

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Підхід до генерації значень параметрів  
мікроклімату для моделей приміщень

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи СНЗс-42  
спеціальності 122 Комп'ютерні науки

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Ясіновська Н.І. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Гром'як Р.С. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Шимчук Г.В. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Боднарчук І.О. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Карпінський М.П. (прізвище та ініціали)

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» січня 2021 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

(шифр і назва спеціальності)

студенту Ясіновська Наталія Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підхід до генерації значень параметрів  
мікроклімату для моделей приміщень

Керівник роботи к.т.н., доц. Гром'як Р.С.

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

Затверджені наказом ректора від «23» березня 2022 року № 4/7-172

2. Термін подання студентом завершеної роботи 12 червня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Літературні джерела з тематики роботи

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

ВСТУП. РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ  
БУДИНКІВ. РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ ПОГОДНИХ УМОВ. РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ  
УМОВ ДЛЯ НАЙБЛИЖЧОГО МАЙБУТНЬОГО. РОЗДІЛ 4. ВРАХУВАННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ  
ПОГОДНИХ ЯВИЩ. 4.1 Моделювання екстремальних подій. 4.2 Екстремальні події в будівлях.  
РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ.ВИСНОВОК ПЕРЕЛІК  
ПОСИЛАНЬ

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

1.

11. Висновки

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О.Я., к.т.н., доц.		

7. Дата видачі завдання 25 січня 2022 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.01.22-27.01.22	<i>Виконано</i>
2.	Підбір джерел по темі роботи	28.01.22 – 01.04.22	<i>Виконано</i>
3.	Оформлення першого розділу	15.04.2022	<i>Виконано</i>
4.	Оформлення другого розділу	30.04.2022	<i>Виконано</i>
5.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	10.05.2022	<i>Виконано</i>
6.	Оформлення кваліфікаційної роботи	17.02.2022	<i>Виконано</i>
7.	Перевірка на плагіат	02.06.2022	<i>Виконано</i>
8.	Нормоконтроль	08.06.2022	<i>Виконано</i>
9.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	09.06.2022	<i>Виконано</i>
10.	Захист кваліфікаційної роботи	13.06.2022	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ясіновська Н.І.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Гром'як Р.С.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Підхід до генерації значень параметрів мікроклімату для моделей приміщень // Кваліфікаційна робота освітнього рівня "Бакалавр" // Ясіновська Наталія Ігорівна // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СНзс-42 // Тернопіль, 2022 // с. 68, рис. – 3, табл. – 2, кресл. – 10, додат. – 0, бібліогр. – 159.

Ключові слова: моделювання погоди, ряди даних, історичні дані, прогнозування, модель мікроклімату.

У даній роботі представлена перша комплексна оцінка методів створення моделей погодних умов як системи змінних для використання в моделюванні систем штучного клімату будівель. Ми проводимо аналіз різних методологій моделювання та їх основних проблем і обмежень. Виконано також обговорення нових викликів, таких як опрацювання невизначеностей, врахування острівців тепла у населених пунктах, зміна клімату та різні екстремальні кліматичні явища. На основі цього аналізу запропоновано моделі щодо наступного покоління файлів погоди для моделювання будівель. Введено перелік вимог до файлів погоди і порівняння найсучаснішого стану за допомогою картографування. Виявлено, що дві області, які найбільше потребують уваги, це створення файлів погоди для міського ландшафту та файлів, спеціально розроблених для перевірки будівель на відповідність критеріям захворюваності, смертності та збоїв систем обслуговування та підтримки будівель.

Практичне застосування розробки може бути ключем до проектування стійких, комфортних будівель. Ця робота надає комплексну оцінку технічних вимог до моделей погодних умов, щоб забезпечити хорошу роботу будівель як у поточних, так і в майбутніх кліматичних умовах.

## ABSTRACT

Approach to the generating of microclimate parameters for building models // Qualification work of the educational level "Bachelor" // Yasinovska Nataliya // Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Faculty of Computer Information Systems and Software Engineering, Department of Computer Science, Group CH3c-42 // Ternopil, 2022 // p. – 68, fig. – 3, references – 159, posters – 10, applications – 0.

Keywords: weather modeling, data series, historical data, forecasting, microclimate model.

This paper presents the first comprehensive assessment of methods for creating models of weather conditions as a system of variables for use in modeling artificial climate systems of buildings. We analyze various modeling methodologies and their main problems and restrictions. New challenges were also discussed, such as dealing with uncertainties, taking into account heat islands in human settlements, climate change and various extreme climatic events. Based on this analysis, models for the next generation of weather files for building modeling are offered. A list of requirements for weather files and a comparison of the latest status with the help of mapping is introduced. The two areas that need the most attention are identified: the creation of weather files for the urban landscape and files specifically designed to check buildings for compliance with the criteria of morbidity, mortality and failures of building maintenance and support systems.

The practical use of design can be the key to designing of sustainable, comfortable buildings. This work provides a comprehensive assessment of the technical requirements for weather models to ensure good performance of buildings in both modern and upcoming climates.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ БУДИНКІВ.....	9
1.1 Формат файлів погоди.....	9
1.2 Файли для типових погодних умов.....	10
1.3 Файли для екстремальних погодних умов .....	15
1.4 Обмеження використання даних спостережень для типових і екстремальних погодних файлів .....	18
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ ПОГОДНИХ УМОВ .....	21
2.1 Найбільш поширені генератори погоди .....	22
2.2 Обмеження погодних генераторів.....	26
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ НАЙБЛИЖЧОГО МАЙБУТНЬОГО .....	29
3.1 Кліматичні прогнози.....	30
3.2 Перетворення часових рядів погодних даних.....	33
3.3 Обмеження майбутньої погоди .....	35
РОЗДІЛ 4. ВРАХУВАННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПОГОДНИХ ЯВИЩ.....	39
4.1 Моделювання екстремальних подій .....	39
4.2 Екстремальні події в будівлях .....	40
РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ .....	43
5.1 Поняття та об'єкт аналізу технічної безпеки .....	43
5.2 Розрахунок захисного заземлення.....	45
ВИСНОВКИ.....	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	54

## ВСТУП

Ідея того, що будівля має забезпечувати умови надійності, зручності та задоволення для тих, хто в ній проживає, з'явилась більше двох тисяч років тому і це твердження залишається актуальним до сьогоднішнього дня. Модель будівлі включала розташування просторів і те, як вона забезпечує як захист від зовнішнього середовища, так і комфортні внутрішні умови для виконання повсякденних завдань. Більшість будівель відповідають основним вимогам як укриття, тому в основному для проєктувальників пріоритетною задачею є забезпечення комфорту.

Дослідженнями в області моделювання для задач розумних будинків займаються багато вчених, в тому числі і з нашого університету. Наприклад, в роботах [1, 2, 3] виконано огляд характеристик розумних будинків, оцінювання якості цих моделей у координації з іншими параметрами інфраструктури розумних міст.

Люди на сьогоднішній час в містах проводять 80-90% свого часу в будівлях [4, 5], і погані внутрішні умови не тільки вплинуть на комфорт, але й погіршують здоров'я та продуктивність мешканців. Оскільки місцева погода та клімат значною мірою впливають на конструкцію та експлуатаційні характеристики будівлі, якісні дані про погоду мають важливе значення для моделювання ефективності будівлі. У цьому контексті дані про погоду повинні дозволити проєктувальникам провести стрес-тест продуктивності будівлі для нетипових умов, таких як хвилі спеки або похолодання, оскільки такі умови з більшою ймовірністю призведуть до зниження продуктивності. Наприклад, європейська хвиля спеки 2003 року призвела до 70 000 смертей влітку, в першу чергу в результаті непристосованості будівельного середовища [6, 7]. Найближчим часом період повернення такої хвилі тепла, ймовірно, зміниться з 1 на 250 років до 1 на 50 або навіть 1 на 35 [8]. Оскільки типовий термін служби будівлі може становити близько 60 років або більше, дані про погоду повинні охоплювати майбутні зміни та бути локальними для будівлі.

Моделі параметрів (надалі – файли) про погоду в ідеалі повинні:

1. Містити зразки типових умов.

2. Містити зразки екстремальних умов.
3. Мати часову роздільну здатність, яку вимагають пакети моделювання (зазвичай 1 година або вище).
4. Мати географічну роздільну здатність, яка відповідає змінам погоди через місцевий рельєф.
5. Виразити вплив міського мікроклімату
6. Містити зразки можливого майбутнього клімату, в ідеалі з урахуванням наслідків зміни клімату.

На додаток до шести технічних характеристик вище, файли погоди також мають бути надійними. Це передбачає сьому функцію, необхідну для успіху будь-якого файлу погоди.

7. Перевірений досвід роботи в галузі.

У цій роботі ми підсумовуємо підходи та методології, які використовуються для створення файлів, які відповідають цим вимогам. Цей огляд є актуальним, оскільки уряди країн Європи планують витратити дуже велику кількість комп'ютерного часу на створення нового набору кліматичних прогнозів. На додачу в ряді нормативних документів, наприклад, у директиві про енергетичну ефективність будівель (EPBD, Велика Британія) [9] вимагає від фахівців з навколишнього середовища вжиття заходів, які адаптують політику планування та нові специфікації будівель, щоб гарантувати мінімальний рівень комфорту та безпеки з 2002 року [10]. Це особливо важливо при розгляді питань забезпечення адекватної вентиляції та, зокрема, обмеження перегріву [11], оскільки це пов'язано зі зниженням продуктивності працівників, захворюваністю та навіть смертністю у вразливих групах, таких як немовлята та люди похилого віку [12, 13]. Однак Міжнародне енергетичне агентство (IEA) сприяє реалізації політики енергозбереження будівель на національному рівні в своїх країнах-членах та на глобальному рівні.

У розділі 1 розглядаються найсучасніші методи створення даних про погоду для моделювання будівлі. Різні методології класифікуються відповідно до того, наскільки результативна погода відповідає переліку вимог із семи пунктів. Розділ 2



зосереджується на методології створення даних про погоду з синтетичних часових рядів з генератора погоди. У розділі 3 розглядається створення майбутніх даних про погоду для побудови моделювання як із синтетичних наборів даних, так і з трендів на історичних спостережень. Нарешті, в розділі 4 розглядаються проблеми, з якими стикаються інженери-будівельники, коли розглядають майбутні характеристики будівель та підвищують стійкість збудованого середовища до зміни клімату.

## РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ БУДИНКІВ

Будівельна промисловість в основному використовує дані про погоду для оцінки дизайну та ефективності збудованого середовища на етапі планування. Це стає все більш важливим, оскільки зміна клімату, ймовірно, призведе до збільшення частоти екстремальних погодних явищ [14].

Динамічне моделювання енергетичних характеристик будівель було розроблено ще в 1950-х роках [15], але лише під час енергетичної кризи 1970-х років наукове співтовариство почало використовувати їх для покращення енергетичних характеристик будівель [16]. У ранніх моделях дані про погоду застосовувалися до програмних пакетів у різних форматах, але були стандартизовані у «файли погоди» за допомогою третього покоління динамічних симуляторів будівель (відповідно до класифікації Кларка [17]). Зазвичай вони мають форму типових погодних років, створених на основі погодинних історичних спостережень у певному місці [18]. Однак необхідність адаптації будівель до наслідків імовірної зміни клімату в майбутньому спричинила потребу включати прогнози зміни клімату в ці файли погоди, шляхом перетворення погодних даних або їх синтетичного генерування [19, 20]. Файли погоди, що представляють «екстремальні» роки (тобто вибірка спостережуваних погодних явищ, далеких від норми), також були введені для аналізу реакції конструкції будівлі на суворі погодні умови [21].

### 1.1 Формат файлів погоди

Згідно з публікаціями Міжнародної асоціації моделювання ефективності будівель (IBPSA), найбільш часто використовуваним симулятором будівлі є EnergyPlus . Крім того, що цей продукт є окремою програмою, EnergyPlus також є основою для більш складного програмного забезпечення (наприклад, DesignBuilder), які здатні аналізувати не лише споживання енергії, а й використання води та денного освітлення.



споживання енергії будівл. та викидів вуглецю [22, 23]. Типовий файл погоди створюється на основі історичних даних (зазвичай даних за 20-30 років, залежно від доступності). Ці дані збираються шляхом порівняння кумулятивної та емпіричної функцій розподілу різних метеорологічних змінних у базовому наборі даних. Кількість та зважування різних метеорологічних змінних, які розглядаються, є ознакою типу файлу погоди (наприклад, TMY, TRY тощо – див. нижче). Таблиця 1.1 показує репрезентативний зразок типових файлів погоди, які використовуються в усьому світі. Варто зазначити, що незважаючи на наявність різних джерел або способів створення файлів погоди для формування різних типів файлів, деякі з них використовують загальні формати файлів, такі як формат EPW.

Таблиця 1.1 – Короткий список типів файлів погоди в різних країнах. Період залежить від доступності даних у місці розташування

Позначення	Повна назва	Регіон	Сайти	Період
RMU	Репрезентативний метеорологічний рік	Австралія	69 локацій	1967-04
CSWD	Китайські стандартні погодні дані	Китай	270 локацій	1982-97
ISHRAE	Типові для Індії роки з ISHRAE	Індія	62 локації	1991-05
IGDG	Італійський «Gianni De Giorgio»	Італія	68 локацій	1951-70
SWEC	Іспанська погода для розрахунків енергії	Іспанія	52 локації	1961-90
UK TRY	Довідковий рік тесту (CIBSE)	Великобританія	14 локацій	1984-13
TMY	Типовий метеорологічний рік	США та інші	1020 локацій	1991-05
WYEC	Рік погоди для розрахунків енергії	США/Канада	77 локацій	1953-01
IWEC	Міжнародна погода для розрахунків енергії	Світ	3012 локацій	1991-05

Існує два способи побудови типового погодного року. Перший – це визначення безперервного 12-місячного періоду як типового. Другий базується на застосуванні критерії рейтингу до окремих місяців із базового набору, які потім об'єднуються в зведений 12-місячний рік. Британські TRY і TMY використовують останній підхід і

обчислюються за допомогою статистики Фінкельштейна-Шафера (FS) [24]. Це означає, що кожен місяць у файлі може бути з іншого року. Порівняння цих складених років із базовим набором показує, що і TRY Великобританії [23], і TMY (з оновленими форматами файлів до TMY2 та TMY3) [25] мають переваги перед однорічним підходом.

Нижче наведено короткий огляд характеристик найбільш репрезентативних композиційних файлів року погоди (TRY, TMY та IWEC) та деяких їх розширень та оновлень.

