

СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА В МЕТЕОПРОГНОЗУВАННІ ДЛЯ РОЗУМНОГО МІСТА НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

В статті використано підхід цифрового двійника для покращення точності метеопрогнозів у контексті розумних міст. Описано процес розробки та імплементації цифрового двійника на мобільній платформі з метою покращення якості та доступності метеорологічної інформації для мешканців міст.

Детально розглядаються основні аспекти створення цифрового двійника: збір та аналіз метеорологічних даних, обробка інформації з датчиків, використання штучних інтелектуальних алгоритмів для прогнозування погодних умов. Також розглядаються можливості мобільної платформи для зручного та ефективного використання цифрового двійника метеопрогнозування користувачами.

Результати дослідження підтверджують, що використання цифрового двійника у метеопрогнозуванні дозволяє значно покращити точність прогнозів та забезпечити швидкий доступ до актуальної інформації про погоду. Ця інноваційна технологія має великий потенціал для застосування в сучасних розумних містах, де точний та своєчасний метеопрогноз стає важливим чинником для підвищення комфорту та безпеки громадян.

Ключові слова: цифровий двійник, метеопрогнозування, смарт сіті, мобільна платформа, збір даних, аналіз даних, прогнозування подій.

Вступ

У сучасному технологічному суспільстві, що стрімко розвивається, розумні міста стають не просто метою, а невід'ємною частиною забезпечення комфортного та ефективного життя його мешканців. Однією з найважливіших сфер інновацій у розумних містах є прогнозування погоди, яка має значний вплив на повсякденне життя та безпеку громадян.

Оскільки погодні умови є динамічними та мінливими, надання точних та своєчасних прогнозів погоди є складним завданням для сучасних систем прогнозування. Традиційні підходи до прогнозування погоди часто мають обмеження і можуть бути менш ефективними в умовах мінливого клімату. У цьому контексті створення цифрових двійників стає перспективним рішенням для підвищення точності та надійності прогнозів погоди в розумних містах. Цифровий двійник – це віртуальна модель реального об'єкта, яка постійно поповнюється даними з різних джерел. За допомогою цифрового двійника можна використовувати віртуальне представлення явища або системи для більш точного прогнозування та аналізу його поведінки.

Ця стаття описує застосування цифрових двійників у прогнозуванні погоди в розумному місті на мобільних платформах. Метою дослідження є покращення якості та доступності погодної інформації для мешканців міста, забезпечення їхньої безпеки та підвищення комфорту. У цій статті розглядаються основні аспекти створення цифрового двійника, вплив цього підходу на точність прогнозів та можливість його впровадження на мобільних платформах для зручності користувачів.

Використання цифрового двійника у прогнозуванні погоди може відкрити нові горизонти у розвитку розумних міст та покращити якість життя їх мешканців. Дана робота є важливим внеском у дослідження даної тематики та представляє перспективні шляхи оптимізації прогнозування погоди в міському середовищі.

1. Цифрові двійники в метеорологічному прогнозуванні

Цифрові двійники відіграють важливу роль у підвищенні якості та надійності прогнозів погоди. Цифровий двійник — це віртуальне моделювання атмосферних

