

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»
Кафедра мультимедійних систем факультету інформатики

**ІОТ: ПЕРСОНАЛІЗОВАНИЙ МОНІТОРИНГ УФ
З МОДЕЛЛЮ ОПТИМІЗАЦІЇ СОНЯЧНОГО ЖИВЛЕННЯ**

Текстова частина до кваліфікаційної роботи
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Керівник кваліфікаційної роботи
Старший викладач
Смиш Олег Русланович

_____ 2025 р.
« ____ » _____

Виконав студент ІПЗ-4
Шевченко Олександр Олександрович
« ____ » _____ 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»
Кафедра мультимедійних систем факультету інформатики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри мультимедійних систем,

Доцент., к. ф.-м. н. О.П. Жежерун

_____ (підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

студентові 4 року навчання БП «Інженерія програмного забезпечення»
факультету інформатики Шевченку Олександрю Олександровичу

ТЕМА: IoT: персоналізований моніторинг УФ з моделлю оптимізації
сонячного живлення

Зміст текстової частини до кваліфікаційної роботи:

1. Анотація.
2. Вступ.
3. Огляд наявних рішень та дослідження чисельного визначення допустимої
УФ-дозы.
4. Розроблення апаратного та програмних засобів системи моніторингу УФ-
випромінювання.
5. Результати та апробація досліджень.
6. Висновки.
7. Список використаних джерел.

Дата видачі « ____ » _____ 2024 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання отримав

_____ (підпис)

Тема:

IoT: персоналізований моніторинг УФ з моделлю оптимізації сонячного живлення.

Календарний план виконання роботи:

№ п/п	Назва етапу курсової роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на курсову роботу	01.09.2024	
2	Огляд літератури за темою роботи	02.09.2024 – 01.03.2025	
3	Провести аналізування наявних рішень для моніторингу ультрафіолетового (УФ) випромінювання	02.09.2024 – 01.11.2024	
4	Дослідити методи чисельного представлення дози УФ-опромінення	02.09.2024 – 01.03.2025	
5	Сформулювати вимоги до системи моніторингу й архітектуру проекту	01.11.2024 – 01.12.2024	
6	Розробити макет пристрою для збору даних про довкілля	01.01.2025 – 01.03.2025	
7	Створити мобільний застосунок для комунікації з розробленим макетом пристрою	01.02.2025 – 01.04.2025	
8	Здійснити збір даних за допомогою макету пристрою	01.03.2025 – 01.04.2025	
9	Розробити модель нейронної мережі для прогнозування та оптимізації використання сонячної енергії	01.04.2025 – 01.05.2025	
10	Провести тестування та оцінку точності моделі	15.04.2025 – 03.05.2025	
11	Остаточне оформлення текстової частини роботи та презентації	20.04.2025 – 19.05.2025	
12	Захист кваліфікаційної роботи	04.06.2025	

АНОТАЦІЯ

Шевченко О.О. IoT: персоналізований моніторинг УФ з моделлю оптимізації сонячного живлення. – Кваліфікаційна робота за спеціалізацією 121 «Інженерія програмного забезпечення». – Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена створенню пристрою для контролю ультрафіолетового (УФ) випромінювання.

У роботі розглянуто наявні рішення щодо контролю УФ-випромінювання. Також розглянуті чинники, які впливають на ефективний час дії сонцезахисних кремів та методи чисельної оцінки допустимої дози ультрафіолетового опромінення.

Розглянуто побудову енергоощадного приладу для моніторингу ультрафіолетового випромінювання та інших параметрів навколишнього середовища, з фокусом на вибір компонентів, передавання даних через Bluetooth Low Energy, збереження інформації та збір даних. Також описано структуру мобільного застосунку, систему збереження даних, взаємодію через Bluetooth Low Energy та механізм сповіщень. Окрім того, розглянуто створення нейронної мережі для прогнозування заряду батареї – етапи підготовки даних, архітектуру мережі та оцінку її точності.

Представлені результати проведених досліджень, що стосуються створення системи моніторингу ультрафіолетового випромінювання. Також детально описана робота мобільного застосунку, який є частиною цієї системи, зокрема, розглянуто його інтерфейс та механізми взаємодії користувача з програмою.

Результатом проведеної роботи стало створення комплексної системи моніторингу УФ-випромінювання, що сформовано з енергоощадного пристрою, мобільного застосунку та моделі нейронної мережі для прогнозування зміни заряду батареї. Розроблений пристрій успішно забезпечує збір, збереження та передавання даних через Bluetooth Low Energy, що підтверджено експериментальними тестуваннями в різних умовах. Мобільний застосунок надає інтерфейс для користувачів, надаючи можливість відстежувати рівень УФ-опромінення, а також налаштовувати персоналізовані параметри, як фототип шкіри, мінімальна еритемна доза (MED), моменти нанесення сонцезахисного крему, і отримувати своєчасні сповіщення. Впроваджена нейронна мережа на основі Temporal Convolutional Network продемонструвала прийнятну точність прогнозування майбутньої зміни заряду батареї з використанням контексту минулих зібраних даних і прогнозованих параметрів довкілля.

Ключові слова: ультрафіолетове (УФ) випромінювання, моніторинг, персоналізовані сповіщення, мобільний застосунок, MED, IoT, нейронна мережа, TCN, BLE.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	8
Вступ	9
Розділ 1. Огляд наявних рішень та дослідження чисельного визначення допустимої УФ-дозы.....	14
1.1 Наявні рішення	14
1.1.1 Пристрій My Skin Track UV від La Roche-Posay.....	14
1.1.2 Застосунок Dminder.....	17
1.1.3 Застосунки прогнозування погоди.....	19
1.1.4 Системи державного моніторингу.....	21
1.2 Дослідження.....	25
1.2.1 Дослідження ефективності нанесення сонцезахисних кремів.....	25
1.2.2 Дослідження мінімальної еритемної дози та шкала Фіцпатріка....	26
1.3 Висновки до розділу 1.....	28
Розділ 2. Розроблення апаратного та програмних засобів системи моніторингу УФ-випромінювання.....	30
2.1 Розроблення приладдя	30
2.1.1 Вибір компонентів для обладнання.....	30
2.1.1.1 Плата ESP32-C6-Zero	30
2.1.1.2 Датчик УФ-випромінювання GUVA-S12SD	31
2.1.1.3 Датчик температури та вологості SHT30.....	34
2.1.1.4 Датчик освітленості GY-302 BH1750FVI.....	34
2.1.1.5 Блок живлення з зарядкою від сонячної панелі	35
2.1.1.6 Вимірювання напруги акумулятора	36
2.2 Розроблення програмного застосунку для обладнання.....	36
2.2.1 Інструменти та програмне середовище	36
2.2.2 Практичні особливості використання Bluetooth Low Energy.....	37
2.2.3 Імплементация комунікації за допомогою BLE	38