Референтний рік випробувань (TRY) був розроблений у 1976 році для 60 локацій у Сполучених Штатах [26]. Базовим періодом був 1948-1975 рр. З цієї базової лінії роки з місячними екстремальними значеннями були відфільтровані, доки окремий рік не містив найменш суворі (або найбільш середні) погодні умови. Спочатку TRY містив температури сухого термометра, вологого термометра і точки роси, напрямок і швидкість вітру, барометричний тиск, відносну вологість, хмарний покрив і тип. Пізніше методологію TRY було модифіковано [27, 28], а її область застосування була розширена, щоб створити повний набір даних про погоду для кількох місць по всьому світу. Точна зміна TRY залежала від установи, яка створила файли. Відмінності включали зважування відповідних параметрів і навіть додаткове включення одного чи кількох параметрів. Одним із прикладів є датський еталонний рік проектування (D-DRY) [29], який включає конкретні параметри, такі як 5-хвилинні значення для прямого нормального випромінювання або прогнозу інформацію, яка буде використовуватися для моделювання систем управління енергією. Для створення D-DRY набір даних базових місяців впорядковується відповідно до відстані (вимірної у стандартних відхиленнях) кожної змінної на місяць від значення довгострокового середнього.

Дипломований інститут інженерів з будівельних послуг (CIBSE) спільно з британським Met Office займається розробкою CIBSE TRY для Сполученого Королівства [30]. У випадку з Великобританією TRY початково кожен з 3 параметрів навколишнього середовища має однакову вагу, а саме температуру сухого

термометра, хмарність (використовується як проксі для сонячного опромінення) і швидкість вітру. Це вважалося найбільш підходящим для будівель з природною вентиляцією, типових для Великобританії [21]. В останньому варіанті [30] параметри навколишнього середовища були оновлені, щоб використовувати температуру за сухим термометром, хмарність (використовується як проксі для сонячного опромінення) і відносну вологість як основні змінні, а швидкість вітру – як вторинну. Порівняння різних підходів TRY наведено в [31], тоді як аналіз UK TRY наведено в [30]. TRY для Великої Британії складається з даних за 12 окремих місяців, кожен із яких вибрано як найсередніший місяць із набору років. Кумулятивні функції розподілу, на яких базується UK TRY, складаються із середніх добових значень температури сухого термометра, хмарності та відносної вологості. Ці щоденні середні значення обчислюються з використанням погодинних значень з усіх місяців розглянутих базових років. Компонентні місяці вибираються, по суті, з найбільшими середніми значеннями температури, радіації та відносної вологості. З цих трьох місяців вибирається місяць із найбільшою середньою швидкістю вітру для UK TRY.

Типовий метеорологічний рік (ТМУ) [32] також базується на методі статистики FS (forward search) для наборів даних, отриманих за 1961-1990 роки. Однак ТМУ використовує більше вхідних змінних, ніж TRY: мінімальне, максимальне та середнє значення температури сухого термометра, температури точки роси; і мінімальна і максимальна швидкість вітру. ТМУ, крім глобальної радіації, включає також пряме нормальне випромінювання. Деталі концепції та роботи, що впливають із ТМУ, можна знайти у [33], [34] та [35]. Використання типових метеорологічних років [36] поширене в США, але також розглядається в інших країнах.

– Типовий метеорологічний рік 2 (ТМУ2) [37] і рік погоди для розрахунків енергії 2 (WYEC2) [38] подібні до ТМУ, але з більш складними сонячними моделями. Крім того, коефіцієнти для сухого термометра і температури точки роси трохи змінені, щоб приділити більше уваги температурам сухого термометра і точки роси, а менш – швидкості вітру. Базовий період часу для ТМУ2 – 1961-1990.

– Типовий метеорологічний рік 3 (ТМУ3) [32] створюється з використанням процедури, подібної до ТМУ2. ТМУ3 базується на 15 базисних роках (1991-2005), але на сайтах, де доступні дані за 30 років, базовий період часу охоплює 1976-2005. Типовий рік основного компонента (ТРСУ) [35] є альтернативою ТМУ, призначеним для скорочення набору даних ТМУ до набору, що містить невелику кількість некорельованих компонентів. Нова база даних формується за допомогою штучних змінних, створених за допомогою аналізу головних компонентів (Primary Components Analysis – PCA). Кожен компонент є комбінацією вихідних змінних, що представляють велику частку мінливості вихідних даних. Тобто зменшення розмірності бази даних при збереженні максимальної кількості інформації.

Рік Міжнародної погоди для розрахунків енергії (IWEC) [39] є спробою Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE) міжнародної уніфікації файлів погоди. Враховуючи величезну доступність необроблених даних про погоду в Інтернеті, стратегія IWEC полягає в тому, щоб шукати всю інтегровану погодинну інформацію про погоду (ISH); створити якомога більше файлів погоди «типовий рік». Потім випустити їх у форматі, схожому на ТМУ3. Файли IWEC містять дані погодних спостережень за швидкістю та напрямком вітру, покривом неба, видимістю, висотою стелі, температурою сухого термометра, температурою точки роси, атмосферним тиском, рідкими опадами та поточною погодою протягом принаймні 12 років записів, але до 25 років. Якщо в базі даних ISH немає вимірювань сонячної радіації, то погодинна глобальна горизонтальна радіація та пряме звичайне випромінювання оцінюються емпірично з використанням інших змінних, таких як геометрія Сонце-Земля, хмарний покрив, відносна вологість, різниця температури з трьома годинами раніше, і швидкість вітру. Тепер IWEC оновлено до IWEC2 [40], щоб містити трохи більше градусо-днів холодної погоди. Існує також значно більше коливань у сонячній радіації. Файли погоди IWEC2 мають меншу вагу для глобальної горизонтальної радіації, але з більшою вагою для прямого нормального сонячного випромінювання, ніж попередня

версія. Зараз існує 3012 файлів IWEC2 для розташування за межами США та Канади; Файли TMY3 доступні в США та Канаді [41].

### **1.3 Файли для екстремальних погодних умов**

Типові погодні роки, введені вище, засновані на визначенні періодів середньої погоди протягом базових років. Таким чином, ці методи підходять для розрахунку результатів моделі, наприклад типового річного використання енергії. Однак використання середніх даних для створення файлів погоди не дає інформації про природну мінливість погоди, що має першочергове значення при спробі розглянути екстремальні або нетипові погодні умови. Це необхідно, оскільки екстремальні погодні явища, такі як хвилі спеки, періоди посухи або похолодання, є важливими для моделювання перегріву в будівлях [42], аналізу теплового комфорту [43] або оцінки пікового споживання енергії [44]. Екстремальні погодні явища, ймовірно, стануть частішими в майбутньому в результаті зміни клімату [14, 45], отже спільнота будівельних інженерів намагається адаптувати дизайн будівлі та поведінку мешканців, щоб впоратися з такими екстремальними подіями.

Перетворення між типовими погодними роками можна різними методами. У роботі [46] по-різному зважують параметри погоди, які беруть участь у обчисленні TRY, залежно від того, чи призначений файл погоди для аналізу опалення чи охолодження відповідно до європейського технічного стандарту ISO 15927-4. Подібний підхід прийнято у [47], які використовують вагові коефіцієнти залежно від змінних кліматичної зони для модифікації ISO 15927-4 при розрахунку потреби в енергії на опалення та охолодження в будівлях.

В якості альтернативи цим підходам були спеціально розроблені роки, щоб відображати менш типові роки, наприклад, тепліше, ніж середнє літо. Нижче описані найважливіші.

Проект літнього року (DSY) [48] – це насамперед спроба оцінити вплив теплішого за середнє літо і спочатку призначався в основному для визначення розмірів механічних систем охолодження. DSY – це рік, який припадає на середину



верхнього квартиля набору даних базових років, ранжований відповідно до середньої температури сухого термометра влітку (з квітня по вересень). Це, як правило, третє найтепліше літо для базового набору даних за 20 років. DSY не враховує екстремальні температури в окремі місяці або падаючу сонячну радіацію, які мають велике значення для оцінки ефективності перегріву будівель [42]. Це означає, що періоди високої температури (наприклад, хвилі спеки) у відносно прохолодне літо не враховуються. Це проблема, оскільки таке літо, як 2003 р., яке призвело до такої кількості смертей у Європі, часто не оцінюється високо в основній базі, якщо розглядати середню літню температуру. Існує ряд варіацій DSY, які намагаються покращити його чутливість до суворих погодних умов, які обговорюються нижче:

– Імовірнісний проект літнього року (pDSY) [49, 50] заснований на відмінній від DSY метриці перегріву, а саме на виборі років на основі того, що вони містять події, достатньо теплі, щоб викликати певний ступінь перегріву всередині умовної будівлі, яка підтримує майже така ж температура, як і зовнішня температура. У TM49 роки ранжуються за новою метрикою під назвою «зважений градус охолодження» (WCDH), яка є різницею між робочою температурою та температурою адаптивного комфорту [51, 52]. Оскільки найбільші значення WCDH, ймовірно, спостерігатимуться для великих періодів повернення, використовується розширений набір базових років (з 1950 по 2006). Для решти Великобританії використовувався ще один новий показник під назвою Static Weighted Degree Hours з еталонною температурою, що дорівнює 93-му центилу температури сухого термометра – температурі, при якій можна віднести смерть через перегрів. Однак, враховуючи низьку частоту виникнення екстремальних подій навіть у цьому діапазоні років, було запропоновано, що синтетичний генератор погоди [50] може бути кращим варіантом, оскільки це може забезпечити дуже велику кількість базисних років.

– Літній контрольний рік (SRY) [54] заснований на методології TRY і призначений для відображення майже екстремальних умов. SRY налаштовує температури сухого термометра TRY до значень, що представляють 90-й процентиль функції розподілу температури, створеної з літніх місяців базового набору даних.

Таким чином, після цього початкового регулювання температура за вологим термометром, швидкість вітру та атмосферний тиск змінюються. Сонячне опромінення відбувається за аналогічним двоступеневим процесом, який використовується для отримання температури сухого термометра. Зрештою,  $SR_Y$  повинні містити принаймні один період теплого періоду, щоб бути корисним при обчисленнях перегріву.

– Майже екстремальний проектний еталонний рік (DRY) [55 – 57] використовує триразовий процес для створення погодного року. Процес вимагає великої кількості даних про погоду; отже, генератор погоди UKCP09 використовується для виробництва 3000 базисних років. Окремі місяці ранжуються відповідно до середньомісячної температури. Двадцятирічний період із зазначених місяців (20 січня, лютого тощо), кожен із яких зосереджений на середині верхнього квартилю (87,5%), визначаються та за допомогою статистичного методу FS три місяці з найнижчою сумою рангів температури сухого термометра. вибираються температура, вологість і освітленість. Потім вибирається місяць у цій групі з трьох із найближчою середньомісячною швидкістю вітру до середньої за 20 років. Цей процес повторюється протягом усіх 12 місяців і створюється DRY. Перевага цього методу полягає в тому, що процес можна використовувати для поточної або майбутньої погоди, а метод можна змінити, щоб надати перевагу вологості або опроміненню замість температури.

Екстремальний метеорологічний рік (ХМ $Y$ ) [58] є розширенням ідеї ТМ $Y$  на весь рік і використовує ті ж погодні змінні та подібні коефіцієнти, що й ТМ $Y$ . ХМ $Y$  заснований на виборі екстремальних показників із базового набору замість середніх. Місяці з найвищими та найнижчими погодинними середньогодинними значеннями в базові роки (1999-2013) об'єднуються в рік із найспекотнішим літом та найхолоднішою зимою.

Нетиповий метеорологічний рік (УМ $Y$ ) [59] заснований на WYEC2 зі зміненими параметрами ваги для складання метеорологічного року. У УМ $Y$  як найважливіші були запропоновані параметри, пов'язані з максимальною та

мінімальною температурою сухого термометра, сонячною радіацією та швидкістю вітру. Можливі й інші комбінації ваги, і його використання прийнятне залежно від клімату регіону, в якому розраховується файл погоди [59]. Файли UMY дають результати, порівняні з TMY2 у звичайних умовах (де звичайного файлу погоди було б достатньо), але покращує прогнозування максимального споживання енергії під час важких погодних явищ.

Спекотний літній рік (HSY) [60] має дві версії: HSY-1 на основі року з найвищим WCDH при перевірці літа (червень, липень і серпень) з 1975 по 2006 рік, і HSY-2 на основі року літа з найбільше годин фізіологічно еквівалентної температури (PET) [61] понад 23 °C, використовуючи той самий рік: 1975-2006.

#### **1.4 Обмеження використання даних спостережень для типових і екстремальних погодних файлів**

Спостережувані (тобто історичні) погодні дані є основним джерелом даних для всіх файлів погоди, перелічених у розділах вище. Існують два основних набори обмежень у використанні таких даних. Перше стосується як типових, так і екстремальних погодних файлів, і його можна підсумувати таким чином:

– Файли погоди базуються на відносно невеликій кількості метеостанцій з неоднорідним просторовим розподілом. Придатність цих даних далеко від місця спостереження зменшується. Крім того, внаслідок дефіциту та нерегулярного просторового розподілу сусідні місця можуть часто використовувати різні набори спостережуваних років для створення файлів погоди. Наприклад, переміщення потенційної будівлі на 100 м на місці може означати перетин межі файлу погоди зі значними змінами прогнозованої продуктивності.

– Оскільки файли погоди охоплюють великі території, файли погоди для прибережних місць також можуть застосовуватися до внутрішніх і гірських об'єктів або навпаки, що може призвести до неправильних і дорогих проектних рішень для забезпечення відповідності будівельним нормам або інструкціям [62].

– Аеропорти є звичайним місцем для збору даних про погоду, і можуть бути чіткі відмінності між навколишнім середовищем у таких місцях та в інших областях, наприклад, у сусідніх містах.

– Наслідком використання історичних даних про погоду є те, що, за визначенням, розробник моделей дивиться на те, як будівля могла б працювати за часового ряду, який ніколи не повториться, а не на те, як вона буде працювати в будь-який рік, який може відчувати будівля після нього. Крім того, процес, який використовується для формування стандартних файлів погоди, зшивання найбільш типового січня до найбільш типового лютого тощо, дає дуже малоімовірний часовий ряд, оскільки ці місяці дуже рідко відбувалися поспіль. Однак цілком імовірно, що типовий файл погоди, оброблений за останні двадцять- тридцять років, буде репрезентативним для наступного десятиліття. Принаймні для річного використання енергії в кліматі з домінуванням опалення, як-от Великобританія, цей підхід дає розумні результати в порівнянні з моделюванням будівлі з використанням повного набору базових років, а потім вибору середнього результату [63].