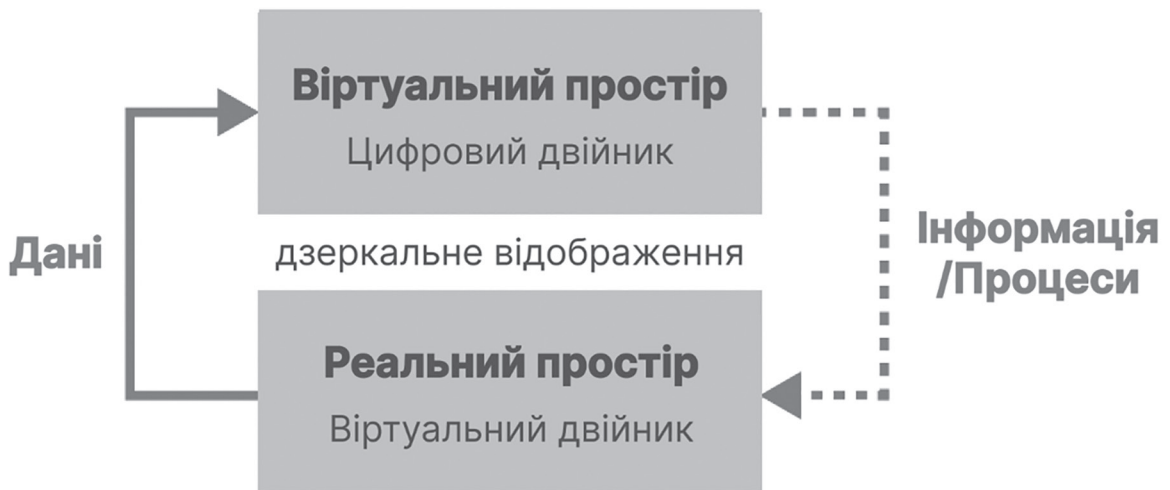


Рис. 1. Створення цифрових копій

умов і погодних явищ на основі зібраних метеорологічних даних. Ці дані надходять із різних інструментів, таких як супутники, радари та метеорологічні станції, і включають такі параметри, як температура, вологість, тиск і вітер.

Цифрові двійники використовуються для моделювання фізичних процесів, що відбуваються в атмосфері, і прогнозування погодних умов на основі наявних даних. Цифрові двійники можуть аналізувати великі обсяги інформації та встановлювати складні взаємозв'язки між різними метеорологічними факторами. Як результат, цифрові двійники можуть надавати більш точні та комплексні прогнози, передбачати зміни погодних режимів та допомагати зрозуміти причинно-наслідкові зв'язки між погодними явищами.

Використання цифрових двійників для прогнозування погоди має низку переваг. Це може зменшити ризик людської помилки, яка може виникнути під час обробки та інтерпретації погодних даних.

Цифрові двійники також можуть ефективно обробляти великі обсяги інформації і давати більш точні прогнози, беручи до уваги різні фактори, що впливають на погоду. Вони також можуть використовуватися для візуалізації погодних явищ, допомагаючи синоптикам і користувачам краще розуміти і аналізувати погоду.

Прикладом використання цифрових двійників у прогнозуванні погоди є гло-

бальне кліматичне моделювання. Цифрові двійники допомагають створювати віртуальні представлення атмосфери, океанів та інших кліматичних компонентів земної системи. Ці моделі дозволяють вивчати довгострокові кліматичні тренди та аналізувати зміни в розподілі температури, опадів, рівня моря та інших кліматичних параметрів. Використання цифрових двійників у кліматичних дослідженнях може допомогти спрогнозувати майбутні зміни клімату та їхній вплив на планету. Іншим прикладом використання цифрових двійників є погодні моделі для короткострокового прогнозування. Ці моделі використовуються для прогнозування погоди на кілька годин або днів наперед. Моделі базуються на використанні атмосферних цифрових двійників, побудованих на основі існуючих погодних даних. Ці моделі можуть прогнозувати температуру, вітер, опади та інші погодні параметри з високою точністю та часовою роздільною здатністю. Це покращує якість короткострокових прогнозів і допомагає людям планувати свої дії відповідно до майбутніх погодних умов.

Цифрові двійники також використовуються для прогнозування екстремальних погодних явищ, таких як урагани, торнадо і зливи. Ці моделі дозволяють виявити закономірності та особливості, що передують таким подіям, і з достатньою впевненістю випускати попередження. Використання

цифрових двійників у прогнозуванні екстремальних погодних умов може врятувати життя і майно та підвищити загальну громадську безпеку.

Використання цифрових двійників у прогнозуванні погоди дає низку переваг, які сприяють підвищенню якості та точності прогнозів погоди. Деякі з переваг цифрових двійників у прогнозуванні погоди включають:

- підвищення точності прогнозів. Цифрові двійники дозволяють моделювати та відтворювати поведінку атмосферних процесів більш точно. Це приводить до більш надійних прогнозів погоди, меншої кількості помилок і точнішої інформації для користувачів;

- покращення роздільної здатності прогнозів. Цифрові двійники дозволяють фіксувати погодні явища в більш тонких просторових і часових масштабах. Це дозволяє складати прогнози погоди з вищою роздільною здатністю та отримувати детальнішу інформацію про погодні умови в конкретних регіонах;

- моделювання складних залежностей. Цифровий двійник дозволяє ідентифікувати та аналізувати складні залежності атмосферних процесів, які впливають на погоду. Це дає краще розуміння метеорологічних явищ та їх взаємодії, а також дозволяє прогнозувати майбутній розвиток подій;

- ефективне використання наявних даних. Цифрові двійники можуть інтегрувати великі обсяги погодних даних з різних джерел і використовувати їх для створення точних і всебічних прогнозів. Здатність обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу, включаючи дані із супутників і наземних датчиків, забезпечує актуальну і повну інформацію про атмосферні умови.