2.2.4 Структура збереження даних	43
2.2.5 Організація збору даних	46
2.3 Розроблення мобільного застосунку для Android	48
2.3.1 Вибір архітектури та інструментів	48
2.3.2 Фрагменти та їхній функціонал	48
2.3.3 Збереження даних на пристрої.....	53
2.3.4 Взаємодія з пристроєм	56
2.3.5 Механізм надсилання сповіщень	59
2.4 Навчання нейронної мережі для прогнозування заряду батареї.....	60
2.4.1 Використання часової мережі згортання TCN	61
2.4.2 Підготовки даних.....	62
2.4.3 Архітектура моделі на основі TCN.....	64
2.5 Висновки до розділу 2.....	67
Розділ 3. Результати та апробація досліджень	68
3.1 Проведені дослідження	68
3.2 Робота мобільного застосунку	70
3.3 Оцінка точності моделі	75
3.4 Висновки до розділу 3.....	77
Висновки.....	78
Список використаних джерел.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AЦП	– аналогово-цифровий перетворювач;
УФ	– ультрафіолетовий;
ADC	– аналогово-цифровий перетворювач (Analog-to-Digital Converter);
API	– прикладний програмний інтерфейс (Application Programming Interface);
ARPANSA	– Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency;
BLE	– Bluetooth low energy (технологія цифрової бездротового передавання даних);
CCCD	– Client Characteristic Configuration Descriptor;
CRUD	– основні функції керування даними: створення, читання, оновлення і вилучення (Create, Read, Update, Delete);
DAO	– Data Access Object;
ESP-IDF	– Espressif IoT Development Framework;
ICRA	– International Cancer Research Agency;
IDE	– Integrated Development Environment (інтегроване середовище розроблення);
IoT	– Internet of Things (Інтернет речей);
I2C	– Inter-Integrated Circuit (послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем);
GATT	– Generic Attribute;
GPU	– Graphics Processing Unit (графічний процесор);
MAE	– Mean Absolute Error (середня абсолютна похибка);
MED	– Minimal Erythema Dose (мінімальна еритемна доза);
MSE	– Mean Squared Error (середньоквадратична похибка);
NFC	– технологія Near Field Communication;
ORM	– Object-Relational Mapping;
R ²	– коефіцієнт детермінації;
RMSE	– Mean squared error (середньоквадратична похибка);
SPI	– Serial Peripheral Interface (фактичний послідовний синхронний стандарт передавання даних);
SPF	– Sun Protection Factor (фактор захисту від сонця);
TCN	– Temporal Convolutional Network (часова мережа згортання);
UI	– User Interface (інтерфейс користувача);
UUID	– Universally Unique Identifier;
UVA	– УФ-випромінювання типу А;
UVB	– УФ-випромінювання типу В;
Wi-Fi	– Wireless Fidelity (стандарт передавання цифрових потоків даних по радіоканалах).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Станом на сьогодні проблема захисту шкіри від шкідливого впливу УФ-випромінювання є надзвичайно актуальною. За даними Міжнародного агентства з вивчення раку (IARC, International Agency for Research on Cancer), частота діагностування раку шкіри зростає з кожним роком, й одним із вагомих чинників ризику вважається тривалий вплив сонячного УФ-випромінювання без належного захисту. Крім загрози онкологічних захворювань, надмірна дія УФ-променів спричиняє прискорене старіння шкіри, втрату її еластичності та появу пігментації [1, 2, 3].

Хоча вже існують засоби фотозахисту, як-от сонцезахисні креми, лосьйони та аерозолі з різним рівнем фактору захисту від сонця (SPF), на практиці їхнє використання часто є недостатньо ефективним через людський чинник. Люди або зовсім забувають нанести сонцезахисний крем, або не враховують необхідність його повторного застосування через завершення дії чи вплив зовнішніх чинників, як вологість повітря та висока температура, яка викликає виділення поту. Брак обізнаності щодо дії сонцезахисних засобів, їхнього терміну ефективної дії та необхідності оновлення створює додаткові ризики [4, 5].

Водночас сучасні мобільні технології відкривають нові можливості для розв'язання цієї проблеми. Ідея створення системи на основі мобільного застосунку та портативного пристрою для збору даних про рівень УФ-випромінювання, умови довкілля та активність користувача уможлиблює реалізувати персоналізований підхід до контролю за станом шкіри.

Така система може вчасно надавати рекомендації щодо нанесення чи повторного використання сонцезахисного засобу, а також попереджати про критичні рівні опромінення.

Попри наявність деяких аналогічних рішень, як-от пристрій My Skin Track UV від La Roche-Posay, практика показує, що більшість із них мають низку недоліків. Користувачі скаржаться на незручність у використанні та обмежену функціональність. Це свідчить про те, що проблема ще не розв'язана повністю, й існує потреба в нових підходах, які об'єднують технічні, медичні та поведінкові аспекти.

Саме тому тема розроблення інтелектуальної системи моніторингу УФ-випромінювання з можливістю обліку впливу сонцезахисних засобів та зовнішніх чинників є актуальною, має як наукове, так і практичне значення та може зробити суттєвий внесок у царину персоналізованої профілактики захворювань шкіри. Існує необхідність розроблення інтелектуальної системи моніторингу УФ-випромінювання, яка враховує індивідуальні параметри користувача, умови довкілля та дію сонцезахисних засобів із метою надання персоналізованих рекомендацій щодо захисту шкіри від шкідливого впливу УФ-променів.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є заповнення прогалин що існують в цій царині для зменшення кількості випадків опіку шкіри та захворювань на рак шкіри, з метою подовження тривалості життя та уповільнення процесів старіння шкіри.

Об'єктом дослідження є процес інтелектуального моніторингу впливу УФ-випромінювання на шкіру людини, охоплюючи створення та використання пристроїв, що функціонують у середовищі Інтернету речей (ІоТ), для забезпечення здобуття та оброблення даних про довкілля та створення та навчання моделей нейронних мереж.

Предметом дослідження є методи збору, збереження, оброблення та аналізування даних про УФ-випромінювання та параметри довкілля, особисті характеристики користувача та ефективність фотозахисту, а також підходи до побудови моделей та рекомендаційних систем у цій галузі.