Другий набір обмежень стосується файлів погоди, що представляють екстремальні погодні умови. Їх можна підсумувати таким чином:

– Основним обмеженням файлів екстремальної погоди є те, як подолати той факт, що екстремальна погода за визначенням є низькочастотною подією. Таким чином, тимчасові ряди, зібрані для створення типових погодних років, недостатньо довгі, щоб надати достатню інформацію про частоту та інтенсивність екстремальних погодних явищ, які можуть відбуватися лише раз на 50 або 100 років. Також характеристики часових рядів погоди змінюються з часом, що ще більше ускладнює аналіз екстремальних подій [64].

– Використання історичних даних означає, що не міститься жодної інформації про те, як зміна клімату може вплинути на погодні умови та екстремальні погодні явища.

– Також є підстави для занепокоєння щодо змінних, вибраних для компіляції файлів погоди: наприклад, DSY не гарантує кореляції з внутрішнім

середовищем будівлі, оскільки це також залежить від інших змінних (швидкість вітру, хмарність тощо), які не є враховано при створенні цього файлу погоди [42]. Підхід rDSY являє собою значний прогрес за межі простого DSY, але знову ж таки цей файл погоди не враховує важливі змінні, які визначають продуктивність будівель у спекотне літо, такі як вітер і сонячна радіація. DRY є більш комплексним, проте все ще існують проблеми з відтворенням природної мінливості та екстремальних погодних умов за допомогою генераторів погоди, на яких це засновано. На додачу. В якості альтернативи SRY розглядає сонячну радіацію як незалежний параметр, однак він виключає вітер.

## РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ ПОГОДНИХ УМОВ

У цьому розділі ми представляємо моделі та алгоритми для генерації погодних умов, перераховуємо найбільш широко використовувані типи генераторів і наведемо деякі обмеження для синтезу погодних умов. Враховуючи обмеження історичних даних про погоду для побудови файлів погоди для моделювання, зріс інтерес до використання синтетичних даних про погоду, які можуть імітувати поведінку погоди. Синтетичні дані про погоду можуть надати цінну допомогу у формулюванні політики та в процесі прийняття рішень, підкріплюючи інформацію, доступну в більш грубих просторово-часових масштабах, і надаючи уявлення у разі відсутності даних. Синтетична погода також може імітувати екстремальні умови, які, хоча статистично репрезентують місце, не спостерігалися.

Генератори погоди використовують комп'ютерні алгоритми, які створюють довгий часовий ряд змінних погоди зі статистичними властивостями, порівняними з існуючими історичними записами. Генератори погоди також можуть моделювати метеорологічні змінні в різних масштабах часу на основі емпіричних статистичних моделей, заснованих на зменшенні масштабу сукупності вихідних даних кліматичної моделі [65–67]. Генератори погоди часто розробляються в два етапи: спочатку шляхом моделювання добових опадів (див. рис. 2.1), а потім генерування решти змінних, що представляють інтерес, на основі дощу. Цими змінними часто є максимальна та мінімальна температура ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ), і сонячне випромінювання ( $R$ ). Інші змінні, такі як напрям і швидкість вітру, потім виводяться з ключових змінних. Рішення про вологий чи сухий день залежить від кількості опадів, що спостерігаються; сухий використовується, якщо кількість опадів нижче певного порогу (як правило,  $2 \cdot 10^{-2}$  мм); інакше день класифікується як вологий. Для кожного місяця використовуються різні параметри моделі для представлення сезонних коливань як величини кліматичних змінних, так і їх перехресних кореляцій (співвідношень між окремими змінними за різні періоди часу).

## 2.1 Найбільш поширені генератори погоди

Генератори погоди можна класифікувати залежно від припущень стосовно змінних, на яких вони зроблені. Більшість широко використовуваних генераторів погоди є параметричними. Тобто вони передбачають припущення про статистичні властивості та функції розподілу вхідних даних. Непараметричні генератори погоди керуються даними.

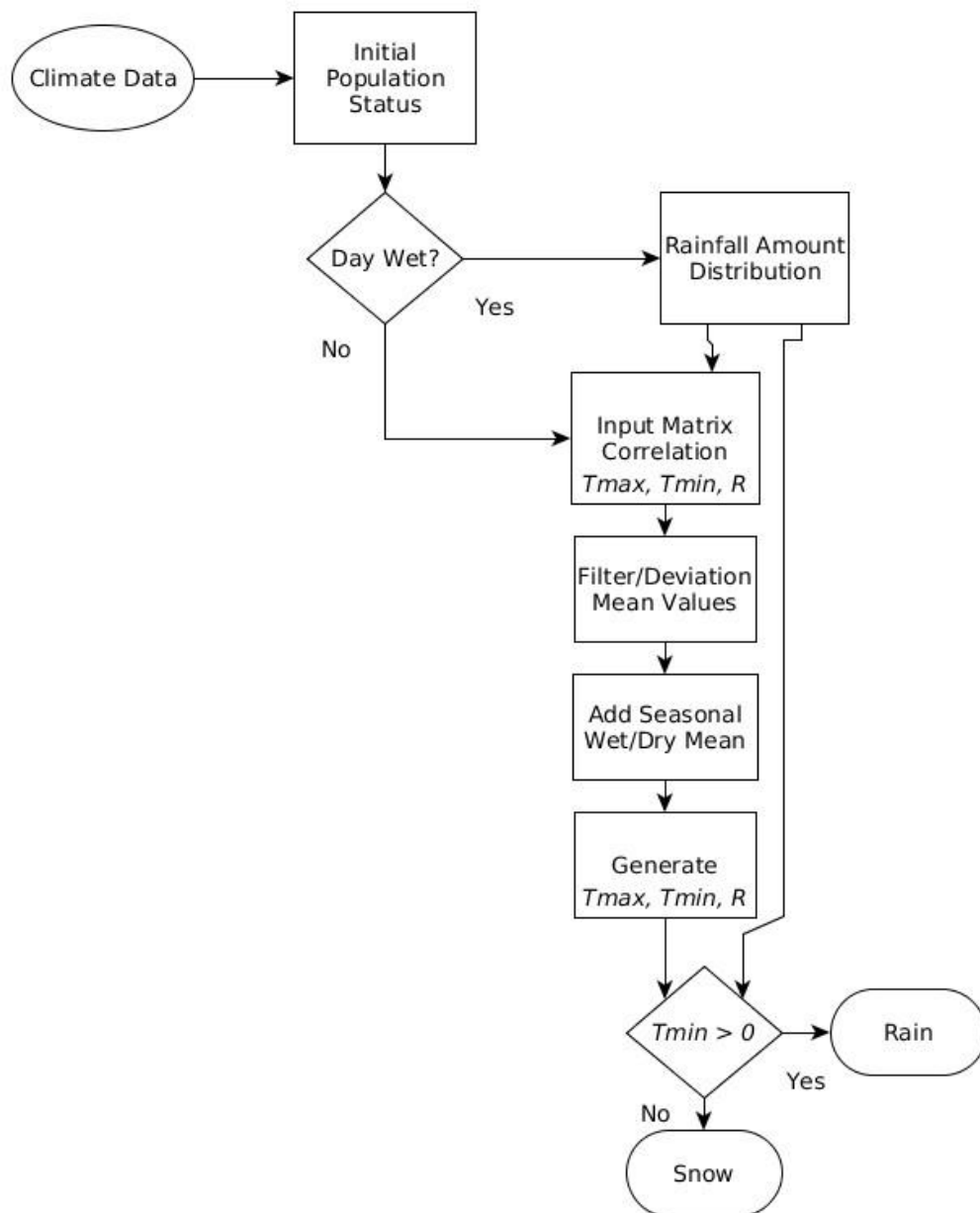


Рисунок 2.1 – Блок-схема різних етапів моделювання добових опадів у типовому генераторі погоди

Непараметричні генератори погоди часто використовують методи повторної дискретизації та моделювання, які не повинні відповідати будь-яким припущенням щодо даних. Генератор погоди, який поєднує два варіанти, називається напівпараметричним генератором погоди.

Список найбільш поширених моделей параметричного генератора погоди наведено далі:

– WGEN [68] описує послідовну залежність опадів  $p$ , використовуючи послідовність можливих подій, у якій ймовірність кожної події залежить лише від стану, досягнутого в попередній події (ланцюг Маркова). Значення  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  і  $R$  пов'язані з  $p$  на основі вологого або сухого стану дня. Залежність між цими трьома змінними зберігається за допомогою коефіцієнтів взаємної кореляції цих змінних у різні моменти часу. Модель WXGEN [69] введена як адаптація WGEN для використання в розрахунках впливу ерозії ґрунтів.

– Модель CLIGEN [70] вдосконалює WGEN, виробляючи індивідуальні оцінки параметрів шторму, включаючи час до піку, пікову інтенсивність та тривалість шторму. Ця функція дозволяє використовувати CLIGEN для моделей ерозії ґрунту [71, 72]. Модель відтворює історично точні місячні розподіли її параметрів. Цими основними вхідними параметрами є: інформація про кількість опадів, температура та вітер, а також ряд даних про ґрунт і топографію. Однак він не підходить для генерування щоденної погоди, оскільки генерація ключових змінних не взаємно корелює з опадами. В результаті змінні, що стосуються вологих днів і сонячної радіації, не відтворюються.

– ClimGen [73] використовує подібний підхід до WGEN. Однак передбачається, що добова кількість опадів відповідає розподілу Вейбулла, а не гамма-розподілу, який використовується WGEN. ClimGen генерує півгодинну інтенсивність опадів, використовуючи припущення, що кількість опадів у штормі розподіляється експоненційно. Це робить ClimGen більш придатним для оцінки екстремальних опадів [74, 75].



– Met&Roll [76] використовує стандартні відхилення екстремальних температур ( $T_{max}$  і  $T_{min}$ ) і добових сум глобальної сонячної радіації ( $R$ ) для створення синтетичних часових рядів погоди для гідрологічного моделювання та оцінки виробництва сільськогосподарських культур. Процес лінійно залежить від попередніх значень і від стохастичного терміну, заснованого на моделях авторегресії першого порядку ( $AR1$ ) з річним циклом і місячною сезонністю.

– CRU-WG [77, 78] є вдосконаленням структури WGEN. CRU-WG використовує базові роки 1961-1990 для оцінки параметрів, використаних для калібрування стохастичної моделі, яка генерує щоденні погодні змінні. Першою змінною, яка створюється, є опади, інші змінні, такі як  $T_{max}$  і  $T_{min}$ , тиск, швидкість вітру та сонячні години, генеруються на основі їх спостережуваних взаємних кореляцій з опадами. Інші результати CRU-WG, такі як відносна вологість, виводяться з цих змінних. CRU-WG краще представляє події з низькою ймовірністю, такі як високі температури та екстремальні опади.

– WeaGETS [79, 80] – це стохастичний добовий генератор погоди на основі Matlab для створення серії добових опадів, максимальних і мінімальних температур необмеженої довжини, що дозволяє проводити дослідження впливу низькочастотних метеорологічних змінних. WeaGETS має перевагу в тому, що включає в себе обчислювальні схеми інших відомих генераторів погоди, а також пропонує унікальні опції, такі як виправлення заниження міжрічної мінливості та можливість використання ланцюгів Маркова різного порядку. Що ще важливіше, використання Matlab дозволяє легко модифікувати вихідний код відповідно до конкретних потреб користувачів. Було б просто, наприклад, додати різні функції розподілу опадів.

– WETTREG [81] вибирає блоки даних із спостережуваних часових рядів на основі класифікації моделей циркуляції, які мають сильний зв'язок з місцевим регіональним кліматом. Середньодобова температура розраховується з використанням 5-денного ковзного середнього. Наприклад, температура 22 грудня замінена середньою температурою 20-24 грудня. Часовий ряд аналізується з пошуком епізодів (наприклад, температура вище певного порогу) для визначення погодних

умов у даних кліматичної моделі. Це використовується для стохастичного генерування інших змінних. Дані потім інтерполують для створення повного регіонального часового ряду.

– AnaWEGE [82] – це стохастичний генератор погоди, заснований на методології зменшення масштабу «аналогів циркуляції», яка порівнює стани атмосфери за даними загальної циркуляційної моделі (GCM) [83]. Подібність, створювана цими «аналогами циркуляції», визначає когерентний фізичний і просторовий зв'язок між набором місць, у яких подібні великомасштабні моделі забезпечують відповідні початкові умови для генерування погодних змінних [84].

– SUWG, просторовий генератор міської погоди [85], призначений для імітації ефекту міського теплового острова. SUWG екстраполює дані, зібрані на метеостанції на висоті 30 метрів над містом, для вивчення погодних характеристик районів. Потім по всьому місту, що розглядається, наноситься 2D сітка та оцінюються ефекти теплового потоку від урбанізації в кожному з осередків. Беручи до уваги ці впливи міської території на метеорологічні параметри, можна використовувати модель для отримання даних на відповідній висоті (наприклад, 2 м) і адаптувати SUWG для аналізу енергії будівлі.

– Meteororm [86] екстраполює погодинні дані зі статистичних даних для місця розташування. Якщо статистичні дані недоступні, Meteororm інтерполуює з інших сусідніх сайтів. Meteororm – це комбінація кліматичної бази даних, інструменту просторової інтерполяції та генератора стохастичної погоди з даними про глобальне випромінювання, отриманими з Глобального архіву енергетичного балансу (GEBA). Це дозволяє створювати типові роки з погодинною або щохвилинною роздільною здатністю для будь-якої локації [87]. Стохастичне генерування глобального випромінювання базується на моделі ланцюга Маркова для добових значень і авторегресійної моделі для погодинних або щохвилинних даних. Meteororm широко використовується для генерування типових метеорологічних років [88].

Найпоширеніша модель напівпараметричного генератора погоди описується таким чином:

– LARS-WG [89] є напівпараметричною версією WGEN, яка використовує математичне подання, що використовується для щоденного погодного моделювання процесу, де параметри моделі безпосередньо оцінюються з наявних відібраних раніше даних. Це має перевагу, оскільки не вимагає попередніх припущень щодо розподілу ймовірностей параметрів. LARS-WG використовує напівемпіричні розподіли для тривалості серії вологих і сухих днів, добових опадів і добової сонячної радіації; це означає, що LARS-WG більш точно відповідає спостережуваним даним, ніж WGEN. Однак обидва генератори погоди виходять з ладу при розгляді варіації в кореляції між змінними. Це важливо в основному для точності моделювання для оцінки погодних сценаріїв, коли дві або більше змінних взаємодіють одна з одною.