Використання цифрового двійника в прогнозуванні погоди дозволяє підвищити точність, надійність та ефективність прогнозів погоди. Він став невід'ємною частиною сучасних погодних систем, допомагаючи нам краще розуміти клімат і забезпечувати безпеку та комфорт людей, на яких впливають погодні умови.

2. Метеорологічне прогнозування та ефективне управління розумним містом

Цифрові двійники використовуються в розробці розумної інфраструктури для створення віртуальних моделей фізичних об'єктів, таких як будівлі, міста, енергетичні мережі та транспортні системи. Ці віртуальні моделі дозволяють здійснювати моніторинг, аналіз та управління фізичними об'єктами в режимі реального часу.

Однією з головних переваг використання цифрового двійника є те, що детальну інформацію про стан фізичного об'єкта можна отримати в режимі реального часу. Дані з датчиків, розміщених на фізичних об'єктах, передаються на цифровий двійник, аналізуються і порівнюються з нормальними значеннями. У разі виявлення відхилень, необхідні дії, як-от попередження оператора або активація автоматизованої системи управління для усунення проблеми, можуть бути виконані автоматично.

Крім того, цифровий двійник можна використовувати для прогнозування поведінки фізичних об'єктів на основі зібраних даних. Аналізуючи дані з цифрового двійника, можна виявити тенденції, розпізнати закономірності і передбачити потенційні проблеми та надзвичайні ситуації. Це забезпечує передбачуваність і ефективність в управлінні інфраструктурою міста.

Так, точні метеорологічні прогнози дозволяють:

- Планувати роботу транспорту міста. Наприклад, ожеледиця та снігопад можуть призвести до збільшення аварійності на дорогах, сильний вітер може затримати рейси літаків. Водночас урахування погодних умов дозволить забезпечити пасажирів та оптимізувати роботу транспорту.

- Запобігати стихійним лихам. Точні метеорологічні прогнози дозволяють заздалегідь підготуватися до стихійного лиха, якщо воно неминуче. Якщо ж мова йде, наприклад, про землетруси, то метеопрогноз дозволить вчасно здійснити евакуацію населення.

Також важливо, щоб метеорологічні прогнози були правильними. Адже невірні

метеопрогнози можуть негативно вплинути на різні галузі міського господарства, зокрема:

- Енергетична галузь. Невірні прогнози можуть призвести до дефіциту або профіциту запасів енергії, що негативно може вплинути на кінцевого споживача.
- Сільське господарство. Невірні прогнози можуть вплинути на загибель врожаю або поганий врожай, а у тваринництві на загибель худоби.

У сфері міського планування цифрові двійники можуть допомогти в плануванні та розвитку міст. Вони можуть відображати інформацію про міське середовище, наприклад, про транспортну інфраструктуру і розташування будівель. Це дозволяє моделювати різні сценарії розвитку міст, аналізувати вплив нових будівель та інфраструктурних змін на навколишнє середовище та оптимізувати містобудівні проекти.

Цифровий двійник також може бути використаний для оптимізації енергетичних систем, в тому числі електромереж. Він може відображати такі характеристики, як структура мережі, розподіл навантаження та стан енергоефективності. Цифрові двійники можуть бути використані для розробки стратегій управління енергоспоживанням, виявлення проблем у мережі та аналізу системи з метою підвищення ефективності та надійності системи.

Цифровий двійник також може бути корисним у проектуванні систем водопостачання. Він може показати розташування джерел води, трубопроводів, насосних станцій та інших компонентів системи. А це в свою чергу може допомогти виявити потенційні проблеми, такі як витoki та перевантаження, а також покращити управління системою водопостачання.

Цифрові двійники мають значний потенціал у розвитку розумної інфраструктури, надаючи точну віртуальну модель реальної системи. Вони надають точні віртуальні моделі реальних систем, що дозволяє аналізувати, прогнозувати та управляти системами з високою точністю та ефективністю. Використання цифрових двійників здатна покращити якість життя в містах,

зменшити споживання енергії та ресурсів і сприяти сталому розвитку.

