Heinrichs H, Heuberger C, Hilpert S, Krien U, Matke C, Nebel A, Morrison R, Müller B, Pleß mann G, Reeg M, Richstein JC, Shivakumar A, Staffell I, Tröndle T, Wingenbach C. Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned. *Energy Strategy Rev* 2018;19:63–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.002>.

18 Rana B, Singh Y, Singh PK. A systematic survey on internet of things: Energy efficiency and interoperability perspective. *Trans Emerg Telecommun Technol* 2021.

19 Reif V, Strasser TI, Jimeno J, Farre M, Genest O, Gyrard A, McGranaghan M, Lipari G, Schütz J, Uslar M, Vogel S, Bytyqi A, Dornmair R, Corusa A, Roy G, Ponci F, Dognini A, Monti A. Towards an interoperability roadmap for the energy transition. *E I Elektrotech Informtech* 2023;140(5):478–87. <http://dx.doi.org/10.1007/s00502-023-01144-2>.

20 O'Dwyer E, Pan I, Charlesworth R, Butler S, Shah N. Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities Soc* 2020;62:102412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2020.102412>.

21 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.

22 Savage T, Akroyd J, Mosbach S, Hillman M, Sielker F, Kraft M. Universal digital twin – the impact of heat pumps on social inequality. *Adv Appl Energy* 2022;5:100079. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100079>.

23 Rihm SD, Kovalev MK, Lapkin AA, Ager JW, Kraft M. On the role of C4 and C5 products in electrochemical CO<sub>2</sub> reduction via copper-based catalysts. *Energy Environ Sci* 2023;16(4):1697–710. <http://dx.doi.org/10.1039/d2ee03752a>.

24 Atherton J, Akroyd J, Farazi F, Mosbach S, Lim MQ, Kraft M. British wind farm ESS attachments: curtailment reduction vs. price arbitrage. *Energy Environ Sci* 2023;16(9):4020–40. <http://dx.doi.org/10.1039/d3ee01355c>.

25 Hofmeister M, Brownbridge G, Hillman M, Mosbach S, Akroyd J, Lee KF, Kraft M. Cross-domain flood risk assessment for smart cities using dynamic knowledge graphs. *Sustainable Cities Soc* 2023;105113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2023.105113>.

26 Digital Twin Hub. Climate resilience demonstrator. 2022, Available at <https://digitaltwinhub.co.uk/credo/credo/>.

27 Berjawi A, Walker S, Patsios C, Hosseini S. An evaluation framework for future integrated energy systems: A whole energy systems approach. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;145:111163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111163>.

28 Wu J, Yan J, Jia H, Hatziaargyriou N, Djilali N, Sun H. Integrated energy systems. *Appl Energy* 2016;167:155–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.075>.

29 Farhan M, Reza TN, Badal FR, Islam MR, Muyeen SM, Tasneem Z, Hasan MM, Ali MF, Ahamed MH, Abhi S, Islam MM, Sarker SK, Das SK, Das P. Towards next generation internet of energy system: Framework and trends. *Energy AI* 2023;14:100306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100306>.

30 Manfren M, James PA, Aragon V, Tronchin L. Lean and interpretable digital twins for building energy monitoring – A case study with smart thermostatic radiator valves and gas absorption heat pumps. *Energy AI* 2023;14:100304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100304>.

31 Sifat MMH, Choudhury SM, Das SK, Ahamed MH, Muyeen S, Hasan MM, Ali MF, Tasneem Z, Islam MM, Islam MR, Badal MFR, Abhi SH, Sarker SK, Das P. Towards electric digital twin grid: Technology and framework review. *Energy AI* 2023;11:100213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100213>.

32 Digital4Grids for the European Commission. Landscape report on energy and flexibility data models and interoperability across the sectors of energy, mobility and buildings. 2023, Available at <https://digital->

strategy.ec.europa.eu/en/library/landscape-report-energy-and-flexibility-datamodels-and-interoperability-across-sectors-energy.

33 int:net consortium. The interoperability network for the energy transition (int:net). 2022, Available at <https://intnet.eu/>.

34 Fonseca JA, Thuy-An N, Schlueter A, Marechal F. City energy analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy Build* 2016;113:202–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>.