Мета роботи зумовила такі завдання дослідження:

- Дослідити наявні засоби та рішення для моніторингу УФ-випромінювання і фотозахисту та недоліки комерційних пристроїв.
- Дослідити підходи до розрахунку безпечного інтервалу перебування під сонцем та кількісного визначення рівня отриманої УФ-дозы.
- Сформулювати вимоги до інтелектуальної системи, що враховує індивідуальні характеристики користувача, умови довкілля та використання сонцезахисних засобів.
- Розробити архітектуру системи, яка охоплює портативний енергоощадний пристрій для збору даних, мобільний застосунок для оброблення інформації та відображення рекомендацій.
- Створити прототип системи та провести його тестування.

Методи дослідження

Методи наукового дослідження, що використано в роботі: емпіричний та евристичний, аналіз і синтез. Також використані спеціальні методи: математичної статистики, машинного навчання, програмної інженерії.

Наукова новизна отриманих результатів

У процесі проведених досліджень, отримано такі наукові результати:

- Уперше розроблено модель комплексної системи портативного персоналізованого моніторингу УФ-випромінювання, що поєднує сенсорний пристрій зі збереженням історії даних у локальній пам'яті та мобільний застосунок із інтегрованою нейронною мережею для прогнозування зміни рівня заряду акумуляторної батареї, яка враховує індивідуальні фізіологічні параметри користувача, зокрема тип шкіри, значення MED та інформацію про застосування сонцезахисних засобів.
- Уперше реалізовано модель нейронну мережу для прогнозування зміни заряду батареї в пристроях із живленням від сонячної енергії, яка забезпечує контекстно-орієнтоване передбачення зміни заряду батареї та є

інтегрованою частиною загальної системи портативного моніторингу УФ-випромінювання, що використовує фактичні та прогнозовані параметри довкілля.

Практичне значення отриманих результатів

У межах дослідження реалізовано портативний пристрій для збору параметрів довкілля, зокрема УФ-випромінювання, температури, вологості, освітлення, а також контролю стану акумуляторної батареї. Пристрій використовує протокол BLE для обміну даними з мобільним застосунком, що забезпечує низьке енергоспоживання та довготривалу автономну роботу.

Розроблено мобільний застосунок, що виконує збір і візуалізацію даних у реальному часі, обробляє отриману інформацію з урахуванням типу шкіри користувача, значення його MED, застосування сонцезахисного крему (SPF, тривалість дії, час нанесення), а також поточних умов середовища. Застосунок сповіщає користувача про перевищення безпечної УФ-дозы та надає персоналізовані рекомендації щодо уникнення сонячного опромінення.

Окрім того, розроблено та інтегровано модель штучної нейронної мережі, яка здатна передбачати рівень заряду батареї пристрою на основі зібраних та поточних даних про зовнішні умови (температуру, освітлення, УФ-індекс). Це уможливорює краще планувати роботу пристрою та своєчасно попереджати користувача про необхідність дозарядження пристрою.

Розроблена система моніторингу УФ-опромінення та інформування користувача має практичну цінність у галузі охорони здоров'я.

Вона може бути застосована для широкої цільової аудиторії, зокрема для людей із підвищеною чутливістю до УФ-випромінювання, людей із дерматологічними захворюваннями, працівників, які працюють на відкритому повітрі, туристів, а також у навчальних та медичних закладах із

метою профілактики та підвищення рівня обізнаності про шкідливий вплив ультрафіолету.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи

Кваліфікаційна робота містить вступ, три основних розділи, висновки до розділів, загальні висновки роботи, використані джерела. Загальний обсяг роботи становить 83 сторінки. Робота налічує 37 рисунків. Список використаних джерел сформовано з 24 покликань.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД НАЯВНИХ РІШЕНЬ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ УФ-ДОЗИ

У цьому розділі розглянуто низку наявних рішень для розв'язання проблеми персонального моніторингу УФ-випромінювання, зокрема, аналіз пристроїв та застосунків, що надають можливість відстежувати рівень опромінення. Крім того, висвітлені методи чисельної оцінки допустимої дози УФ-опромінення для різних людей, з урахуванням їхнього фототипу. Також розглянуті загальні параметри сонцезахисних кремів.

1.1. Наявні рішення

1.1.1. Пристрій My Skin Track UV від La Roche-Posay

Пристрій My Skin Track UV (далі за текстом - пристрій MST UF) – компактний безбатарейний сенсор, розроблений компанією La Roche-Posay у співпраці з L'Oréal's Technology Incubator [6, 7].

Зовнішній вигляд пристрою наведений на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1. Пристрій My Skin Track UV [6]

Пристрій MST UF відстежує рівень УФ-випромінювання та інші зовнішні агресивні чинники, що можуть впливати на стан шкіри людини.

Пристрій MST UF працює пасивно, використовуючи живлення від вбудованої мініатюрної сонячної панелі. Для передавання зібраних даних на смартфон необхідно вручну ініціювати зчитування даних з пристрою за допомогою технології Near Field Communication (NFC).

Пристрій MST UF зазвичай кріпиться до одягу, сумки або годинника. Він вимірює рівень УФ-випромінювання типу А (UVA) і типу В (UVB), фіксуючи загальну дозу, отриману впродовж дня.

Усі дані синхронізуються через мобільний застосунок, який відстежує щоденний рівень УФ-навантаження (так званий «max sun-stock») і надсилає сповіщення в момент досягнення порогових значень. Застосунок також надає персоналізовані рекомендації з догляду за шкірою, зокрема щодо використання сонцезахисних засобів, з можливістю вказати, який саме крем користувач застосовує впродовж дня.

Окрім УФ, застосунок також відображає дані про вплив забруднення повітря, вологості, температури та рівня пилу (PM) на основі геолокації.

Зовнішній вигляд мобільного застосунку пристрою наведений на рисунку 1.2.