Використання цифрових двійників у розвитку розумних інфраструктур має кілька переваг:

1. Підвищення ефективності: Цифрові двійники дозволяють відстежувати та аналізувати різні аспекти інтелектуальної інфраструктури в режимі реального часу. Це може допомогти визначити більш ефективне використання ресурсів, оптимізувати роботу системи і підвищити продуктивність.

2. Передбачуваність і далекоглядність: цифрові двійники уможливають аналіз великих обсягів даних і виявлення тенденцій. Це дозволяє передбачити майбутні проблеми, виявити ризики та вжити превентивних заходів до того, як вони перетворяться на серйозні проблеми.

3. Зменшення витрат та ризиків. Цифрові двійники можуть зменшити витрати та ризики впровадження нових технологій, рішень та розумних змін в інфраструктурі, забезпечуючи віртуальне тестування та симуляцію. Це дозволяє проводити віртуальні експерименти та аналізувати результати до фізичного впровадження.

4. Забезпечення безпеки та надійності: Цифрові двійники можуть безперервно контролювати стан різних систем та об'єктів розумної інфраструктури. Несправності, аномалії та потенційні проблеми можна швидко виявити та відреагувати на них, запобігаючи аваріям та збоям.

5. Підвищення ефективності управління. Цифровий двійник є корисним інструментом для управління інтелектуальною інфраструктурою. Він надає доступ до важливих даних та аналітики, які можуть допомогти вам приймати обґрунтовані рішення та планувати майбутні кроки.

Ці переваги роблять використання цифрових двійників високоефективним у розробці та управлінні інтелектуальною інфраструктурою, сприяючи її оптимізації, ефективності та стійкості.

Однак треба бути об'єктивними. І після переваг цифрових двійників згадаємо і про недоліки. Зокрема, до недоліків можна віднести наступне:

– Високошвидкісна передача даних. Цифрові двійники потребують високошвидкісної передачі даних між датчиками, системами обробки та користувачами. Це вимагає використання сучасної техніки, високошвидкісного інтернету тощо;

– Зберіганням великих обсягів даних. Для зберігання, обробки, аналізу великих обсягів даних, а також забезпечення їхньої безпеки від кібератак, потрібні дорогі сучасні технології та своєчасне обслуговування. Це потребує значних витрат;

– Інтеграція з іншими системами.

Наразі не існує загальноприйнятих стандартів для цифрових двійників, що може ускладнювати інтеграцію з іншими системами та обмін даними між різними джерелами та користувачами.

3. Функції створення цифрових двійників для метеопрогнозування та приклади впровадження

Як ми вже зазначали, цифровий двійник у метеорології — це віртуальне моделювання атмосферних умов і погодних явищ на основі зібраних метеорологічних даних. Зокрема, визначених методів створення віртуальних моделей включають:

- **Збір та аналіз даних про метеорологічні параметри.** Це один з основних методів, який включає збір даних із метеостанцій, супутників, дронів тощо про температуру, вологість, атмосферний тиск, вітер та інші погодні параметри.
- **Створення двовимірної моделі міста (картографія).** Створюється модель міста з урахуванням його ландшафту, забудови, водних ресурсів та інших об'єктів.
- **Математичне моделювання.** Використовують диференціальні рівняння, статистичні методи та інші інструменти для моделювання атмосферних процесів та погодних явищ.
- **Порівняння результатів моделей.** Порівняння результатів моделювання з реальними метеорологічними даними для виявлення та виправлення невідповідностей між ними.

За кордоном уже є приклади успішного впровадження цифрових двійників у метеорологічному прогнозуванні у містах. Це такі міста, як Шанхай (Китай), Нью-Йорк (США), Роттердам (Нідерланди), Мельбурн (Австралія), місто-держава Сингапур, країна Гренада.