35 Happle G, Shi Z, Hsieh S, Ong B, Fonseca JA, Schlueter A. Identifying carbon emission reduction potentials of BIPV in high-density cities in southeast Asia. *J Phys Conf Ser* 2019;1343(1):012077. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012077>.

36 OpenStreetMap contributors. Planet OSM dump. 2017, Available at <https://planet.osm.org>.

37 Khan S, Hassan Q. Review of developments in air quality modelling and air quality dispersion models. *J Environ Eng Sci* 2020;16(1):1–10. <http://dx.doi.org/10.1680/jenes.20.00004>.

38 El-Harbawi M. Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environ Rev* 2013;21(3):149–79. <http://dx.doi.org/10.1139/er-20120056>.

39 Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, Lee RF, Peters WD, Brode RW. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization. *J Appl Meteorol* 2005;44(5):682–93. <http://dx.doi.org/10.1175/jam2227.1>.

40 Carruthers DJ, Seaton MD, McHugh CA, Sheng X, Solazzo E, Vanvyve E. Comparison of the complex terrain algorithms incorporated into two commonly used local-scale air pollution dispersion models (ADMS and AERMOD) using a hybrid model. *J Air Waste Manage Assoc* 2011;61(11):1227–35. <http://dx.doi.org/10.1080/10473289.2011.609750>.

41 Petersen RL, Guerra SA, Bova AS. Critical review of the building downwash algorithms in AERMOD. *J Air Waste Manage Assoc* 2017;67(8):826–35. <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2017.1279088>.

42 Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic web. *Sci Am* 2001;284(5):28–37.

43 Klyne G, Carroll JJ. Resource description framework (RDF): Concepts and abstract syntax. W3C recommendation 10 february 2004. 2004, Available at <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-concepts-20040210/>. World Wide Web Consortium (W3C).

44 Bizer C, Heath T, Berners-Lee T. Linked data: The story so far. In: Sheth A, editor. *Semantic services, interoperability and web applications: emerging concepts*. IGI Global; 2011, p. 205–27. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-60960-593-3.ch008>.

45 Blazegraph. 2020, Available at <https://blazegraph.com>.

46 Aranda CB, Corby O, Das S, Feigenbaum L, Gearon P, Glimm B, Harris S, Hawke S, Herman I, Humfrey N, Michaelis N, Ogbuji C, Perry M, Passant A, Polleres A, Prud'hommeaux E, Seaborne A, Williams GT. SPARQL 1.1 overview, W3C recommendation 21 march 2013. 2013, Available at <https://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>. World Wide Web Consortium (W3C).

47 Zhou X, Eibeck A, Lim MQ, Krdzavac N, Kraft M. An agent composition framework for the J-Park simulator – a knowledge graph for the process industry. *Comput Chem Eng* 2019;130:106577. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106577>.

48 Bai J, Lee KF, Hofmeister M, Mosbach S, Akroyd J, Kraft M. A derived information framework for a dynamic knowledge graph and its application to smart cities. *Future Gener Comput Syst* 2024;152:112–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2023.10.008>.

49 Cox S, Little C, Hobbs JR, Pan F. Time ontology in OWL. 2020, Available at <https://www.w3.org/TR/owl-time/>.

50 Xu X, Cai H. Domain ontology for utility infrastructure: Coupling the semantics of CityGML utility network ADE and domain glossaries. *J Comput Civ Eng* 2021;35(5):04021011. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000977](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000977).

51 Li Y, Rezgui Y, Kubicki S. An intelligent semantic system for real-time demand response management of a thermal grid. *Sustainable Cities Soc* 2020;52:101857. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101857>.

52 OGC. OGC GeoSPARQL - A geographic query language for RDF data. 2012, Available at <https://www.ogc.org/standards/geosparql/>.

53 Hofmeister, Markus, et al. "Dynamic control of district heating networks with integrated emission modelling: A dynamic knowledge graph approach." *Energy and AI* 17 (2024): 100376.

54 Data & Knowledge Group. Hermit OWL reasoner. 2019, Available at <http://www.hermit-reasoner.com/>.

55 Hofmeister M, Bai J, Brownbridge G, Mosbach S, Lee KF, Farazi F, Hillman M, Agarwal M, Ganguly S, Akroyd J, Kraft M. Semantic agent framework for automated flood assessment using dynamic knowledge graphs. *Data-Centric Engineering* 2024;5:e14. <http://dx.doi.org/10.1017/dce.2024.11>.