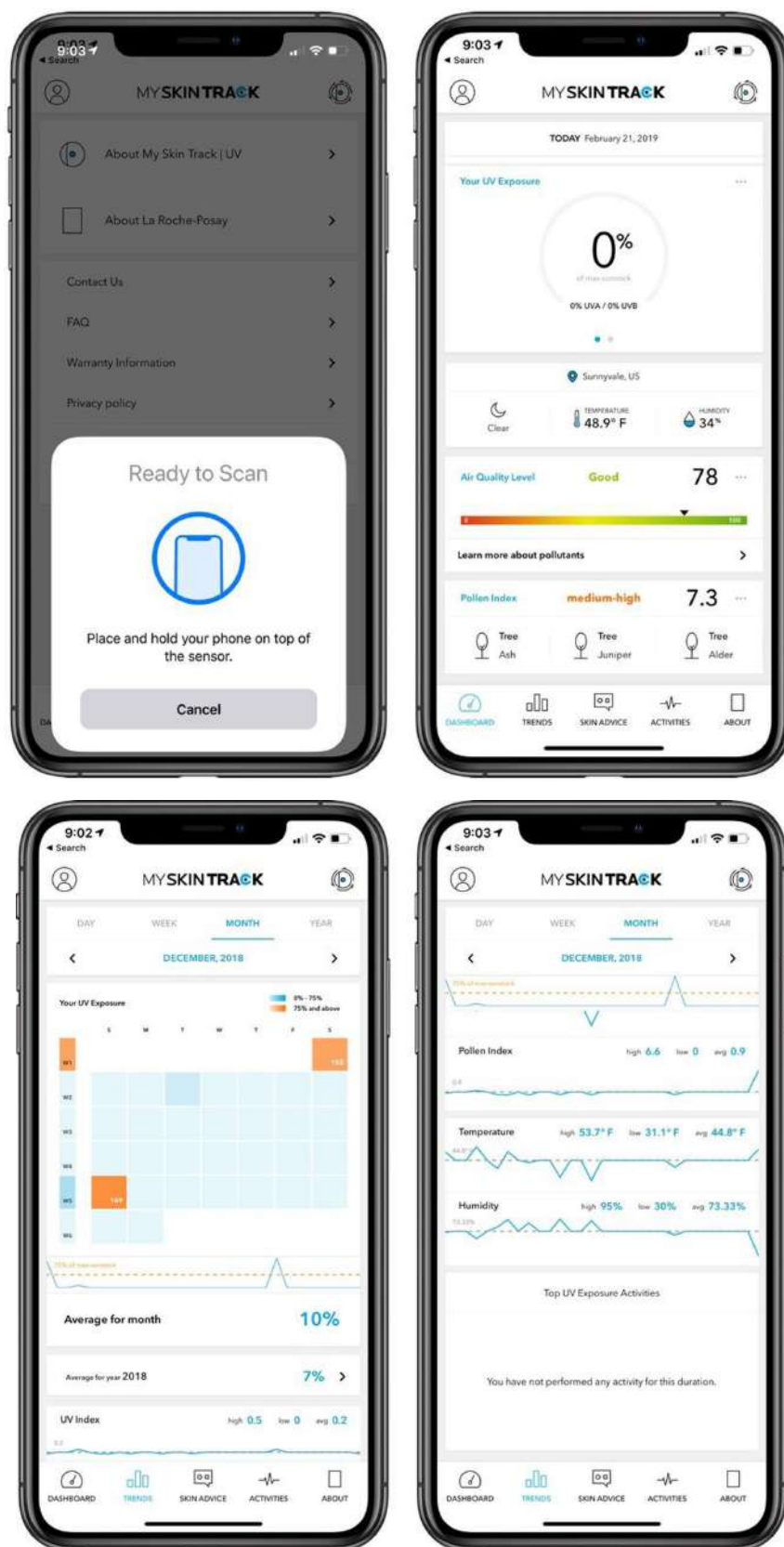


Рисунок 1.2. Мобільний застосунок пристрою My Skin Track UV [7]

Це рішення має певні недоліки:

- Брак автоматичної синхронізації: кожного разу потрібно вручну підносити телефон до сенсора для синхронізації даних через NFC. Це не лише створює незручності, але й ускладнює отримання вчасних сповіщень. Після синхронізації показник УФ-навантаження вже може бути перевищений або близьким до порогу, що означає брак попереджень до цього моменту.

- Фіксація даних лише на прямому сонячному світлі: в одній із рецензій [7] зазначено, пристрій коректно працює лише на прямому сонячному світлі, що може бути пов'язано з відсутністю батареї.

- Брак нагадувань для використання крему: пристрій не нагадує користувачу про необхідність повторного нанесення сонцезахисного крему та не надає можливість задати використання декількох кремів упродовж дня.

Загалом, пристрій MST UF пропонує концепцію поєднання косметичних рішень і споживчої електроніки, однак на практиці виявляється обмежено корисним. Через потребу персонального втручання для оновлення даних, слабку реакцію на непряме світло та брак нагадувань про використання сонцезахисного крему, пристрій переважно підходить для людей, які проводять багато часу на відкритому сонці та бажають загалом відслідкувати отриману дозу УФ-випромінювання за день, без отримання поточних порад.

1.1.2. Застосунок Dminder

Dminder – це мобільний застосунок, який спеціалізується на відстеженні синтезу вітаміну D через природне сонячне опромінення та харчові добавки [8]. Зовнішній вигляд мобільного застосунку наведений на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3. Мобільний застосунок Dminder

Він допомагає користувачам отримати оптимальну дозу УФ-випромінювання, що необхідна для вироблення вітаміну D, без ризику опіків. Застосунок розроблений компанією Ontometrics і позиціонується як науково обґрунтоване рішення для контролю над рівнем УФ-експозиції та підтримання здоров'я.

Dminder використовує геолокацію для визначення безпечних періодів часу, упродовж яких користувач може бути на сонці без шкоди для здоров'я. Він надає користувачу інформацію про кут сонця, поточний УФ-індекс, отриману кількість вітаміну D. Для збереження сесії перебування на сонці користувач повинен вручну задати часовий проміжок перебування на сонці, суб'єктивно визначений відсоток не закритої шкіри та відсоток рівня хмарності.

Зовнішній вигляд вікна введення даних наведений на рисунку 1.4.

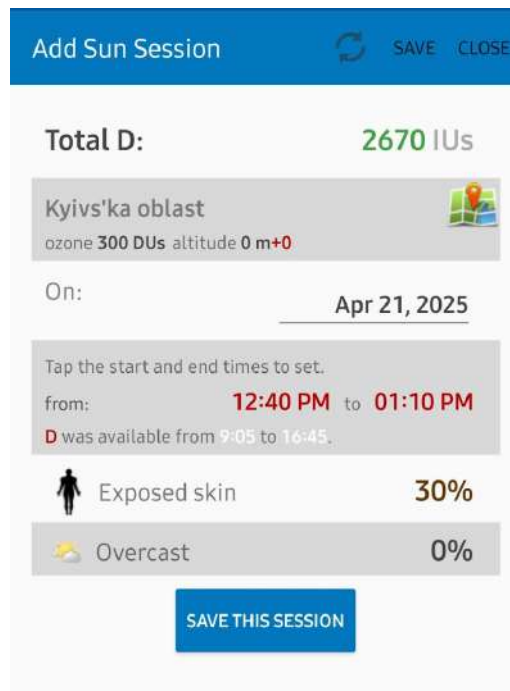


Рисунок 1.4. Мобільний застосунок dminder

Хоча застосунок не потребує додаткових фізичних пристроїв, потреба орієнтуватися на загальну інформацію про місцевість та ручне введення даних, може знизити його зручність і точність.

Якщо розглядати застосунок як пристрій для контролю УФ-випромінювання, то він переважно спрямований на інший функціонал – підрахунок синтезованого вітаміну D.