Найпоширеніші непараметричні моделі генератора погоди описані таким чином :

– KnnCAD версії 4 [90] – це непараметричний алгоритм генератора погоди для опадів і температури, заснований на просторовому моделюванні опадів, створеному за допомогою зважування відповідних K- ближніх сусідів . Враховуючи, що KnnCAD використовує непараметричні моделі для своїх вхідних даних, немає необхідності робити додаткові припущення щодо просторових кореляцій та розподілів ймовірностей для кожної змінної, що цікавить. Отже, KnnCAD можна застосовувати в більш загальних рамках, ніж параметричні та напівпараметричні генератори погоди. Це дозволяє використовувати методи повторної дискретизації, щоб отримати відповідну тимчасову кореляцію для аналізу низькочастотних подій.

## **2.2 Обмеження погодних генераторів**

Основним обмеженням генераторів погоди є те, що вони засновані на статистиці, отриманій на основі історичних спостережень за погодою. Це означає, що мало ймовірно, що екстремальні події будуть правильно представлені, оскільки вони рідко, якщо взагалі, траплятимуться, під час короткого історичного запису,

використаного для створення генератора. Крім того, існує невід'ємне припущення, що майбутні погодні умови будуть такими ж, як і раніше.

Вихідні дані від генераторів погоди є синтетичними даними, тому необхідно їх дослідити для оцінки репрезентативності. В літературі є кілька оцінок генераторів погоди: у [91] оцінили можливості WGEN. Було виявлено, що WGEN є репрезентативним як для поточної, так і для майбутньої погоди. У [92] провели порівняння між WGEN та LARS-WG для різноманітних кліматичних умов. Виявилось, що обидва генератори не відтворюють мінливості даних, а також недопередбачили як хвилі тепла, так і різкі похолодання. Автори праці [71] проаналізували CLIGEN для використання з канадським кліматом. CLIGEN забезпечує хороші результати з спостережуваними середніми значеннями, але недооцінює їх варіації.

Теоретично генератори погоди можна використовувати для генерування достатньої кількості даних для оцінки ймовірності екстремальних погодних явищ [93]. Спостережувані часові ряди представляють одну «реалізацію» клімату, тоді як генератор погоди може створити багато «реалізацій», а отже, потенційно, більш широкий діапазон можливих ситуацій. Автори [94] розробили методології для генерування DSY на основі ітераційного моделювання генератора погоди в поєднанні з множинною вибіркою (до 100 разів) за 30-річний період, використаний як базовий для прогнозів. Проте все ще існує проблема щодо вбудовування хвиль тепла та похолодання в генератори погоди, які, як правило, заповнені середніми даними і часто обмежені використанням опадів як вхідних даних.

У літературі є кілька досліджень, що вивчають екстремальні погодні явища [95, 96], які можуть допомогти застосувати створення файлів погоди для моделювання будівництва. У роботі [97] порівняно 5 генераторів погоди (WGEN, ClimGen, CLIGEN, WeaGETS і LARSWG) для дослідження сухого клімату на 54 станціях на плато Лесс (Китай). Ці порівняння були засновані на відтворенні опадів, мінімальних і максимальних температур для різних сценаріїв. Оскільки опади не відповідають нормальному розподілу, порівняння між генераторами

погоди та даними спостережень були наближені за допомогою непараметричної статистики.

Було виявлено, що LARS-WG краще моделює загальний розподіл добових опадів, особливо у збереженні перекосу, але гірше, ніж моделі ланцюга Маркова для відтворення екстремальних подій з дощами, особливо там, де спостереження таких екстремумів були обмежені. CLIGEN і WeaGETs виконали ставку, ніж WGEN і ClimGen, при моделюванні добової кількості опадів, а WeaGETs найкраще моделювали екстремальні опади. Що стосується температур, тести показали, що ні спостережувані максимальні, ні мінімальні температури суттєво не відрізняються від отриманих даних на рівні 0,05 для всіх 54 станцій для будь-яких погодних генераторів, крім WGEN, для 4 станцій, що моделюють мінімальні температури. Однак стандартне відхилення не було відтворено для більшості генераторів погоди; F-тест показав, що тільки CLIGEN був статистично схожий на спостереження. Загалом WeaGETS показав найкращі показники щодо відтворення як опадів, так і температур у регіоні дослідження.

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ НАЙБЛИЖЧОГО МАЙБУТНЬОГО

Очікується, що зміна клімату призведе до збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ. Це безпосередньо вплине на ключові сфери природи та людини, такі як сільське господарство [98], водні ресурси [99] та енергетичні системи [100]. Забудоване середовище також переживатиме загрози зміни клімату, наприклад, пов'язані з проблемами перегріву.

Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC) вивчала кліматичні зміни, використовуючи низку можливих майбутніх сценаріїв викидів. Різні сценарії були створені шляхом зміни швидкості виробництва парникових газів за допомогою різних соціально-економічних сценаріїв [101, 102]. У результаті звіту про оцінку (AR5) IPCC [103] ці сценарії викидів перетворилися на репрезентативні шляхи концентрації (RCP). Тепер ці RCP надають вхідні дані як для глобальних кліматичних моделей (GCM), так і для регіональних моделей клімату з більш високою роздільною здатністю (RCM) [104 – 106].

Результати, отримані з GCM і RCM, представляють середні значення по регіонах або числових сітках, причому розмір цих сіток залежить від роздільної здатності моделі. Навіть для GCM з найвищою просторовою роздільною здатністю числова сітка все ще є занадто грубою, щоб забезпечити належне розуміння впливу зміни клімату на забудоване середовище. Більш тонкий масштаб і неявне збільшення географічної інформації та інформації про поверхню суші RCM дозволяє отримати більшу географічну роздільну здатність. Це дозволяє RCM надавати погодні та кліматичні дані з горизонтальною роздільною здатністю до 50 або навіть 25 км. У таких проектах, як ENSEMBLES [107], NARCCAP [108] і CORDEX [109], використовувалися комбінації кількох RCM для забезпечення кінцевих моделей з більш високою роздільною здатністю (досягнення 10-20 км горизонтальної роздільної здатності). Альтернативою RCM є використання статистичних методів для масштабування моделей GCM до більшої роздільної

здатності. Ці методи безпосередньо включають спостереження, зібрані на метеостанціях, і ті, що збираються за допомогою одного або кількох GCM (шляхом поєднання різних сценаріїв). Цей метод передбачає, що масштабні метеорологічні та географічні особливості впливають на місцеву погоду та клімат. Дані кліматичної моделі також можуть знадобитися для часового зменшення масштабу, якщо роздільна здатність занадто груба для коректного практичного застосування.

Масштабовані дані RCM, і GCM можуть бути або включені до генератора погоди, який створить майбутні синтетичні серії погодних даних [89], або за допомогою математичного перетворення можуть використовуватись для створення майбутній часовий рядів погоди на основі історичних спостережень [110]. До створення файлів майбутньої погоди можна підійти двома способами: шляхом поєднання кліматичних прогнозів із генератором погоди, щоб створити типові майбутні погодні роки [111], або шляхом математичного перетворення часового ряду існуючих файлів поточної погоди з використанням аномалій зміни клімату від GCM або RCM [112].

### **3.1 Кліматичні прогнози**

Кожна проекція кліматичної моделі є результатом багатьох ітераційних симуляцій кліматичних моделей (іменованих мультимодельним ансамблем). Ці ансамблі об'єднуються для створення прогнозів майбутнього клімату. У наступних пунктах перераховано зразок широко використовуваних міжнародних кліматичних моделей, таких як проект взаємопорівняння Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), а також ряд кліматичних моделей, спеціально розроблених у Великобританії, описаних нижче в цьому розділі.

CMIP3/5. У рамках Всесвітньої програми кліматичних досліджень Робоча група з поєданого моделювання заснувала Проект взаємопорівняння моделей (CMIP) як стандартний експериментальний протокол для вивчення результатів поєднання глобальних тривимірних атмосферних GCM в рамках моделей загальної циркуляції

океану та моделі поверхневих процесів. CMIP3, і CMIP5 були використані для створення прогнозів майбутніх глобальних кліматичних умов за допомогою великої кількості GCM. CMIP3 і CMIP5 неможливо порівняти безпосередньо через різні підходи, що використовуються для оцінки майбутніх викидів парникових газів. CMIP5 використовує репрезентативні шляхи концентрації парникових газів [115], тоді як попередній CMIP3 заснований на сценаріях викидів SRES [104], які використовуються в IPCC [110]. Існує кілька підходів до масштабування моделей CMIP3 і CMIP5, більшість з яких досягають просторової роздільної здатності приблизно 50 км, залежно від ансамблю, який використовується для виконання кожної моделі [116 – 118].

ENSEMBLES [107] та EURO-CORDEX [109] є європейською альтернативою, заснованою на інтенсивному використанні RCM. Наступне покоління CMIP6 зосереджується на визначенні походження упереджень моделі та оцінці майбутньої зміни клімату з урахуванням мінливості клімату, передбачуваності та невизначеності в сценаріях.

UKCIP02/UKCP09. Кліматичні прогнози UKCIP02 (програма впливу на клімат Великобританії 2002) [122] були засновані на серії експериментів з моделювання клімату дотримується чотирьох сценаріїв викидів, опублікованих у 1990 році IPCC для трьох майбутніх часових зрізів [102]. Вони складаються з кліматичних прогнозів із просторовою роздільною здатністю 50 км у випадку UKCIP02 і 25 км для UKCP09 (UK Climate Projections, 2009). Цей підхід ґрунтується на виведенні факторів змін для різних статистичних даних, а не на безпосередньому використанні кліматології RCM опадів [123, 124]. UKCP09 [125, 126] являє собою еволюцію прогнозів, досягнутих за допомогою UKCIP02. Він заснований на постобробці, фазовому моделюванні результатів у імовірнісній проекції, що дозволяє моделювати невизначеності, пов'язані з прогнозами [126, 128]. Методологія імовірнісного прогнозування в UKCP09 включає вибірку невизначеності кліматичного моделювання шляхом поєднання результатів збурених варіантів глобальної кліматичної моделі UK Met Office з прогнозами ансамблю альтернативних міжнародних кліматичних моделей. Для



порівняння, UKCP09 дотримується лише 3 сценаріїв викидів IPCC, але для більшої кількості періодів часу з десятирічними зрізами часу з 2020-2080 років. Існує ряд додатків, що виникають внаслідок використання UKCP02 та UKCP09, серед них ми виділяємо проект BETWIXT для моделювання будівель та генератор погоди EARWIG. Наведені нижче моменти представляють ці два цікаві результати.

– BETWIXT [129] – це проект, заснований на використанні UKCP02 і CRU-WG для підтримки надання щоденних погодинних метеорологічних даних, корисних для створення додатків. Основним досягненням у BETWIXT є підгонка моделей до поточної та прогнозованої статистики опадів у майбутньому в програмному пакеті RainClim за допомогою факторів, що впливають на кількість опадів, отриманих з результатів RCM. Потім погодинна інформація про кількість опадів об'єднується на щоденній основі, щоб спочатку створити добову температуру, а потім виконати погодинну регресію для температури та інших змінних. BETWIXT робить особливий акцент на роботі з крайніми значеннями, тому моделі третього моментного порядку використовуються, щоб краще відповідати моделі [130].

– EARWIG [131] – це генератор погоди, який спочатку використовувався з UKCP02, а потім повторювався для використання з UKCP09. Він створює внутрішньо узгоджену серію метеорологічних змінних, включаючи опади, температуру, вологість, вітер, сонячне світло, а також виведення потенційного випаровування вологи з ґрунту. Загальнодоступна версія цього генератора через портал даних UKCP09 виробляє базові дані та до 3000 років майбутньої погоди для певного періоду часу, що представляє 100 зразків можливої зміни клімату, вибраних випадковим чином з функції щільності ймовірності, з даними, доступними з роздільною здатністю 5 км для Великобританії.

Варто згадати результати, пов'язані з EARWIG та UKCP09, доступними через проект PROMETHEUS [62]. Це був мультидисциплінарний проект для створення погодних даних майбутнього еталонного року: TRY та DSY на основі методології CIBSE [20]. Мета полягала в тому, щоб верифікувати фізичні моделі для визначення проблем, з якими стикаються нові будівлі в результаті зміни

клімату. PROMETHEUS створив файли погоди в форматі erw для 51 місця у Великобританії протягом 2030-х, 2050-х і 2080-х років з урахуванням сценаріїв високих і середніх викидів. Оскільки підхід до створення файлів був імовірнісним (відповідно до характеру прогнозів UKCP09), було створено кілька файлів для кожного місця та десятиліття. Потім файли були розбиті за місяцями, упорядковані за температурою сухого термометра. Аналогічно, проект COPSE, який мав ширшу компетенцію, ніж PROMETHEUS, також розробив методологію для створення майбутніх файлів погоди [55]. COPSE мав на меті розробити надійні методології для створення файлів даних про погоду для оцінки проектів будівель у майбутньому кліматі, з особливим акцентом на комфорт і використання енергії. COPSE надала DRY для використання при проектуванні систем опалення та кондиціонування в будівлях. Подібно до PROMETHEUS, COPSE також видавав дані в форматі TRY і DSY. Хоча в ці роки COPSE були розроблені для трьох рівнів ризику сценаріїв викидів (низький, середній та високий), PROMETHEUS створив імовірнісні погодні файли, надавши вибір із п'яти ймовірностей для кожного майбутнього клімату.

### **3.2 Перетворення часових рядів погодних даних**

Альтернативою використанню кліматичних прогнозів для забезпечення генератора погоди є коригування (перетворення) поточних файлів погоди [16] або навіть необроблених даних часових рядів, отриманих на метеостанціях [107]. Відправною точкою цього методу є отримання погодних даних з високою роздільною здатністю для певного місця. Потім ці дані трансформуються з використанням прогнозів з глобальної або регіональної кліматичної моделі. Цей процес часто використовується для аналізу використання енергії будівлі або оцінки стійкості за різних майбутніх кліматичних сценаріїв [129].