56 ETSI. SAREF4EHAW: an extension of SAREF for ehealth ageing well domain. 2020, Available at <https://saref.etsi.org/saref4ehaw/v1.1.1/>.

57 Cuenca J, Larrinaga F, Curry E. DABGEO: A reusable and usable global energy ontology for the energy domain. *J Web Semant* 2020;61–62:100550. <http://dx.doi.org/10.1016/j.websem.2020.100550>.

58 Chadzynski A, Krdzavac N, Farazi F, Lim MQ, Li S, Grisiute A, Herthogs P, von Richthofen A, Cairns S, Kraft M. Semantic 3D city database – An enabler for a dynamic geospatial knowledge graph. *Energy AI* 2021;6:100106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100106>.

59 Herzen J, Lässig F, Piazzetta SG, Neuer T, Tafti L, Raille G, Pottelbergh TV, Pasięka M, Skrodzki A, Huguenin N, Dumonal M, Kościsz J, Bader D, Gusset F, Benheddi M, Williamson C, Kosinski M, Petrik M, Grosch G. Darts: User-friendly

modern machine learning for time series. *J Mach Learn Res* 2022;23(124):1–6, URL: <http://jmlr.org/papers/v23/21-1177.html>.

60 Taylor SJ, Letham B. Forecasting at scale. *Amer Statist* 2018;72(1):37–45. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>.

61 Lim B, Arik SÖ, Loeff N, Pfister T. Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *Int J Forecast* 2021;37(4):1748–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.03.012>.

62 Hofmeister M, Mosbach S, Hammacher J, Blum M, Röhrig G, Dörr C, Flegel V, Bhave A, Kraft M. Resource-optimised generation dispatch strategy for district heating systems using dynamic hierarchical optimisation. *Appl Energy* 2022;305:117877. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117877>.

63 European Environment Agency. AQ ereporting - annual statistics. 2023, Available at <https://eeadmz1-cws-wp-air02.azurewebsites.net/index.php/userscorner/statistical-viewer/>.

64 Oliveri Conti G, Heibati B, Kloog I, Fiore M, Ferrante M. A review of AirQ models and their applications for forecasting the air pollution health outcomes. *Environ Sci Pollut Res* 2017;24:6426–45. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-8180-1>.

65 Hamer PD, Walker S-E, Sousa-Santos G, Vogt M, Vo-Thanh D, Lopez-Aparicio S, Schneider P, Ramacher MOP, Karl M. The urban dispersion model EPISODE v10.0 – part 1: An Eulerian and sub-grid-scale air quality model and its application in Nordic winter conditions. *Geosci Model Dev* 2020;13(9):4323–53. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-13-4323-2020>.

66 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>.

67 Hotmaps project. Hotmaps. 2020, Available at <https://www.hotmaps.eu/map>.

68 EEW Energy from Waste Saarbrücken GmbH. Emissionen des müllheizkraftwerkes pirmsens. 2023, Available at [https://www.eew-energyfromwaste.com/fileadmin/content/infomaterial/emissionsdaten/pirmsens/2023-0322\\_veroeffentlichung\\_emissionen\\_mhkw\\_pir\\_2022.pdf](https://www.eew-energyfromwaste.com/fileadmin/content/infomaterial/emissionsdaten/pirmsens/2023-0322_veroeffentlichung_emissionen_mhkw_pir_2022.pdf).

69 Stepanova LS (2020) Environmental policy of Ukraine and international experience. Kyiv: Center for Economic Strategy.

70 Zhukovsky MP (2020) Modern trends in the utilization of municipal solid waste in cities. Journal "Scientific World", 12(4), pp 49–55.

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

72 Вовк, Андрій Іванович. Методика організації роботи розподіленої Agile команди у великих ІТ-проектах. MS thesis. 2020.

73 Сьогодні UA. <https://www.segodnya.ua/lifestyle/fun/pochti-kak-u-google-chemudivlyayut-ofisy-ukrainskih-it-kompaniy--764025.html>.