1.1.3. Застосунки прогнозування погоди

Weather.com [9] – це один із онлайн-ресурсів та мобільних застосунків для перегляду прогнозів погоди, охопно з інформацією про УФ-індекс. Платформа надає дані, що у вебверсії, що через застосунок The Weather Channel для мобільних платформ Android та iOS.

Weather.com надає прогнозування максимального УФ-індексу на день, а також детальний погодинний розклад УФ-інтенсивності, що дає змогу оцінити ризики для здоров'я в різні частини дня.

До кожного значення УФ-індексу додається рівень ризику (низький, середній, високий тощо) з відповідними порадами, наприклад: «носіть сонцезахисні окуляри», «нанесіть крем SPF 30+» або «обмежте перебування на сонці». Оскільки користувач отримує всю спрогнозовану погодні інформацію на певний проміжок часу, то в нього є можливість враховувати температуру, хмарність, вітер, що може допомогти краще оцінити потенційний вплив сонця на шкіру.

Приклад передбачення погоди, разом із УФ-індексом, наведений на рисунку 1.5.

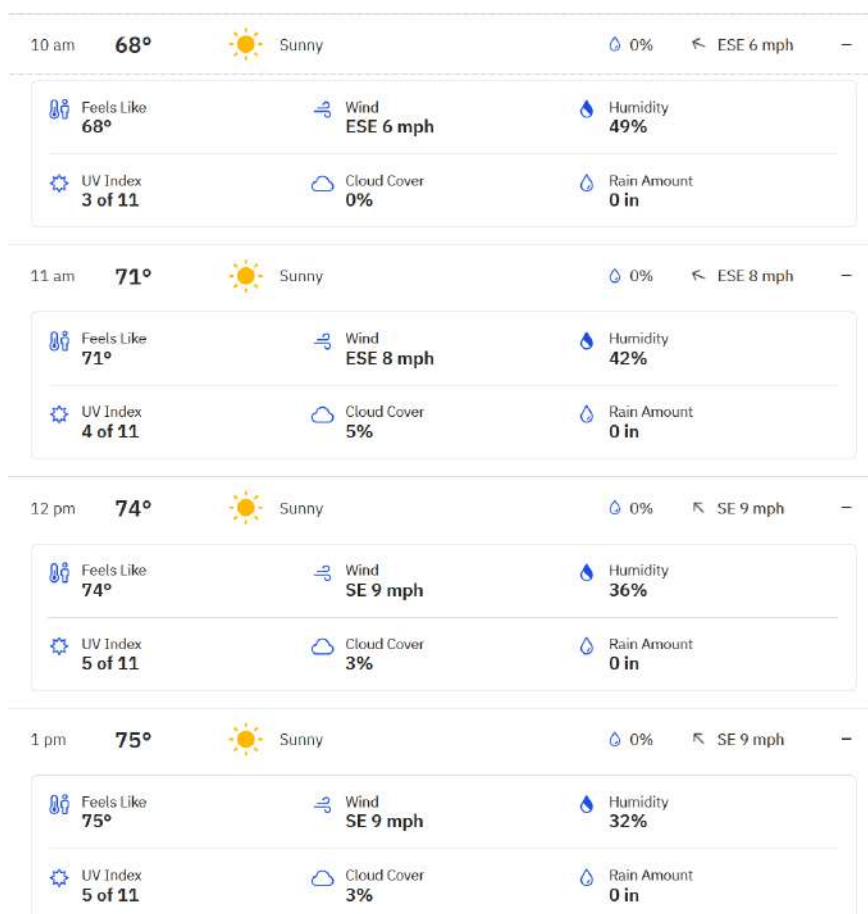


Рисунок 1.5. Застосунок Weather.com

Хоча Weather.com є доступним та розповсюдженим інструментом, він не враховує індивідуальні особливості користувача, як-от тип шкіри чи вік, а також оцінює лише потенційний ризик, не враховуючи реальну тривалість перебування на сонці чи ступінь покриття шкіри.

Окрім того, відсутня можливість відстежувати накопичену УФ-дозу чи вести журнал сонячної активності.

Загалом Weather.com є інформаційним інструментом для загального ознайомлення з УФ-умовами, але його функціональність обмежена прогнозом. Він не забезпечує персоналізованого підходу до оцінки ризику опіків чи потреби в повторному нанесенні крему, що є критичним для систем індивідуального захисту шкіри.

1.1.4. Системи державного моніторингу (наприклад, ARPANSA – Австралія)

У багатьох країнах функціонують державні системи моніторингу рівня УФ-випромінювання, які надають науково обґрунтовану, відкриту та перевірену інформацію. Одним із прикладів є ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency) – офіційна агенція в Австралії, що займається контролем за рівнем радіації, зокрема УФ-випромінювання [5].

ARPANSA використовує наземні УФ-сенсори, встановлені в різних регіонах Австралії, які здійснюють безперервні вимірювання УФ-випромінювання в реальному часі. Дані оновлюються щохвилини, забезпечуючи значну точність та оперативність. Агенція також публікує прогнозування УФ-індексу на день на основі супутникових даних та атмосферних моделей.

ARPANSA відкрито публікує свої дані через офіційний вебсайт та прикладний програмний інтерфейс API (Application Programming Interface), що уможливорює використовувати реальні УФ-дані для певного регіону, інтегрувати інформацію в сторонні системи (наприклад, мобільні застосунки або локальні інформаційне табло), проводити довготривале аналізування та порівняння зміни УФ-індексу з часом. Це все відкриває перспективи для використання моніторингу в наукових дослідженнях, освітніх ініціативах та персоналізованих системах захисту від сонця.

ARPANSA надає інтерфейс для користувачів: вебсайт відображає поточний УФ-індекс у форматі графіка, що змінюється впродовж дня, є мобільна версія, яка надає змогу швидко перевірити рівень УФ-випромінювання у своєму регіоні, для кожного значення УФ-індексу надається пояснення щодо ризиків та поради з безпеки, наприклад: «високий ризик – обов’язково використовуйте сонцезахисний крем, носіть головний убір і сонцезахисні окуляри».

Вигляд графіку прогнозованого та реального УФ-індексу, що надається на сайті ARPANSA, наведений на рисунку 1.6.