Перетворені файли погоди використовують історичні спостереження за погодою для представлення сучасного клімату. Це створює метеорологічно узгоджені файли погоди, але ігнорує деякі аспекти майбутніх змін клімату, такі як зміна частоти

хвиль тепла. Використання стандартного базового історичного ряду означає, що застосовність будь-яких майбутніх файлів погоди обмежується доступністю базових даних. Крім того, якщо базові дані, які підлягають трансформації, вже мають форму TRY, TMY або подібних погодних файлів, то існує також припущення, що будь-яка кліматична зміна, яка сталася між базовим періодом файлу погоди та базовим періодом кліматичні прогнози незначні. Перетворені часові ряди будуються шляхом «зміщення» та «розтягування» спостережуваних змінних з використанням факторів, отриманих з прогнозів зміни клімату. Процесами морфінгу є [107]:

– «Зсув»  $x_0$  застосовується шляхом додавання прогнозованої зміни до абсолютного середньомісячного значення  $\Delta x_m$ . Ця зміна середнього значення також відома як абсолютна зміна:

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad (3.1)$$

де  $x$  – це змінна погоди майбутнього, яка змінюється в середньому за місяць, але з дисперсією, яка залишається незмінною. Наприклад, «зсув» зазвичай застосовується до базової лінії атмосферного тиску.

– «Розтяг»  $\alpha_m$  представлено масштабуванням майбутньої змінної погоди. Ця зміна також відома як дробова зміна:

$$x = \alpha_m x_0 \quad (3.2)$$

– Пов'язана місячна дисперсія змінної  $x$  також змінюється:  $\text{Var}(x) = \alpha_m \text{Var}(x_0)$ . Незважаючи на зміни місячної дисперсії, середнє значення залишається незмінним. Наприклад, сонячне опромінення має бути «розтягнутим», а не «зміщеним», щоб не змінювати добовий цикл між днем і ніччю.

– Змінні також можуть зазнавати комбінації перетворень «зсув» і «розтягнути»:

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m (x - x_0) \quad (3)$$

У цьому випадку ми маємо зміни як середньомісячної, так і місячної дисперсії.

Температура – це змінна величина, яка зазвичай «зміщена» від базової лінії в середньому, а також «розтягнута» в добовому діапазоні.

Автори в роботі [63] провели порівняння методів морфінгу та генератора погоди UKSP09. Дослідження показало, що генератор погоди здатний статистично виробляти погодні дані, узгоджені з історичними спостереженнями для кількох змінних. Однак деякі проблеми були присутні в погодинних шкалах часу з розподілом як сонячних годин, так і прямого та розсіяного випромінювання. Процедура морфінгу має тенденцію переоцінювати екстремальні дані, оскільки вона наближається до максимальної та мінімальної температури незалежно від середнього значення, коли вони повинні бути співвіднесені. Це одна з причин, чому методи генератора погоди, як відомо, краще підходять для дослідження екстремальних температур. Крім того, генератори погоди пропонують послідовну, більш точну просторову роздільну здатність, ніж морфінг, який залежить від кількості та розташування метеостанцій [45, 63] (тоді, принаймні теоретично, генератор погоди можна запускати для будь-якого місця).

### 3.3 Обмеження майбутньої погоди

В ідеалі поточні та майбутні файли погоди будуть співвіднесені, щоб можна було безпосередньо порівняти реакцію будівлі на файли погоди. Однак метод морфінгу та використання методу генератора погоди мають свої обмеження в цьому відношенні та з іншими питаннями, які обговорюються нижче.

Генератори погоди створюють часові ряди погодних даних, і хоча можна створити багато часових рядів, які доповнюються прогнозами зміни клімату, користувач не отримує інформації про аномалії зміни клімату. Крім того, хоча генератори погоди можуть створювати дані про погоду з просторовою роздільною

здатністю 5 км, прогнози зміни клімату мають просторову роздільну здатність 25 км (у випадку UKCP09). Таким чином, хоча багато зусиль витрачається на створення генераторів погоди, які працюють із все вищою роздільною здатністю для врахування топографічних особливостей, створення майбутньої погоди обмежено просторовою роздільною здатністю базових даних GCM/RCM. Крім того, розподіл окремих змінних скорочується до граничних екстремумів. Таким чином, малоімовірно, що екстремальні явища, такі як хвилі тепла та шторми, будуть присутні в коротких часових рядах. Це означає, що хоча ймовірнісні вихідні дані генератора погоди UKCP09 є потужним інструментом для вивчення впливу діапазону можливих кліматичних змін на будівлі, вони не є ідеальними для планування стійкості до екстремальних подій.

На додаток до того, як екстремальні події обробляються в кліматичних прогнозах, існує також проблема обмежень у відображенні та параметризації фізики клімату та невизначеності, пов'язаної з майбутніми викидами парникових газів. Ці обмеження обробляються соціально-економічними сценаріями викидів (тепер репрезентативні шляхи концентрації), які розглядають невизначеність зміни клімату, пропонуючи кілька ймовірних майбутніх кліматичних контурів [133]. Погодні генератори повинні вирішувати ці невизначеності [111], і деякі кліматичні прогнози були розроблені, щоб врахувати це. Це стосується UKCP09, де хороша модель факторів зміни клімату Монте-Карло надає прогнозам можливість розробити генератор погоди та стратегію вибірки, які можна використовувати для збору наслідків невизначеності кліматичної моделі [134]. Ця невизначеність зазвичай досягається за допомогою мультимодельного ансамблю різних GCM і спостережень і моделюється в рамках байєсівської системи [135]. У байєсівській статистичній моделі всі невизначені величини моделюються як випадкові величини з *априорними* розподілами ймовірностей, отриманими з попередніх знань про систему. «Обернена ймовірність», пов'язана з теоремою Байеса, дозволяє нам робити висновки про невідомі величини, адаптувати наші моделі, робити прогнози та вчитися на даних, об'єднуючи попередні розподіли та ймовірність у апостеріорні розподіли параметрів.

Використання аномалій зміни клімату для трансформації історичних спостережень за погодою або стандартних складених файлів погоди також має власний набір обмежень на додаток до тих, які вже згадувалися вище для прогнозів зміни клімату. Основним серед них є наявність базових погодніх часових рядів як з точки зору просторової роздільної здатності, так і періоду часу спостережень. Аномалії зміни клімату зазвичай визначають відповідно до базового періоду 1961-1990 рр.; отже використання файлу погоди на основі іншого періоду часу (або навіть меншого періоду) може внести помилки в процес, якщо припустити, що зміна клімату відбувається рівномірно, лінійно.

Методологія морфінгу також має невід'ємне припущення, що погодні умови не зміняться в майбутньому. Файл майбутньої погоди міститиме моделі погоди, ідентичні базовому файлу погоди, але з величинами погодніх змінних, зміщених і розтягнутих за допомогою алгоритмів морфінгу. Це означає, що майбутні погодні роки будуть порівняні з базовими роками. Використання багаторічних даних для одного місця та їх трансформація може бути цікавим підходом для боротьби з природною мінливістю клімату. Однак через проблеми, пов'язані зі спостереженнями за погодою, такі як відсутні дані, недостатня кількість змінних тощо, було б простіше використовувати генератор погоди, який замість цього включає прогнози зміни клімату.

Дійсно, за допомогою відповідного генератора стохастичної погоди та комбінації реалізацій кліматичної моделі, UKCP09 може створювати файли майбутньої погоди, узгоджені в часі та просторі. Загалом, RCM з погодинною тимчасовою роздільною здатністю можна використовувати для успішного створення майбутніх наборів даних про погоду навіть у випадку екстремальних умов [136] за допомогою відповідних прогнозів зміни клімату. Однак існують обмеження при використанні RCM, оскільки їх роздільна здатність може змінюватися в залежності від цільового регіону світу та використовуваної моделі. Оскільки робота з RCM з декількома змінними є інтенсивною обчислювальною роботою, деякі автори

спрощують змінні, залучені до файлів погоди, щоб працювати лише з температурою повітря [136, 137].

## РОЗДІЛ 4. ВРАХУВАННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПОГОДНИХ ЯВИЩ

Екстремальні погодні явища можуть вплинути на продуктивність будівлі зі значними і потенційно смертельними наслідками [138]. Серед інших подій: повені, посухи або спеки. У цьому огляді ми зосереджуємось саме на екстремальних подіях, які змінюють теплове середовище мешканців, тобто на хвилях спеки та похолоданнях. У звіті з оцінки IPCC 2014, AR5, у його резюме для політиків, зазначено, що, ймовірно, частота хвиль тепла вже зросла у значній частині Європи, Азії та Австралії [136]. Крім того, практично впевнено, що будуть:

- (i) частіше спостерігатися спекотні і менше холодні екстремальні температури в добових і сезонних масштабах та
- (ii) хвилі спеки з більшою частотою і тривалістю, ніж зараз [140].

Повний огляд індикаторів теплових хвиль можна знайти в [141].

### 4.1 Моделювання екстремальних подій

Стандартні методи оцінки впливу екстремальних погодних умов на внутрішнє середовище засновані на тепловому комфорті [142, 143]. Досліджень, які охоплюють умови в приміщенні під час суворих погодних явищ, мало. Альтернативою може бути використання фізіологічних моделей для оцінки ризику в екстремальних подіях. Ці моделі включають, серед іншого, індекси стандартної ефективної температури, дискомфорту, фізіологічного навантаження та глобальної температури за вологим термометром [144], які можуть надати важливу інформацію про вплив внутрішнього середовища на здоров'я мешканців. Що стосується зовнішніх умов, то кілька дослідників досліджували прогноз і пов'язані з ними причини суворих погодних явищ. Ключовою рушійною силою цього дослідження є потреба зрозуміти очікувані періоди повернення та інтенсивність екстремальних подій до кінця 21-го століття. Цю літературу можна розділити на два потоки: (1) моделювання теплових хвиль як продукту глобальної погодної системи; таким чином, використовуючи погодну модель у поєднанні з RCM [137],



та (2) моделюючи серйозні події з використанням погодних даних у поєднанні зі статистичним аналізом [144].

До першої групи належать висновки доповіді IPCC, які представляють науковий консенсус. Результати моделювання теплової хвилі за допомогою моделювання в масштабі погоди можна знайти в посиланнях [146 –149]. Ці пропозиції працюють з індексами для оцінки величини спеки в глобальному та локальному масштабах. Частота та інтенсивність хвиль тепла географічно проаналізовано та розглянуто кілька майбутніх сценаріїв залежно від GCM, RCM та викидів парникових газів.

Використання другою групою моделювання на основі даних не використовувалося в тій же мірі, як моделювання в масштабі погоди. Найвпливовішими з цієї групи є роботи [150], [151] та [152]. Завдяки цим підходам автори можуть охарактеризувати та змодельовати частоту та інтенсивність хвиль тепла та похолодання на основі даних із кожного місця. Значною перевагою цього підходу є те, що необхідний час обчислень є незначним у порівнянні з тим, що необхідний для симуляторів погоди.

Незважаючи на те, що результати погодних моделей надають корисну інформацію про хвилі тепла та їх географічні особливості, є складнощі з отриманням належних послідовних результатів від симуляторів. Однак моделі, керовані даними, є більш надійними і, здається, точно передбачають інтенсивність і частоту екстремальних подій. Недоліком останнього підходу є те, що він дуже локалізований, і для реалістичного прогнозування подій потрібні великі обсяги даних.

## **4.2 Екстремальні події в будівлях**

Залежно від своїх характеристик та експлуатації будівля може пом'якшити або посилити вплив екстремальних подій [153]. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC) будівель розроблені так, щоб впоратися з певним діапазоном історичних погодних умов, щоб уникнути їх надмірного розміру [154].

Покриття базується на річних процентилях температури та вологості, а типові значення включають 99,6% і 99% для опалення та 1% і 0,4% для охолодження. Конкретний рівень ризику потім вибирається відповідно до кінцевого використання будівлі (наприклад, 99,6%–0,4% для лікарень) [154, 155, 156]. Тому є явне виключення справді екстремальних погодних умов, які не трапляються більшість років. Хоча проектні розрахунки для енергетичних послуг у будівлях (таких як системи кондиціонування повітря) включають коефіцієнти безпеки, вони зазвичай враховують проблеми з введенням в експлуатацію або обмеження, і тут не слід покладатися на детальну оцінку екстремальних погодних умов.

Наявність систем HVAC в житлових приміщеннях набагато більше залежить від конкретного випадку. Будинки з помірним кліматом, наприклад у Великобританії, мають лише системи кондиціонування для опалення, які використовуються для пом'якшення похолодань [157]. Нинішній будівельний фонд у більшій частині Європи містить уразливі домогосподарства без кондиціонування повітря (як продемонструвала хвиля спеки 2003 року). У цих випадках мешканцям доводиться покладатися на нічну вентиляцію, щоб охолодити свої будинки. Однак поєднання міських умов із низькими швидкостями вітру та ефектами теплового острова та ситуацій, у яких також висока нічна температура, робить це неефективним, що призводить до фатальних наслідків [157]. Ці труднощі для забезпечення природної вентиляції можуть означати, що системи кондиціонування повітря в будівлях стають більш поширеними для боротьби з вищими температурами [159]. У деяких регіонах також спостерігається тенденція до впровадження реверсивних теплових насосів, які можуть забезпечувати як охолодження, так і опалення [156].

Результати моделювання, що стосуються вразливості будівлі від наслідків спеки, сильно залежать від якості файлу погоди для опрацювання зовнішнього погодного сигналу. Як було показано раніше, файли поточної погоди, створені на основі історичних даних або з генератора погоди, навряд чи містять адекватне відображення екстремальних подій. Однією з можливостей було б, як розвиток підходу до генератора погоди, використовувати суперсинтетичні файли погоди.

Суперсинтетичні файли погоди є математичними апроксимаціями наборів метеорологічних даних, які можна адаптувати, щоб мати декілька рівнів репрезентативності місцевої погоди. Такі методи, як вейвлети або розкладання часових рядів Фур'є, є основними прикладами підходів до подальшого дослідження створення суперсинтетичних файлів погоди. Однією з головних цілей цих файлів було б надання даних, які є обчислювально ефективними для моделювання для примусового представлення екстремальних подій. Вони можуть бути розроблені для імітації будь-якої кількості хвиль спеки влітку та похолодання взимку, щоб перевірити ефективність будівлі.

Більш екстремальні хвилі спеки в розвинених країнах, де більшість домогосподарств мають доступ до систем кондиціонування повітря, призвели до іншої проблеми. Одночасна потреба в охолодженні, викликана несприятливими погодними умовами, може перевищити потужність мережі та спричинити відключення електроенергії [157]. Таким чином, під час спеки системи охолодження можуть стати недоступними. Це говорить про те, що надійність і міцність систем також необхідно вивчати на рівні будівлі. Пасивні конструкції, стійкі до теплових хвиль, будуть більш надійними, тоді як будівлі, що залежать від систем HVAC (наприклад, великі комерційні будівлі з поганим дизайном оболонки, наприклад, великі засклені площі), можуть стати непридатними для використання та потребують евакуації в таких випадках.

## РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ

### 5.1 Поняття та об'єкт аналізу технічної безпеки

Безпеку визначають як стан діяльності людини, за яким з визначеною ймовірністю виключено прояв небезпек або ж відсутня надзвичайна небезпека. Безпека праці – це стан умов праці людини, за яких відсутня дія небезпечних і шкідливих факторів.

Об'єктом аналізу безпеки праці є виробнича система "людина – машина – навколишнє середовище" (ЛМС), в якій в єдиній комплекс, створений для виконання певних функцій, поєднані технічні об'єкти, люди і навколишнє середовище, які взаємодіють між собою.

Основними компонентами виробничої системи є людина, машина, навколишнє середовище, взаємодія між якими має ґрунтуватись на дотриманні відповідних правил, нормативних документів і бути керованою.

Система ЛМС є багаторівневою за ієрархією управління. Ієрархія поділяє людей на особу, яка формує завдання, організовує й управляє виробництвом, й особу, яка разом з технікою безпосередньо виконує це завдання. Таким чином, людина системи ЛМС більш високого рівня розглядає людину і техніку системи ЛМС більш низького рівня як єдиний компонент – своєрідну людину-машину, призначену для здійснення замислу.

Крім рівнів і компонентів в системі ЛМС доцільно виділити окремі стадії її життєвого циклу:

1. Стадія проектування (визначення завдань, формування вимог, розрахунок параметрів).
2. Стадія реалізації (коли у процесі виробництва перша стадія реалізується на практиці).

3. Стадія експлуатації (коли система ЛМС здійснює покладені на неї робочі функції).

Вірогідність нещасного випадку зростає, як тільки людина попадає в поле дії небезпечного або шкідливого фактору. Це небезпечні зони, що характеризуються певним видом небезпеки, її інтенсивністю, часом і простором дії.

Таким чином, з точки зору аналізу й управління небезпеками необхідно розглядати та аналізувати структурні елементи системи ЛМС – рівні (вищий і нижчий), компоненти і стадії життєвого циклу.

Взаємодія компонентів, що входять до системи ЛМС, може бути штатною і нештатною. Нештатна взаємодія може виявлятися у вигляді надзвичайної події – небажаних, незапланованих випадків, що порушують технологічний процес у відносно короткий відрізок часу. Відмова й інцидент, як правило, передують надзвичайній події, але можуть мати і самостійне значення. До головних моментів аналізу небезпек належить пошук відповідей на такі питання:

1. Які об'єкти є небезпечними;
2. Яким надзвичайним подіям можна запобігти;
3. Які надзвичайні події неможливо усунути і як часто вони мати-муть місце;
4. Яку шкоду не усунуті надзвичайні події можуть спричинити людям, об'єктам, навколишньому середовищу.

Пошук причин надзвичайних подій призводить до аналізу системи управління безпеками (СУН) на виробництві. Ці системи обов'язково включають такі компоненти, як наявність інформації, зворотних зв'язків та алгоритми функціонування.

Наявність зворотних зв'язків й інформаційної системи дозволяє про-водити збір даних щодо відхилень, відмов, проводити аналіз небезпек, порівнювати наслідки функціонування системи ЛМС з програмою управління безпеками, приймати рішення. У виробничій системі ЛМС інформаційні функції виконують: рапорти

інспекторів, акти розслідування нещасних випадків, аварій, протоколи атестації робочих місць тощо.

## 5.2 Розрахунок захисного заземлення

Відповідно до ГОСТ 12.1.030-81 захисне заземлення повинне забезпечити захист людей від ураження електричним струмом, при дотику до металевих частин, які можуть виявитися під напругою. Заземленням називається навмисне з'єднання електроустановок із заземлюючим пристроєм. Заземлювачем називається провідник, що перебуває в контакті із землею або її еквівалентом. Заземлюючим провідником називається провідник, що з'єднує заземлені частини із заземлювачем. Сукупність з'єднуючих провідників і заземлювачів називається заземлюючим пристроєм. Для установок потужністю не більше 100 кВт опір заземлюючого пристрою не повинне перевищувати 10 Ом, для установок потужністю більше 100 кВт – 4 Ом.

Розрахунок штучного заземлювального пристрою при відсутності природних заземлювачів.

Вихідні дані:

Захищений об'єкт – комп'ютерна мережа.

Захищений об'єкт – стаціонарний.

Напруга мережі – 220 В.

Виконання мережі – з глухозаземленою нейтраллю.

Тип заземлювального пристрою – вертикальні труби.

Розміри вертикальних заземлювачів:

Довжина – 6 м.

Діаметр труби – 0,60 м.

Товщина стінки труби – 0,06 м.

Висота труби – 0,6 м.

Відношення відстані між трубами до їхньої довжини:

$$\frac{L_B}{l_B} = 1 \quad (5.1) \frac{L_B}{l_B} = 1$$

Розмір горизонтального заземлювача (з'єднувальної стрічки): довжина  $L_{\Gamma} = L_{з.с.}$   $L_{\Gamma} = L_{з.с.}$  – згідно з розрахунком, м; ширина горизонтальної з'єднувальної стрічки  $b_c = 0,04$  м.

Глибина закладання вертикальних заземлювачів  $h_B = 0,6$ .

Розміщення заземлювачів попередньо приймають за чотирикутним контуром при числі стержнів від 4 до 100 та в один ряд при числі стержнів від 2 до 20.

Ґрунт – супісок; склад – однорідний; вологість – мала; агресивність – нормальна.

Кліматична зона – II.

Розрахунок:

1. Визначаємо характеристику навколишнього середовища в приміщенні організації: за пожежною небезпекою згідно з ПУЕ воно відноситься до класу П-II; за вибухонебезпекою згідно з ПУЕ – до класу В-I; за ступенем ураження електричним струмом – без підвищеної та особливої небезпеки.

2. Визначаємо  $R_D$  – допустиме (нормативне) значення опору розтікання струму в заземлювальному пристрої,  $R_D \leq 4$  Ом.

3. Обраховуємо  $K_{с.в.}$   $K_{с.в.}$  – приблизне значення питомого опору ґрунту, що рекомендується для розрахунку –  $\rho_{ТАБЛ} = 300$  Ом · м  $\rho_{ТАБЛ} = 3000$  м\*м.

4. Визначаємо  $K_{с.в.}$  – коефіцієнт сезонності для вертикальних заземлювачів для денної кліматичної зони. За довідковою інформацією приймаємо  $K_{с.в.} = 1,5$ .

5. Обраховуємо значення  $K_{с.г.}$  – коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача згідно з кліматичною зоною. За довідковою інформацією приймаємо  $K_{с.г.} = 3,5$ ;  $K_{с.г.} = 3,5$ .

6. Визначаємо  $\rho_{\text{РОЗР.В.}}$  – розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних заземлювачів:

$$\rho_{\text{РОЗР.В.}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{С.В.}} = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.2)$$

$$\rho_{\text{РОЗР.В.}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{С.В.}} = 300 \cdot 1,5 = 4500 \text{ м} \cdot \text{м}.$$

7. Розраховуємо  $\rho_{\text{РОЗР.Г}}$  – розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтальних заземлювачів:

$$\rho_{\text{РОЗР.Г}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{С.Г.}} = 300 \cdot 3,5 = 10500 \text{ м} \cdot \text{м}.$$

$$\rho_{\text{РОЗР.Г.}} = \rho_{\text{ТАБЛ}} \cdot K_{\text{С.Г.}} = 300 \cdot 3,5 = 1050 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.3)$$

8. Обрахуємо  $t$  – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача:

$$t = h_B + \frac{l_B}{2} = 0,6 + \frac{6}{2} = 3,6 \text{ м}. \quad (5.4)$$

9. Визначаємо  $R_B$  – опір, Ом, розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$\begin{aligned} R_B &= \frac{\rho_{\text{РОЗР.В.}}}{2\pi l_B} \cdot \left( \ln \frac{2l_B}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right) = \\ &= \frac{450}{2\pi \cdot 6} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 6}{0,60} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 3,6 + 6}{4 \cdot 3,6 - 6} \right) = 41,05 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (5.5)$$

10. Визначаємо  $n_{\text{Т.В.}}$  – теоретична кількість вертикальних заземлювачів без врахування коефіцієнта використання  $\eta_{\text{В.В.}}$ , тобто  $\eta_{\text{В.В.}}=1$ :



$$n_{T.B.} = \frac{R_B}{R_D \cdot \eta_{B.B}} = \frac{41,05}{4 \cdot 1} = 10,26 \text{ шт.} \quad (5.6)$$

11. Визначаємо  $\eta_{B.B}$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів при розташуванні їх згідно з вихідними даними або за чотирикутним контуром при числі заземлення,  $n_{T.B.}=11$  та при відношенні  $\frac{L_B}{l_B}=1$ . За довідником приймаємо  $\eta_{B.B}=0,42$ .

12. Визначаємо  $n_{H.B}$  – необхідна кількість штук, вертикально однакових заземлювачів з врахування коефіцієнта використання:

$$n_{H.B} = \frac{R_B}{R_D \cdot \eta_{B.B}} = \frac{41,05}{4 \cdot 0,42} = \frac{41,05}{1,68} = 24,43 \text{ шт.} \quad (5.7)$$

13. Визначаємо  $R_{розр.в}$  – вертикальний опір, Ом, розтіканню струму у вертикальному заземленні при  $n_{H.B} = 24,43$  без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{розр.в} = \frac{R_B}{n_{H.B} \cdot \eta_{B.B}} = \frac{41,05}{10,26} = 4 \text{ Ом.} \quad (5.8)$$

14. Визначаємо  $L_B$  – відстань між вертикальним заземлювачами за відношенням  $\frac{L_B}{l_B}=1$ , звідси

$$L_B = 1 \cdot l_B = 1 \cdot 6 = 6 \text{ м.} \quad (5.9)$$

15. Визначаємо  $L_{з.с}$  – довжину, м, з'єднання стрічки горизонтального заземлювача:

$$L_{3,C} = 1,05 \cdot L_B (n_{H,B} - 1) = 1,05 \cdot 6(24,43 - 1) = 147,60 \text{ м.} \quad (5.10)$$

16. Визначаємо  $R_{2,3,C}$  – опір, Ом, розтікання струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці):

$$R_{Г.3.C} = \frac{\rho_{PO3.Г}}{2 \cdot \pi \cdot L_{3.C}} \cdot \ln \frac{2 \cdot L_{3.C}^2}{2 \cdot b \cdot t} = \frac{1050}{2 \cdot 3,14 \cdot 147,61} \cdot \ln \frac{2 \cdot (147,61)^2}{2 \cdot 0,04 \cdot 3,6} = 13,50 \text{ Ом.} \quad (5.11)$$

17. Визначаємо  $\eta_{6,2}$  – коефіцієнт використання горизонтального заземлення при розташуванні вертикальних заземлювачів згідно з вихідними даними або за чотирикутним контуром при відношенні  $\frac{L_B}{l_B} = 1$  та необхідній кількості вертикальних заземлювачів  $n_{H,B} = 24,43$ .

За довжину приймаю  $\eta_{6,2} = 0,19$ .

18. Визначаємо  $R_{розр.2}$  – розрахунковий опір, Ом, розтікання струму в горизонтальному заземленні (з'єднувальній стрічці) при числі електродів  $n_2 = 1$ :

$$R_{PO3P.Г} = \frac{R_{Г.3.C}}{n_Г \cdot \eta_{B,Г}} = \frac{13,5}{1 \cdot 0,19} = 71,05 \text{ Ом.} \quad (5.12)$$

19. Визначаємо  $R_{розр.6,2}$  – розрахунковий теоретичний опір, Ом, розтікання струму у вертикальному та горизонтальному заземленні:

$$R_{PO3P.B.Г} = \frac{1}{\frac{1}{R_{PO3.B}} + \frac{1}{R_{PO3.Г}}} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{71,05}} = 3,78 \text{ Ом.} \quad (5.13)$$

20. Вибираємо матеріал та поперечний перетин з'єднувальних провідників. За довідковою інформацією вибираю голі мідні  $S_m = 4 \text{ мм}^2$  провідники.

21. Вибираємо матеріал та поперечний перетин магістральної шини. За довідковою інформацією обираємо сталеву шину товщиною  $\delta_c = 4 \text{ мм}$  і перетином не менше  $\delta = 100 \text{ мм}^2$ .

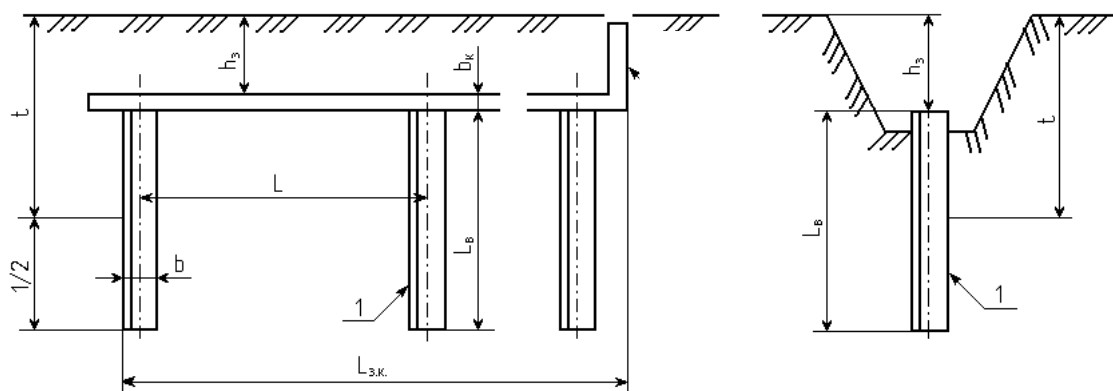


Рисунок 5.1 – Схема заземлювального контуру:

1 – вертикальний заземлювач; 2 – горизонтальний заземлювач;

$h_3$  – глибина закладання заземлювачів;  $L$  – відстань між заземлювачами;

$b_к$  – ширина квадрата;  $t$  – відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту;  $L_{3,к}$

довжина горизонтального заземлювача;  $d$  – ширина кутника;

$L_{\bar{A}}$  – довжина вертикального заземлювача.

Схема з'єднання обладнання з магістральною шиною та з'єднання магістральної шини з заземлювальним пристроєм (рисунок 3.1).