- 1) **Гренада.** 2021 року країна стала першою, хто створив цифрову копію цілої країни, 3D-модель, яку урядовці можуть використовувати для планів сталого розвитку. Як і багато острівних держав, Гренада стикається з невизначеним майбутнім перед зміною клімату. Спека, що посилюється, інтенсивні опади і проникнення солоної води в систему водопостачання і ґрунт почали загрожувати двом основним економікам країни — сільському господарству і туризму (журнал «Lidar», 30.04.2022 р).
- 2) **Сингапур.** Місто-держава розташоване на 63 островах, в тому числі створених штучно. Концепція цифрового двійника була ухвалена Сингапуром ще 2015 року. Система допомагає управляти ресурсами, планувати транспорт, аналізувати наслідки підвищення рівня моря.
- 3) **Роттердам, Нідерланди.** Роттердам — це портове місто. Віртуальна копія міста дозволяє відстежити інтенсивність руху на водних каналах та автошляхах, оптимізувати відкриття/закриття мостів та перенаправляти транспортні потоки в режимі реального часу. Прогнозування погоди дозволяє своєчасно дізнатись про шторм, сильний вітер, що заважає руху суден.
- 4) **Мельбурн, Австралія.** Мельбурн — один з основних комерційних та промислових центрів Австралії — розташовано навколо затоки Порт-Філіп. Тут цифровий двійник використовується для моделювання погодних явищ, зокрема, теплових хвиль.
- 5) **Нью-Йорк, США.** В Нью-Йорку було впроваджено цифровий з метою прогнозування снігопадів, штормів та інших екстремальних погодних

явищ, що дозволяє координувати роботу транспорту, інфраструктури, а також інформувати мешканців про потенційні небезпеки.

Отже, кожне місто використовує технологію цифрових двійників (метавсесвіту) для власних цілей. Однак важливо, що всі двійники є чудовим стратегічним інструментом для розвитку міст у реальному світі.

Враховуючи позитивний досвід метеорологічного прогнозування на основі цифрових двійників, в майбутньому очікується збільшення кількості впровадження цифрових двійників окремими містами та країнами.

4. Розробка цифрового двійника для метеопрогнозування на мобільному телефоні

Для реалізації проєкту створення цифрового двійника в метеопрогнозуванні для розумного міста на мобільній платформі було розроблено додаток мовою Swift для iOS платформи, який використовується в інтернеті речей для реалізації цифрових двійників.

Проєкт складається з трьох основних класів: два класи для користувацького інтерфейсу (UI) та головний клас (Main Class).

Перший UI клас відповідає за відображення карти Києва з використанням фреймворка MapKit. Цей клас забезпечує завантаження карти та можливість рендерингу різних маркерів або шарів на ній, які представляють райони моніторингу якості повітря.

Другий UI клас відповідає за відображення інформації про якість повітря в конкретних районах Києва на карті. Він може відображати дані про забруднення повітря, прогноз погоди та інші метеорологічні дані, необхідні користувачу.

Головний клас (Main Class) виконує основні функції додатка, зокрема, збір даних, взаємодію з цифровим двійником та обробку інформації для відображення на карті.

Для отримання даних про прогноз погоди із сервера використовується фреймворк Alamofire, який дозволяє виконувати HTTP-запити.

Цифровий двійник являє собою програмне представлення реального процесу метеопрогнозування. Він надає необхідні дані про стан атмосфери та прогноз погоди для різних районів Києва. Інформація може бути отримана через API або зберігатися на віддаленому сервері.

В цьому додатку, цифровий двійник використовується для створення програмного представлення реального процесу метеопрогнозування та моніторингу якості повітря на мобільному телефоні. Цифровий двійник (Digital Twin) відображає реальні об'єкти чи процеси у віртуальному середовищі, в якому можна аналізувати, маніпулювати та здійснювати прогнози щодо їх поведінки.

У даному додатку цифровий двійник включає такі компоненти:

1. Збір даних: Цифровий двійник забезпечує збір даних про погоду та якість повітря з різних джерел, таких як датчики, метеорологічні станції, метеорологічні API та інші. Ці дані включають індекс якості повітря з різними показниками.
2. Зберігання даних: Отримані дані зберігаються в цифровому двійнику, що дозволяє зберігати історичні дані та здійснювати їх аналіз.
3. Аналіз даних: Цифровий двійник аналізує зібрані дані, застосовує алгоритми прогнозування та аналізу, щоб передбачити метеопогоду на майбутні години або дні, а також визначити якість повітря у різних районах міста.
4. Взаємодія з додатком: Додаток на мобільному телефоні взаємодіє з цифровим двійником, зчитуючи дані про прогноз погоди та якість повітря для відображення на графічному інтерфейсі. Користувач може отримувати актуальні дані про погоду для різних місць, вибирати райони моніторингу на карті Києва та переглядати детальну інформацію про якість повітря.
5. Прогнозування: З допомогою цифрового двійника, додаток може здійснювати прогноз погоди та якості по-

вітря на основі аналізу історичних даних та алгоритмів прогнозування. Користувачам надається можливість заздалегідь знати очікувані погодні умови та рівень забруднення повітря у вибраних районах.