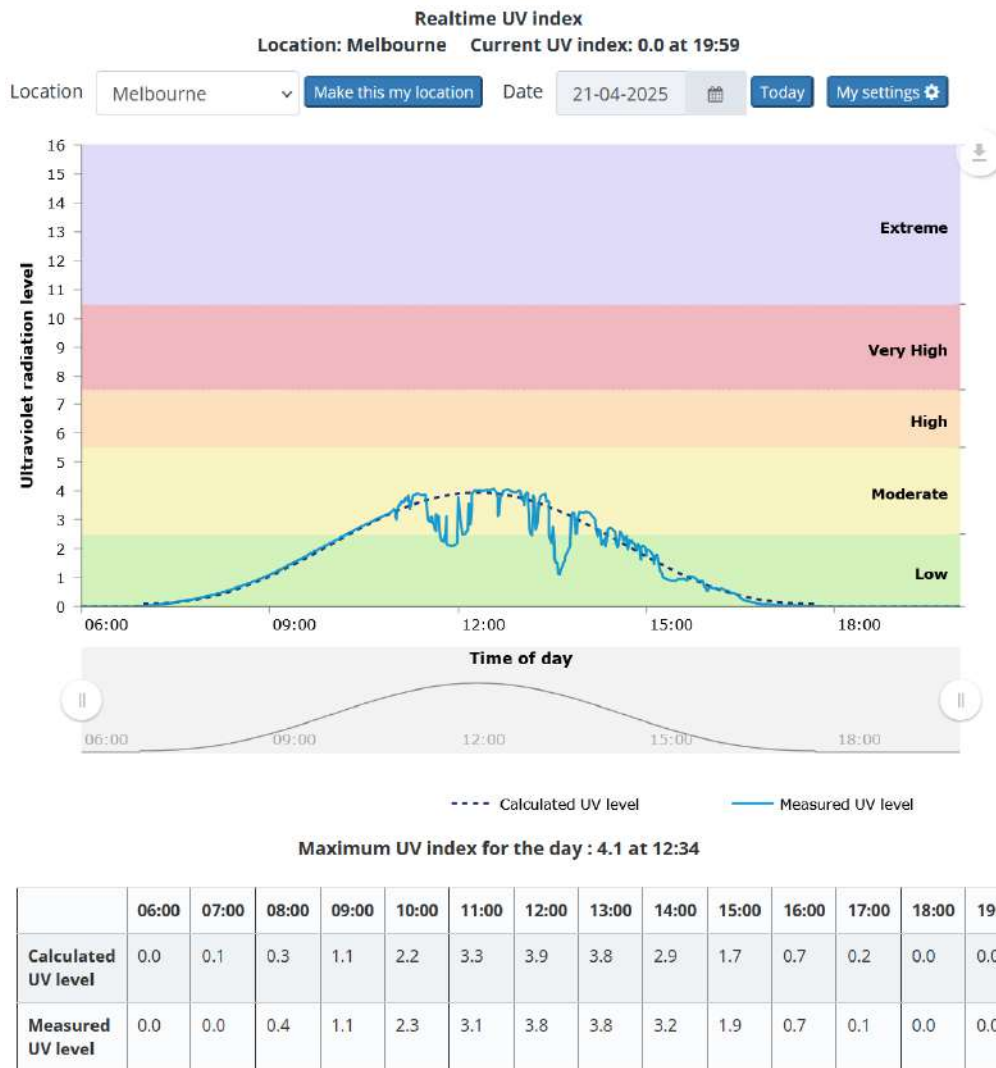


Рисунок 1.6. Система державного моніторингу ARPANSA

Вигляд графіку потенційно накопиченої дози УФ-опромінення, що надається на сайті ARPANSA, наведений на рисунку 1.7.

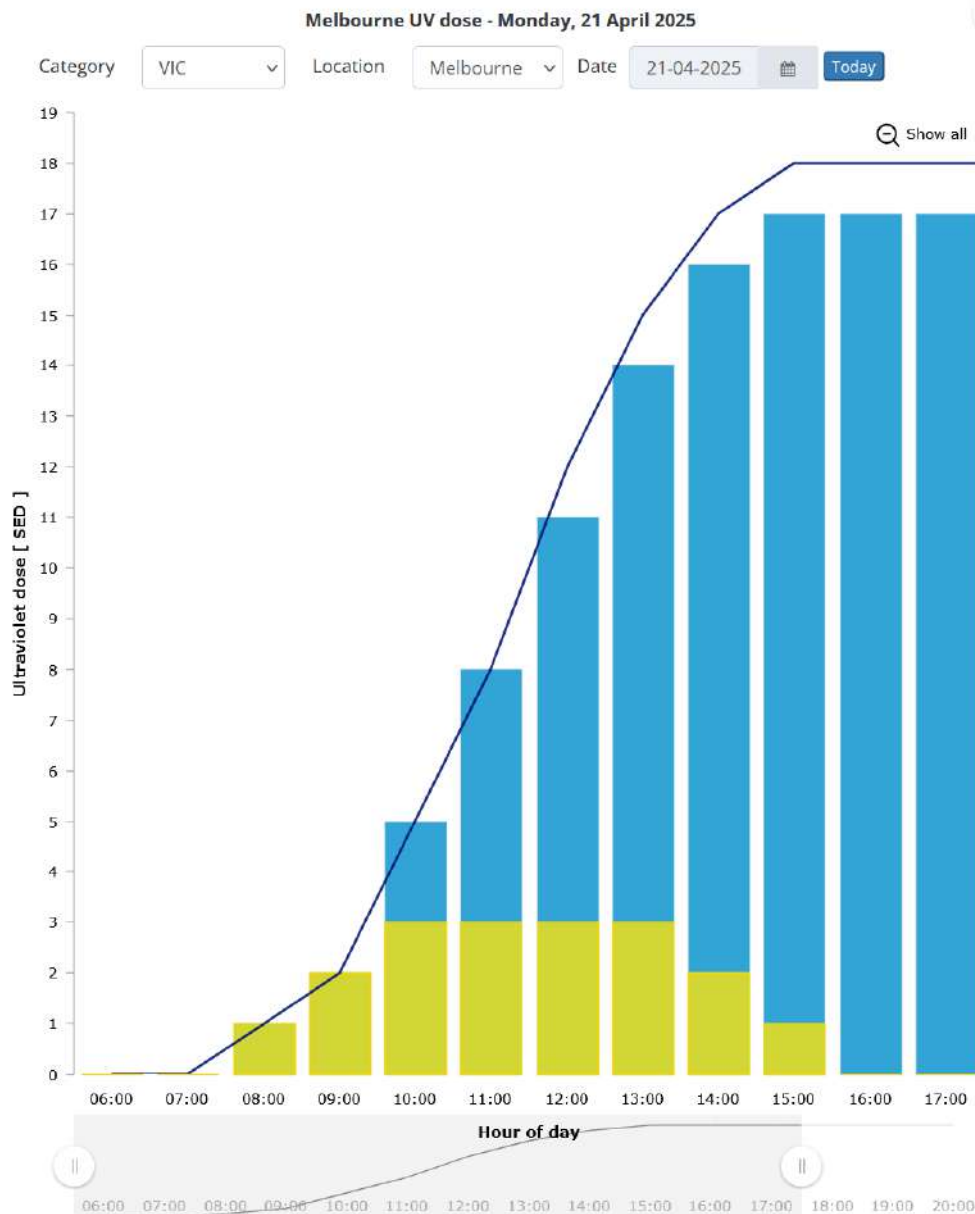


Рисунок 1.7. Система державного моніторингу ARPANSA

ARPANSA є прикладом державної системи моніторингу УФ-випромінювання, яка поєднує значну точність, відкритість даних та доступність для громадськості. Подібні системи можуть надати потрібну інформацію для персонального моніторингу УФ-випромінювання, але самостійно вони не враховують індивідуальні параметри користувача, як-от тип шкіри, нанесення крему чи тривалість перебування на сонці.