## ВИСНОВКИ

У цій роботі представлено огляд методів, які використовуються для створення поточної та майбутньої погоди для аналізу середовища будівель. Такі дані про погоду зазвичай використовуються для демонстрації відповідності політиці та нормам або для вивчення альтернатив проектування, однак зростає потреба у дослідженні стійкості будівель до екстремальних погодних явищ або до зміни клімату.

З цього огляду зрозуміло, що:

- Поточні файли погоди обмежені метеостанціями, на яких збираються дані, та їх неоднорідним просторовим розподілом. Хоча можна просто використовувати певний рік, наприклад 2003, для моделювання екстремальних показників, для конкретного місця знадобиться, щоб рік був записаний, і щоб подія була важливою для цього місця. Наприклад, хвиля спеки 2003 року в Парижі була більш екстремальною для його розташування, ніж той самий період в Единбурзі.

- Незважаючи на здатність створювати багато реалізацій, синтетична погода не може надійно генерувати екстремуми, оскільки генератори погоди ґрунтуються на спостережуваних часових рядах.

- Крім того, ми не маємо чіткого визначення того, що таке хвиля спеки чи похолодання, а також як це може змінитися в міру того, як клімат потеплішає і мешканці адаптуються. В основі цього лежить проблема, що файли погоди завжди вибираються як типові або нетипові, незалежно від впливу, який вони можуть мати на будь-яку будівлю. Наприклад, вони тепліші, ніж зазвичай, а не можуть викликати перегрів у конкретному дизайні.

- Майбутні файли погоди мають ті самі обмеження, що й поточні файли погоди, але також сильно залежать від невизначеності, пов'язаної з прогнозами зміни клімату. Найнадійнішим підходом на даний момент є використання прогнозів зміни клімату разом із генератором погоди. Однак цей метод все ще не може моделювати весь діапазон мінливості майбутньої погоди, і, отже, не найкраще підходить для оцінки важких подій.

– Міське середовище, де розташована будівля, часто не схожий на метеостанцію, де записується часовий ряд. При цьому ігноруються такі аспекти, як зниження швидкості вітру та зміна напрямків вітру, що вплине на стратегію природної вентиляції будівлі. Крім того, вплив міського острова тепла часто також ігнорується. Це може суттєво вплинути на терміни та обсяги використання енергії в будівлях [159].

Повертаючись до переліку вимог із семи частин, представленого в розділі 1, можна зробити відображення, показані в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Відображення вимог до підходів: ✓ = так, ✗ = ні, ? = можливо

Вимоги	Підхід				
	Спостереження погоди	Морфізм (повільні тренди)	Погодний генератор	RCM	Супер-синтетичні файли
Містить зразки типових умов	✓	✓	✓	✗	✗
Містить зразки для екстремальних умові	?	?	?	✗	✓
Вимагає пакетів симуляції для забезпечення часової роздільної здатності	✓	✓	✓	✓	✓
Надає географічну роздільну здатність для змін погоди в вибраній країні	✓	✓	✓	✓	✓
Найближче моделює клімат в міських умовах	✗	✗	✗	✗	?
Містить зразки даних для можливих кліматичних умов в майбутньому	✗	✓	✓	✓	✓
Надійна реєстрація даних з врахуванням промисловості	✓	✓	✓	✗	✗

З цього зіставлення ясно, що дві області, які потребують найбільшої уваги, це:

1. Покращення застосовності поточних і майбутніх файлів симуляції погоди будівель у міських умовах. Для цього буде потрібно краще розуміння фізики, пов'язаної з такими явищами, як міський острів тепла, а також те, як вони можуть змінюватися з часом. Крім того, моделі вітру слід адаптувати для аналізу того, як підвищена нерівність поверхні, пов'язана з містами, впливає на швидкість і напрям вітру.

2. Включення крайніх екстремальних погодних явищ, особливо таких, які можуть спричинити захворюваність, смертність або збої системи опалення/охолодження.

Неясно, як стандартні файли погоди, описані вище, можуть легко включати всі вимоги, описані в таблиці. Як наслідок, наступне покоління файлів погоди потрібно буде переробити, якщо будуть розроблені уніфіковані типи файлів для світу, які відповідають вказаним цілям. В якості дорожньої карти має бути наступний набір поточних і майбутніх файлів погоди; (1) мати можливість охопити країни з високою просторовою роздільною здатністю; (2) мати можливість включити будь-які мікрокліматичні ефекти, такі як локальний міський острів тепла; (3) може створювати типові роки, а також надавати роки «екстремальних» або «незвичайних» подій, тобто з подіями, які можна статистично описати і показати, що вони впливають на проекти будівель; (4) можна зробити 1, 2 і 3 для майбутньої погоди; (5) гарантує можливість значущих порівнянь між десятиліттями еволюції експлуатаційних характеристик будівель.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Stanko, A., Palka, O., Matiichuk, L., Martsenko, N., & Matsiuk, O. (2021, September). Smart City: A Review of Model Architecture and Technology. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (Vol. 2, pp. 273-277). IEEE.
2. Duda, O., Lypak, H., Matsiuk, O., Mudrokha, V., Pasichnyk, V., Veretennikova, N., & Kunanets, N. (2021). Formation of integrated repositories of social and communication data by consolidating the resources of museums, libraries and archives in smart cities projects. In *CEUR Workshop Proceedings* (pp. 1420-1430).
3. Bodnarchuk, I., Duda, O., Kharchenko, A., Kunanets, N., Matsiuk, O., & Pasichnyk, V. (2020). *Choice Method of Analytical Platform for Smart City* (No. 4374). EasyChair.
4. Klepeis, N.E., et al., *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants*. Journal of exposure analysis and environmental epidemiology, 2001. 11(3): p. 231-252.
5. Lader, D., S. Short, and J. Gershuny, *The time use survey, 2005*. How we spend our time. London: Office for National Statistics., 2006. 15: p. 2009.
6. Fouillet, A., et al., *Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France*. International archives of occupational and environmental health, 2006. 80(1): p. 16-24.
7. Robine, J.-M., et al., *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*. Comptes rendus biologies, 2008. 331(2): p. 171-178.
8. Charpentier, A., *On the return period of the 2003 heat wave*. Climatic change, 2011. 109(34): p. 245-260.
9. Directive, H.A.T., *Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air*. Official Journal of the European Communities L, 2002. 67: p. 14-30.

10. Laustsen, J., *Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings*. International Energy Agency (IEA), 2008: p. 477-488.
11. Mavrogianni, A., et al., *Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings*. Building and Environment, 2012. 55: p. 117-130.
12. De Wilde, P. and D. Coley, *The implications of a changing climate for buildings*. Building and Environment, 2012. 55: p. 1-7.
13. McMichael, A.J., R.E. Woodruff, and S. Hales, *Climate change and human health: present and future risks*. The Lancet, 2006. 367(9513): p. 859-869.
14. Herrera, M., et al., *SAX-Quantile Based Multiresolution Approach for Finding Heatwave Events in Summer Temperature Time Series*. AI Communications, 2016. 29(6): p. 725-732.
15. Burnand, G., *The study of the thermal behaviour of structures by electrical analogy*. British Journal of Applied Physics, 1952. 3(2): p. 50.
16. Newton, D., R. James, and D. Bartholomew, *Building energy simulation-a user's perspective*. Energy and Buildings, 1988. 10(3): p. 241-247.
17. Clarke, J.A., *Energy simulation in building design*. 2001: Routledge.
18. Crawley, D.B. *Creating weather files for climate change and urbanization impacts analysis*. in *Building Simulation*. 2007. IBPSA Beijing.
19. Murphy, J., *Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques*. International Journal of Climatology, 2000. 20(5): p. 489-501.
20. Mylona, A., *The use of UKCP09 to produce weather files for building simulation*. Building Services Engineering Research and Technology, 2012. 33(1): p. 51-62.
21. Levermore, G. and J. Parkinson, *Analyses and algorithms for new Test Reference Years and Design Summer Years for the UK*. Building services engineering research and technology, 2006. 27(4): p. 311-325.



22. Fernández, M., et al., *Generation and evaluation of typical meteorological year datasets for greenhouse and external conditions on the Mediterranean coast*. International journal of biometeorology, 2015. 59(8): p. 1067-1081.
23. Kershaw, T., M. Eames, and D. Coley, *Comparison of multi-year and reference year building simulations*. Building Services Engineering Research and Technology, 2010. 31(4): p. 357-369.
24. Finkelstein, J.M. and R.E. Schafer, *Improved goodness-of-fit tests*. Biometrika, 1971. 58(3): p. 641-645.
25. Yang, L., et al., *Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates*. Energy Conversion and Management, 2008. 49(1): p. 113-124.
26. NCDC, *Test Reference Year*, in *Tape Reference Manual, TD-9706*. 1976, National Climate Data Center, U.S. Dept. of Commerce: Asheville, U.S.
27. Festa, R. and C.F. Ratto, *Proposal of a numerical procedure to select reference years*. Solar Energy, 1993. 50(1): p. 9-17.
28. Lund, H. and S. Eidorff, *Selection methods for production of test reference years*, in *Final Report, Report EUR 7306 EN*. 1981, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark: Lyngby, Denmark.
29. Lund, H., *The Design Reference Year user's manual, Thermal Insulation Laboratory*. Technical University of Denmark: Lyngby, 1995.
30. Eames, M.E., A.P. Ramallo-Gonzalez, and M.J. Wood, *An update of the UK's test reference year: The implications of a revised climate on building design*. Building Services Engineering Research and Technology, 2015. 37(3): p. 316-333.
31. Bilbao, J., et al., *Test reference year generation and evaluation methods in the continental Mediterranean area*. Journal of Applied Meteorology, 2004. 43(2): p. 390-400.
32. Wilcox, S. and W. Marion, *Users manual for TMY3 data sets*. 2008: National Renewable Energy Laboratory Golden, CO.

33. Lam, J.C., S.C. Hui, and A.L. Chan, *A statistical approach to the development of a typical meteorological year for Hong Kong*. *Architectural Science Review*, 1996. 39(4): p. 201-209.
34. Ecevit, A., B. Akinoglu, and B. Aksoy, *Generation of a typical meteorological year using sunshine duration data*. *Energy*, 2002. 27(10): p. 947-954.
35. Yang, L., et al., *A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies*. *Energy*, 2011. 36(10): p. 6121-6129.
36. Hall, I.J., et al., *Generation of a typical meteorological year*. 1978, Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA).
37. Marion, W. and K. Urban, *User's Manual for TMY2s: Typical Meteorological Years: Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base*. 1995: National Renewable Energy Laboratory.
38. Stoffel, T.L. and M.D. Rymes, *Production of the weather year for energy calculations version 2 (WYEC2) data files/Discussion*. *ASHRAE Transactions*, 1998. 104: p. 487.
39. Thevenard, D.J. and A.P. Brunger, *The development of typical weather years for international locations: part I, algorithms*. *ASHRAE Transactions*, 2002. 108: p. 376-383.
40. Huang, Y.J., *Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP1477)*. *ASHRAE Transactions*, 2014. 120: p. 340-355.
41. Huang, J., *ASHRAE Research Project 1477-RP–Development of over 2,500 weather files for international locations*. Final Report. ASHRAE, 2010.
42. Jentsch, M.F., et al., *Limitations of the CIBSE design summer year approach for delivering representative near-extreme summer weather conditions*. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2014. 35(2): p. 155-169.
43. Yang, L., H. Yan, and J.C. Lam, *Thermal comfort and building energy consumption implications—a review*. *Applied Energy*, 2014. 115: p. 164-173.
44. Holmes, M.J. and J.N. Hacker, *Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century*. *Energy and Buildings*, 2007. 39(7): p. 802-814.

45. Coley, D., T. Kershaw, and M. Eames, *A comparison of structural and behavioural adaptations to future proofing buildings against higher temperatures*. Building and Environment, 2012. 55: p. 159-166.
46. Pernigotto, G., et al., *Analysis and improvement of the representativeness of EN ISO 159274 reference years for building energy simulation*. Journal of Building Performance Simulation, 2014. 7(6): p. 391-410.
47. Kalamees, T., et al., *Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard*. Energy and Buildings, 2012. 47: p. 53-60.
48. CIBSE Guide J, *Weather, solar and illuminance data*. Chartered Institution of Building Services Engineers, 2002.
49. Hacker, J., S. Belcher, and A. White, *Design Summer Years for London (CIBSE TM49)*. 2014, Chartered Institution of Building Services Engineers.
50. Eames, M.E., *An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design*. Building Services Engineering Research and Technology, 2016
51. CIBSE Guide A, *Environmental design*. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2015.
52. ASHRAE, A.S., *Standard 55-2013*. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013.
53. Kyselý, J. and M. Dubrovský, *Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: effects of interdiurnal and interannual variability reproduction*. International Journal of Climatology, 2005. 25(2): p. 251-269.
54. Jentsch, M.F., M.E. Eames, and G.J. Levermore, *Generating near-extreme Summer Reference Years for building performance simulation*. Building Services Engineering Research and Technology, 2015. 36(6): p. 503-522.
55. Levermore, G.J., et al., *Deriving and using future weather data for building design from UK climate change projections: an overview of the COPSE Project*. 2012.

56. Watkins, R., G. Levermore, and J. Parkinson, *The design reference year—a new approach to testing a building in more extreme weather using UKCP09 projections*. Building Services Engineering Research and Technology, 2013. 34(2): p. 165-176.
57. Du, H., C. Underwood, and J. Edge, *Generating design reference years from the UKCP09 projections and their application to future air-conditioning loads*. Building Services Engineering Research and Technology, 2012. 33(1): p. 63-79.
58. Ferrari, D. and T. Lee. *Beyond TMY: climate data for specific applications*. in *Proceedings 3rd International Solar Energy Society conference—Asia Pacific region (ISES-AP-08)*. 2008. Citeseer.
59. Narowski, P., M. Janicki, and D. Heim. *Comparison of Untypical Meteorological Years (UMY) and their influence on building energy performance simulations*. in *Proc. of Conference “Building Simulation—BS2013”, Le Bourget-du-Lac*. 2013.
60. Liu, C., et al., *Future probabilistic hot summer years for overheating risk assessments*. Building and Environment, 2016. 105: p. 56-68.
61. Matzarakis, A. and B. Amelung, *Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans*, in *Seasonal forecasts, climatic change and human health*. 2008, Springer. p. 161-172.
62. Eames, M., T. Kershaw, and D. Coley, *On the creation of future probabilistic design weather years from UKCP09*. Building Services Engineering Research and Technology, 2010. 32(2): p. 127-142.
63. Eames, M., T. Kershaw, and D. Coley, *A comparison of future weather created from morphed observed weather and created by a weather generator*. Building and Environment, 2012. 56: p. 252-264.
64. Cai, Y. and D. Hames, *Minimum sample size determination for generalized extreme value distribution*. Communications in Statistics—Simulation and Computation®, 2010. 40(1): p. 87-98.
65. Fatichi, S., V.Y. Ivanov, and E. Caporali, *Simulation of future climate scenarios with a weather generator*. Advances in Water Resources, 2011. 34(4): p. 448-467.