Отож, додаток забезпечує візуалізацію та доступ до інформації про метеопрогнозування на мобільному телефоні для розумного міста, що допомагає користувачам бути поінформованими про поточні погодні умови та якість повітря у різних частинах Києва. Нижче наведено детальний опис коду:

1. Імпорт бібліотек: SwiftUI, MapKit та Alamofire.

```
import SwiftUI
import MapKit
import Alamofire
```

2. Створення структури MapView, що реалізує протокол UIViewRepresentable. Це інтегрує MKMapView у SwiftUI.

```
struct MapView:
    UIViewRepresentable { ... }
```

3. Масив Kyiv Points, який містить кортежі з географічними координатами і назвами районів Києва.

```
let kyivPoints: [(latitude: Double,
longitude: Double, street: String)] = [
    (50.399373, 30.518903, «Голосіївський район»),
    (50.431209, 30.516795, «Солом'янський район»),
    І так далі...
    (50.513401, 30.617103, «Деснянський район»),]
```

4. Методи makeCoordinator(), makeUIView(context:) та updateUIView(_ :context:) з протоколу UIViewRepresentable для створення і налаштування карти.

```
func makeCoordinator() ->
Coordinator {
    Coordinator(self)
}
```

```
func makeUIView(context:
Context) -> MKMapView {
    let mapView = MKMapView()
    mapView.delegate = context.
coordinator
    mapView.
register(CustomAnnotationView.self, for
AnnotationViewWithReuseIdentifier: MK
MapViewDefaultAnnotationViewReuseId
entifier)
    return mapView
}
```

```
func updateUIView(_ uiView:
MKMapView, context: Context) {
    fetchStations { result in
switch result {
    case .success(let stations):
        DispatchQueue.main.async {
            displayStations(stations: stations,
mapView: uiView)
            setMapRegionToKyiv(mapView:
uiView)
        }
    case .failure(let error):
        print("Error fetching stations: \
(error.localizedDescription)") }}}
```

5. Визначення географічних координат Києва для встановлення регіону (setMapRegionToKyiv(mapView:)), відображення районів якості повітря на карті (displayStations(stations:mapView:)), додавання маркерів (addMarker(at:title:subtitle:mapView:)) та завантаження даних про райони з OpenWeatherMap API (fetchStations(completion:)).

```
func setMapRegionToKyiv(mapView:
MKMapView) {
    let kyivLatitude = 50.450001
    let kyivLongitude = 30.523333 ... }

func displayStations(stations:
[Station], mapView: MKMapView) {
    for (index, station) in stations.
enumerated() {
        let coordinate = CLLocationCoordinate2D(latitude:
kyivPoints[index].latitude, longitude:
kyivPoints[index].longitude)
```

```

func addMarker(at coordinate:
CLLocationCoordinate2D, title:
String, subtitle: String, mapView:
MKMapView) {
    let markerTintColor = UIColor.
systemBlue
    let stationAnnotation =
StationAnnotation(coordinate:
coordinate)

```

```

func fetchStations(completion:
@escaping (Result<[Station], Error>
-> Void) {
    let apiKey = Bundle.main.
object(forKey)
    let group = DispatchGroup()
    var fetchedStations: [Station]
= []
    for point in kyivPoints {
        group.enter()
        let searchUrl = https://api.
openweathermap.org/data/2.5/air_
pollution?lat=\(point.latitude)&lon=\
(point.longitude)&appid=\(apiKey) ... }

```

- Створення класу CustomAnnotationView, що наслідує MKMarkerAnnotationView, і класу StationAnnotation, що наслідує NSObject і реалізує протокол MKAnnotation. Вони забезпечують налаштування вигляду аотацій.

```

class CustomAnnotationView:
MKMarkerAnnotationView { ...
    class StationAnnotation:
NSObject, MKAnnotation { ... }

```

- Структури ApiResponse, Coordinate, Station, MainInfo та Components для декодування JSON з OpenWeatherMap API.

```

struct ApiResponse: Codable { ...
struct Coordinate: Codable { ...
struct Station: Codable { ...
struct MainInfo: Codable { ...
struct Components: Codable {
...}}}}

```

Загалом, код демонструє створення цифрового двійника та детальний опис повітря у режимі реального часу, відображення карти Києва з районами моніторингу якості

повітря, а також допоміжний екран з деталями про кожний район і склад повітря в ньому. Застосування цифрового двійника у додатку дозволяє створити програмне представлення реального процесу метеопрогнозування, що зберігає та обробляє інформацію про стан атмосфери та погодні умови у різних місцях міста. Завдяки цьому, додаток може оперативно надавати актуальні дані користувачам, що робить його надзвичайно корисним для повсякденного використання.