Також варто зазначити, що державні системи з якісною інформацією присутні не в кожній країні, що може бути проблематично для певних людей.

1.2. Дослідження

1.2.1. Дослідження ефективності нанесення сонцезахисних кремів

Основними способами захисту від УФ-випромінення є покриття шкіри одягом та використання сонцезахисних кремів. Але загальна обізнаність людей у питанні використання кремів мала, про що свідчать дослідження. Здебільшого люди сприймають позначку SPF (Sun Protection Factor) неправильно через частково двозначне формулювання, яке можна побачити на сонцезахисних кремах: наскільки довго можна перебувати на сонці в порівнянні з тим, якби не нанесли сонцезахисний крем. Проблема в тому, що SPF не визначає час дії крему, а вказує на ефективність захисту від ультрафіолетових променів, позначаючи наскільки більше УФ-опромінення може отримати людина порівняно з незахищеною шкірою [10].

Якщо розглядати питання, упродовж якого проміжку часу крем надаватиме зазначений захист, то на кожному кремі зазначається час його ефективної дії, який може варіюватися в залежності від обраного продукту. Але сонцезахисні креми працюють не одразу після нанесення на шкіру. В середньому вони починають діяти після 10 хвилин нанесення, а ICRA (International Cancer Research Agency) рекомендує наносити крем за 30 хвилин до активного перебування під сонячним випроміненням [5, 11].

Також на захист крему впливає якість його нанесення.

Згідно з дослідженнями переважна більшість людей не знає про рекомендовану товщину шару крему у 2 мг/см^2 . Через це в середньому товщина шару коливається від $0,5$ до $1,2 \text{ мг/см}^2$, що значно впливає на

відповідність актуального захисту до зазначеного – зменшення ефективного SPF в середньому на 33 % [11].

Упродовж дня нанесений шар крему може зазнавати впливу чинників як: механічні подразнення, вологість повітря, прямий контакт із водою, піт (на продукування якого впливає температура та вологість довкілля). Через це період повторного нанесення крему може відрізнятися від зазначеного [4, 5].

Через вище зазначені чинники слідкувати за нанесенням крему може бути доволі проблематично без використання додаткових застосунків, які могли б відстежувати всі можливі параметри кремів та особливості їхнього використання, стан довкілля, та мали б можливість надавати сповіщення користувачу на основі цих даних.

1.2.2. Дослідження мінімальної еритемної дози та шкала Фіцпатріка

Мінімальна еритемна доза (MED (Minimal Erythema Dose)) – це найменша кількість ультрафіолетового опромінення (переважно UVB), яка спричиняє помітне почервоніння шкіри (еритему) через 24 години після опромінення. Це критичний параметр для визначення чутливості шкіри до ультрафіолету та використовується в дерматології для оцінювання ризику сонячних опіків і планування фототерапії.

Вимірювання MED проводиться через опромінення невеликих ділянок шкіри різними дозами UVB-випромінювання та спостереження за реакцією шкіри через 24 години. Доза, за якої з'являється мінімальне почервоніння, вважається MED [12, 13].

Знання власного значення MED уможливорює індивідуально прогнозувати ризик сонячних опіків та планувати захист від сонця. Наприклад, якщо відомо, що певна доза UVB викликає еритему, можна

уникати перевищення цього рівня опромінення під час перебування на сонці. Це особливо важливо для людей із підвищеною чутливістю до ультрафіолету або для тих, хто проходить фототерапію [12, 13, 14].

Шкала Фіцпатріка класифікує шкіру за її реакцією на сонячне випромінювання, поділяючи її на шість типів.

Класифікація шкіри за шкалою Фіцпатріка наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Класифікація шкіри за шкалою Фіцпатріка

Тип шкіри	Характеристика обгорання	Характеристика засмагання
Тип I	Завжди обгорає	Ніколи не засмагає
Тип II	Часто обгорає	Засмагає слабо
Тип III	Іноді обгорає	Засмагає поступово
Тип IV	Зрідка обгорає	Добре засмагає
Тип V	Дуже рідко обгорає	Легко засмагає
Тип VI	Ніколи не обгорає	Дуже легко засмагає

Інфографіка класифікації шкіри за шкалою Фіцпатріка наведена на рисунку 1.8.

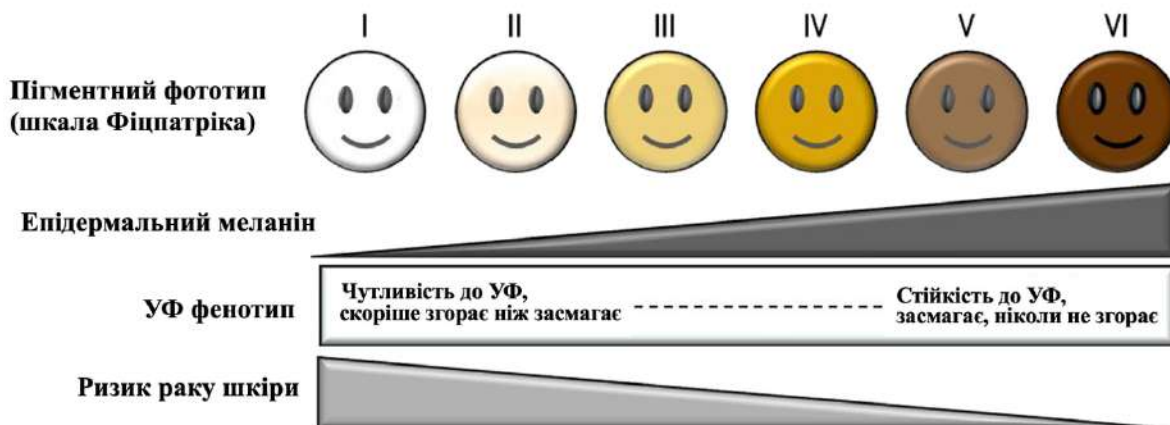


Рисунок 1.8. Класифікація шкіри за шкалою Фіцпатріка [15]

Кожен тип шкіри має характерне значення MED. Наприклад, тип I має MED приблизно 200 Дж/м^2 , тоді як тип IV – 750 Дж/м^2 [13, 14, 17].