66. Furrer, E.M. and R.W. Katz, *Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators*. Water Resources Research, 2008. 44(12).
67. Ailliot, P., et al., *Stochastic weather generators: an overview of weather type models*. Journal de la Société Française de Statistique, 2015. 156(1): p. 101-113.
68. Richardson, C.W. and D.A. Wright, *WGEN: A model for generating daily weather variables*. 1984, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Washington, DC.
69. Wallis, T.W. and J.F. Griffiths, *An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC)*. Agricultural and Forest Meteorology, 1995. 73(1): p. 115-133.
70. Nicks, A. and G. Gander. *CLIGEN: A weather generator for climate inputs to water resource and other models*. in *Proc. Fifth Int. Conf. on Computers in Agriculture*. 1994.
71. Hayhoe, H. and D. Stewart, *Evaluation of CLIGEN and WXGEN weather data generators under Canadian conditions*. Canadian Water Resources Journal, 1996. 21(1): p. 53-67.
72. Kou, X., et al., *Validation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation data from the Loess Plateau, China*. Journal of hydrology, 2007. 347(3): p. 347-357.
73. Stöckle, C., et al. *ClimGen: a flexible weather generation program*. in *2nd International Symposium Modelling Cropping Systems. Florence, Italy*. 2001.
74. Castillo, E., et al., *Extreme value and related models with applications in engineering and science*. 2005: Wiley Hoboken, NJ.
75. El Adlouni, S., B. Bobée, and T. Ouarda, *On the tails of extreme event distributions in hydrology*. Journal of Hydrology, 2008. 355(1): p. 16-33.
76. Dubrovsky, M., *Met&Roll: the stochastic generator of daily weather series for the crop growth model*. Meteorological Bulletin, 1996. 49: p. 97-105.
77. Jones, P. and M. Salmon, *Development and integration of a stochastic weather generator into a crop growth model for European agriculture*. MARS Project, Final Report

to Institute of Remote Sensing Applications, Agricultural Information Systems (ISPRA), Contract, 1995(5631-93): p. 12.

78. Watts, M., C. Goodess, and P. Jones, *The CRU Daily Weather Generator: BETWIXT technical Briefing Note 1*. The Climate Research Unit, 2004.

79. Chen, J., F.P. Brissette, and R. Leconte, *A daily stochastic weather generator for preserving low-frequency of climate variability*. Journal of hydrology, 2010. 388(3): p. 480-490.

80. Chen, J., F. Brissette, and R. Leconte, *WeaGETS—a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature*. Procedia Environmental Sciences, 2012. 13: p. 2222-2235.

81. Kreienkamp, F., A. Spekat, and W. Enke, *The weather generator used in the empirical statistical downscaling method, WETTREG*. Atmosphere, 2013. 4(2): p. 169-197.

82. Yiou, P., *Anawege: a weather generator based on analogues of atmospheric circulation*. Geoscientific Model Development, 2014. 7(2): p. 531-543.

83. Zorita, E., et al., *Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation*. Journal of Climate, 1995. 8(5): p. 1023-1042.

84. Yiou, P., et al., *Ensemble reconstruction of the atmospheric column from surface pressure using analogues*. Climate dynamics, 2013. 41(5-6): p. 1333-1344.

85. Le Bras, J. and V. Masson, *A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale*. Frontiers in Earth Science, 2015. 3: p. 27.

86. Remund, J. and S. Kunz, *METEONORM: Global meteorological database for solar energy and applied climatology*. 1997: Meteotest.

87. Remund, J., et al. *The use of Meteororm weather generator for climate change studies*. in *10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept. 13-17, 2010 in Zürich, Switzerland*. <http://meetings.copernicus.org/ems2010/>, id. EMS2010-417. 2010.

88. Ebrahimpour, A. and M. Maerefat, *A method for generation of typical meteorological year*. Energy Conversion and Management, 2010. 51(3): p. 410-417.

89. Semenov, M.A., E.M. Barrow, and A. Lars-Wg, *A stochastic weather generator for use in climate impact studies*. User Manual, Hertfordshire, UK, 2002.
90. King, L.M., A.I. McLeod, and S.P. Simonovic, *Improved weather generator algorithm for multisite simulation of precipitation and temperature*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2015. 51(5): p. 1305-1320.
91. Soltani, A., N. Latifi, and M. Nasiri, *Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations*. Agricultural and forest meteorology, 2000. 102(1): p. 1-12.
92. Semenov, M.A., et al., *Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates*. Climate research, 1998. 10(2): p. 95-107.
93. Ababaei, B., et al., *Evaluation of a stochastic weather generator in different climates*. Computer and Information Science, 2010. 3(3): p. 217-229.
94. Smith, S.T. and V.I. Hanby, *Methodologies for the generation of design summer years for building energy simulation using UKCP09 probabilistic climate projections*. Building Services Engineering Research and Technology, 2012. 33(1): p. 9-17.
95. Goodess, C., et al., *Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models: a review of existing methods and options for development*. Integrated Assessment, 2003. 4(3): p. 145-171.
96. Semenov, M.A., *Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator*. Climate Research, 2008. 35(3): p. 203-212.
97. Chen, J. and F.P. Brissette, *Comparison of five stochastic weather generators in simulating daily precipitation and temperature for the Loess Plateau of China*. International Journal of Climatology, 2014. 34(10): p. 3089-3105.
98. Wilby, R., et al., *Evidence needed to manage freshwater ecosystems in a changing climate: turning adaptation principles into practice*. Science of the Total Environment, 2010. 408(19): p. 4150-4164.
99. Christerson, B.v., J.-P. Vidal, and S.D. Wade, *Using UKCP09 probabilistic climate information for UK water resource planning*. Journal of Hydrology, 2012. 424: p. 48-67.

100. Ebinger, J.O., *Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation*. 2011: World Bank Publications.
101. Nakicenovic, N., et al., *Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, 595pp. ISBN 0, 2000. 521(80493): p. 608.
102. Girod, B., et al., *The evolution of the IPCC's emissions scenarios*. Environmental science & policy, 2009. 12(2): p. 103-118.
103. Pachauri, R.K., et al., *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. R.K. Pachauri and L. Meyer. 2014, Geneva, Switzerland: IPCC. 151.
104. Moss, R.H., et al., *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, 2010. 463(7282): p. 747-756.
105. Grotch, S.L. and M.C. MacCracken, *The use of general circulation models to predict regional climatic change*. Journal of Climate, 1991. 4(3): p. 286-303.
106. Nazarenko, L., et al., *Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015. 7(1): p. 244-267.
107. Van der Linden, P. and J. Mitchell, editors, *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009. 160.
108. Mearns, L., et al., *Climate change projections of the North American regional climate change assessment program (NARCCAP)*. Climatic Change, 2013. 120(4): p. 965-975.
109. Jacob, D., et al., *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*. Regional Environmental Change, 2014. 14(2): p. 563-578.
110. Belcher, S., J. Hacker, and D. Powell, *Constructing design weather data for future climates*. Building Services Engineering Research and Technology, 2005. 26(1): p. 49-61.



111. Glenis, V., et al., *A transient stochastic weather generator incorporating climate model uncertainty*. *Advances in Water Resources*, 2015. 85: p. 14-26.
112. Jentsch, M.F., et al., *Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates*. *Renewable Energy*, 2013. 55: p. 514-524.
113. Meehl, G., et al., *The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007. 88: p. 1383-1394.
114. Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl, *An overview of CMIP5 and the experiment design*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012. 93(4): p. 485.
115. Meinshausen, M., et al., *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*. *Climatic change*, 2011. 109(1-2): p. 213-241.
116. Nemani, R., et al., *Collaborative supercomputing for global change science*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011. 92(13): p. 109-110.
117. Thrasher, B., et al., *Downscaled climate projections suitable for resource management*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2013. 94(37): p. 321-323.
118. Stoner, A.M., et al., *An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables*. *International Journal of Climatology*, 2013. 33(11): p. 2473-2494. 116.
119. Hulme, M., J. Turnpenny, and G.J. Jenkins, *Climate change scenarios for the United Kingdom: the UKCIP02 briefing report*. 2002: Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia Norwich, UK.
120. Fowler, H. and C. Kilsby. *Future increases in UK water resource drought projected by a regional climate model*. in *Proceedings of the BHS International Conference on Hydrology: Science & Practice for the 21st Century*. 2004.
121. Kilsby, C., et al., *A daily weather generator for use in climate change studies*. *Environmental Modelling & Software*, 2007. 22(12): p. 1705-1719.
122. Murphy, J.M., et al., *UK climate projections science report: climate change projections*. 2009.

123. Jenkins, G., et al., UK Climate Projections science report: Climate change projections, in UK09 Briefing Report. 2009, UK Climate Projections. p. 10.
124. Sexton, D.M., et al., Multivariate probabilistic projections using imperfect climate models part I: outline of methodology. *Climate Dynamics*, 2012. 38(11-12): p. 2513-2542.
125. Sexton, D.M. and J.M. Murphy, Multivariate probabilistic projections using imperfect climate models. Part II: robustness of methodological choices and consequences for climate sensitivity. *Climate Dynamics*, 2012. 38(11-12): p. 2543-2558.
126. Betts, R. and M. Best, Relative impacts of radiative forcing, landscape effects and local heat sources on simulated climate change in urban areas. Report number UKCIP BETWIXT Project Technical Briefing Note, 2004. 6.
127. Kilsby, C., A. Moaven-Hashemi, and P. O'Connell. Simulation of rainfall extremes: fitting to observed annual maxima. in First International Conference on Flood Risk, Institute of Mathematics and its Applications, University of Bath, UK. 2004.
128. UK Met Office, Technical approach to the delivery of new UK Climate Projections (UKCP18 project) Technical briefing note, 2016. V1.
129. Chan, A., Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 2011. 43(10): p. 2860-2868.
130. Lempert, R., et al., Characterizing climate-change uncertainties for decision-makers. An editorial essay. *Climatic Change*, 2004. 65(1): p. 1-9.
131. Jones, P., et al., Perturbing a weather generator using change factors derived from regional climate model simulations. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011. 18(4): p. 503-511.
132. Tebaldi, C., et al., Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 2005. 18(10): p. 1524-1540.

133. Nik, V.M., Making energy simulation easier for future climate—Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs). *Applied Energy*, 2016. 177: p. 204-226.
134. Cox, R.A., et al., Simple future weather files for estimating heating and cooling demand. *Building and Environment*, 2015. 83: p. 104-114.
135. Vandentorren, S., et al., Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health*, 2004. 94(9): p. 1518-1520.
136. IPCC, Climate Change 2013: Summary for policy makers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. contribution of Working Group I. 2013*, Intergovernmental Panel on Climate Change
137. Meehl, G.A. and C. Tebaldi, More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004. 305(5686): p. 994-997.
138. Perkins, S.E. and L.V. Alexander, On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 2013. 26(13): p. 4500-4517.
139. Bateson, A., Comparison of CIBSE thermal comfort assessments with SAP overheating assessments and implications for designers. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2016. 37(2): p. 243-251.
140. Holmes, S.H., T. Phillips, and A. Wilson, Overheating and passive habitability: indoor health and heat indices. *Building Research & Information*, 2016. 44(1): p. 1-19.
141. De Freitas, C. and E. Grigorieva, A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International journal of biometeorology*, 2015. 59(1): p. 109-120.
142. Branković, Č., et al., Downscaling of ECMWF ensemble forecasts for cases of severe weather: Ensemble statistics and cluster analysis. *Monthly weather review*, 2008. 136(9): p. 3323-3342.
143. Russo, S., et al., Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2014. 119(22): p. 1250012512.

144. Koffi, B. and E. Koffi, Heat waves across Europe by the end of the 21st century: multiregional climate simulations. *Climate Research*, 2008. 36(2): p. 153-168.
145. Fischer, E.M. and C. Schar, Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 2010. 3(6): p. 398-403.
146. Easterling, D.R., et al., Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000. 289(5487): p. 2068-2074.
147. Kysely, J., Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect? *International Journal of Climatology*, 2010. 30(1): p. 89-109.
148. Furrer, E.M., et al., Statistical modeling of hot spells and heat waves. *Climate Research*, 2010. 43(3): p. 191-205.
149. Herrera, M., et al., Quantile regression ensemble for summer temperatures time series and its impact on built environment studies, in 8th International Congress on Environmental Modelling and Software, iEMSs, Sabine Sauvage, Jose-Miguel Sanchez-Perez, and A. Rizzoli, Editors. 2016: Toulouse, France. p. 602-609.
150. Hacker, J., et al., Climate change and the indoor environment: impacts and adaptation. 2005: Chartered Institution of Building Services Engineers. 29.
151. ASHRAE, ASHRAE Handbook: Fundamentals. 2009, Tullie Circle, N.E.: American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers, Incorporated.
152. UK Dept. of Health, Heating and ventilation of health sector buildings. Health technical memoranda, 2007. 03-01.
153. Mortimer, D., Controlling humidity for healthier hospitals. *Health estate*, 2015. 69(1): p. 3943.
154. National-Statistics, English housing survey 2014 to 2015: headline report. 2016, Dept. for Communities and Local Gov. UK.
155. Sakka, A., et al., On the thermal performance of low income housing during heat waves. *Energy and Buildings*, 2012. 49: p. 69-77.
156. Chua, K., et al., Achieving better energy-efficient air conditioning—a review of technologies and strategies. *Applied Energy*, 2013. 104: p. 87-104.

157. Vellei, M., A review of factors affecting environmental and economic life-cycle performance for electrically-driven heat pumps, in JRC Science and Policy Reports. 2014, European Commission: Luxembourg. p. 36.

158. Al-Salim, K., I. Andonovic, and C. Michie, Cyclic blackout mitigation and prevention using semi-dispatchable standby generation and stratified demand dispatch. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2015. 4: p. 29-42.

159. Fitcher, J.A., T. Kershaw, and G. Mills, Urban form and function as building performance parameters. *Building and environment*, 2013. 62: p. 112-123.