Рис. 3. Розробка мобільного додатку прогнозування погоди Digital Twin

Висновки

Створення цифрового двійника в метеопрогнозуванні для розумного міста на мобільній платформі є важливим та перспективним напрямом. В статті запропоновано створення цифрового двійника. Проект такого додатка дозволяє надавати користувачам зручний доступ до актуальної інформації про якість повітря та прогноз погоди для різних районів міста, що є особливо важливим в умовах зростання екологічних проблем та кліматичних змін. Застосування мови програмування Swift та фреймворків MapKit та Alamofire дозволяє зручно та ефективно реалізувати функціонал додатка. Мова SwiftUI сприяє швидкій розробці інтерфейсу та забезпечує його гарний зовнішній вигляд.

Цифровий двійник, який відображає реальний процес метеопрогнозування, є ключовою складовою додатка. Він надає доступ до актуальних даних про погодні

умови, допомагає прийняти об'єктивні рішення та підвищує рівень свідомості користувачів щодо впливу клімату на їхнє здоров'я та навколишнє середовище.

Застосування цифрового двійника у метеопрогнозуванні є однією з інноваційних технологій, яка покращує якість життя в містах та допомагає ефективніше використовувати ресурси. Завдяки таким проектам, міста стають більш стійкими до змін клімату, а мешканці мають можливість бути в курсі погодних умов та приймати свої обґрунтовані рішення на основі надійної інформації.

У майбутньому, розвиток цифрових двійників та їх інтеграція в мобільні додатки можуть забезпечити ще точніший та індивідуалізований метеопрогноз для користувачів. А це допоможе покращити якість життя, зменшити негативний вплив кліматичних змін та забезпечити більш стійку розвинену екологію.

Література:

1. D. Botín-Sanabria, Adriana-Simona Mihaita, Rodrigo E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. Ramírez-Mendoza, J. Lozoya-Santosless (2022) Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review
2. Mohd Javaid, Abid Haleem, Rajiv Suman (2023) Digital Twin applications toward industry 4.0
3. Zhang, X., & Xie, M. (2020). Digital twin: A survey from data acquisition to virtual reality visualization. *IEEE Access*, 8, 108951-108969.
4. Martínez, J. F., Lozano, R., & García, R. (2019). Digital twin implementation for industrial machine condition monitoring. *Sensors*, 19(24), 5512.
5. Liu, Y., & Peng, F. (2020). A digital twin-based approach for real-time energy management of smart cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(5), 3492-3501.
6. Bhattacharya, S., Sardar, S., Bandyopadhyay, S., & Dutta, S. (2020). Digital twin for smart city applications: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(6), 4177-4189.
7. Luo, Z., Chen, X., Luo, Q., Wang, W., & Tang, L. (2020). Digital twin-based energy management system for smart cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2725-2734.
8. Cha, S., & Lee, J. (2019). Digital twin-based real-time monitoring system for smart buildings. *Energies*, 12(22), 4287.
9. Yan, Y., & Gu, F. (2019). Digital twin-driven design for cyber-physical energy systems in smart cities. *Journal of Cleaner Production*, 221, 268-278.
10. Magazine «Lidar» (2022) Linda Peters (<https://lidarmag.com/2022/04/30/climate-change-prompts-grenada-to-create-the-first-national-digital-twin/>)

Одержано: 07.08.2023

Про авторів:

Гайдукевич Владислав Олегович, аспірант Інституту програмних систем НАН України.

Кількість наукових публікацій в українських виданнях – 1.
<https://orcid.org/0000-0002-0614-6778>

Дорошенко Анатолій Юхимович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу теорії комп'ютерних обчислень Інституту програмних систем НАН України, професор кафедри автоматики і управління в технічних системах НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Кількість наукових публікацій в українських виданнях – понад 180. Кількість наукових публікацій в іноземних виданнях – понад 70. Індекс Гірша – 6.
<http://orcid.org/0000-0002-8435-1451>,

Місце роботи авторів:

Інститут програмних систем НАН України, 03187, м. Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 40.
e-mail: doroshenkoanatoliy2@gmail.com, gaidukevichvlad@gmail.com