Чисельно визначена доза сонячної радіації як MED та можливість визначити свій тип шкіри за допомогою шкали Фіцпатріка уможлиблюють визначити людині свою допустиму дозу сонячної радіації, яка не спричинить обгорання. Хоча шкала Фіцпатріка доволі узагальнена, вона надає ґрунтовне початкове значення MED, яке потім можна скорегувати щодо актуального значення для шкіри людини. Усе це надає можливість впровадити оброблення накопиченої дози сонячної радіації та вчасних сповіщень щодо критичної дози.

1.3. Висновки до розділу 1

Отже, у цьому розділі розглянуто низку наявних рішень для персонального моніторингу УФ-випромінювання. Вдалося виокремити основні недоліки цих рішень – необхідність ручного оновлення даних і брак персоналізації, що обмежує можливість вчасного отримання сповіщень щодо застосування сонцезахисних кремів. Також проаналізовано шкалу Фіцпатріка, яка уможлиблює визначення типу шкіри та відповідного

значення MED, яке слугує основою для оцінки допустимої дози УФ-опромінення. Крім того, розглянуто фактори, що можуть скорочувати ефективний час дії сонцезахисних кремів, як-от зміни погодних умов.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНОГО ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

У цьому розділі розглянуто процес побудови енергоощадного приладу для моніторингу УФ-випромінювання та інших параметрів навколишнього середовища. Увага приділена вибору компонентів пристрою, логіці передавання даних через BLE, механізмам збереження даних на самому пристрої та процесу збору інформації. Крім того, у розділі висвітлено основні аспекти побудови мобільного застосунку, разом із обраною структурою з поділом на фрагменти, систему збереження даних, а також логіку взаємодії через BLE з пристроєм і механізм сповіщень. Окрім того, розглянуто побудову нейронної мережі для передбачення майбутнього рівня заряду батареї, зокрема етапи підготовки даних, архітектуру мережі та оцінку її точності.

2.1. Розроблення приладдя

2.1.1. Вибір компонентів для обладнання

2.1.1.1. Плата ESP32-C6-Zero

Для реалізації апаратної частини системи обрано плату ESP32-C6-Zero, яка базується на мікроконтролері ESP32-C6FH4. Цей мікроконтролер поєднує достатні обчислювальні ресурси, 4 МБ флешпам'яті та 2 МБ оперативної пам'яті, підтримання сучасних бездротових стандартів і компактний розмір, що є критично важливим для портативного пристрою.

Важливою перевагою цієї плати є вбудоване підтримання технології бездротового зв'язку Bluetooth 5 Low Energy (BLE) та Wi-Fi 6, що не потребує використання додаткових модулів і зменшує габарити та складність системи.

Особливо важливою є підтримання BLE для забезпечення енергоощадного обміну даними з мобільним застосунком. Завдяки цій технології пристрій може працювати тривалий час на одному заряді батареї, що є пріоритетом у розробленні компактного та автономного пристрою для щоденного використання.

Ці технічні характеристики зробили ESP32-C6-Zero Mini оптимальним вибором для реалізації проекту, де важливим є енергоощадження під час бездротового з'єднання.

2.1.1.2. Датчик ультрафіолетового випромінювання GUVA-S12SD

Для вимірювання рівня ультрафіолетового випромінювання в системі обрано датчик GUVA-S12SD. Це компактний аналоговий сенсор, побудований на основі світлочутливих діодів Шотткі, призначений для реєстрування інтенсивності ультрафіолетового випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль – приблизно від 200 до 370 нм.

Графік чутливості сенсора УФ-випромінювання в залежності від довжини хвилі випромінювання наведений на рисунку 2.1.

Responsivity Curve

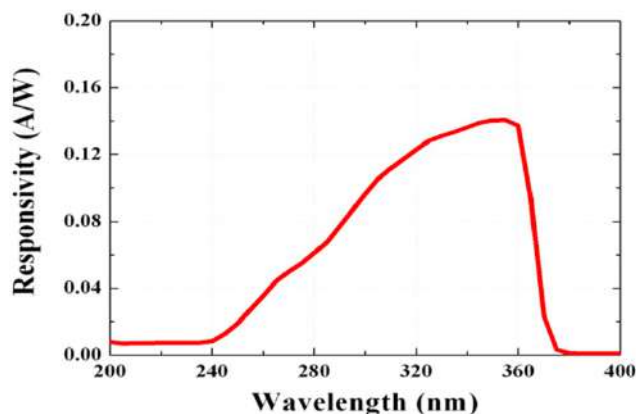


Рисунок 2.1. Графік чутливості сенсора УФ-випромінювання в залежності від довжини хвилі випромінювання [17]

Для реалізації проєкту обрано датчик УФ-випромінювання GUVA-S12SD завдяки його технічним перевагам. Одним із вагомих чинників стала енергоощадність датчика – низьке споживання струму робить його ідеальним для використання в автономних системах із обмеженими ресурсами живлення. Важливу роль у зменшенні енергоспоживання також відіграє аналоговий вихід датчика, який дає змогу безпосередньо обробляти сигнали за допомогою вбудованого аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера. Це відкидає потребу у використанні додаткових обчислювальних модулів або спеціалізованих інтерфейсів типу SPI чи I2C, що значно оптимізує енергоспоживання та спрощує апаратну архітектуру системи.

Окрім того, датчик GUVA-S12SD має значну чутливість у потрібному для проєкту спектральному діапазоні.

Датчик реєструє випромінювання в діапазонах UV-A та UV-B, які є основними чинниками ризику для виникнення сонячних опіків у людини. Завдяки цьому датчик GUVA-S12SD дає змогу отримувати коректні дані для оцінювання рівня впливу ультрафіолетового випромінювання на шкіру.

Ще однією важливою перевагою датчика GUVA-S12SD є широкий кут огляду, який становить приблизно 130 градусів. Така характеристика надає змогу датчику фіксувати ультрафіолетове випромінювання з великої площі без необхідності точного орієнтування пристрою на джерело світла, що є особливо важливим для мобільних рішень, де положення пристрою може змінюватися під час використання.

Принципом дії датчика є зміна його вихідної напруги в залежності від інтенсивності УФ-випромінювання. Чим вищий рівень УФ-випромінювання, тим вища напруга на виході датчика. Зчитуючи значення вихідної напруги датчика через АЦП мікроконтролера, можна визначати УФ-індекс або накопичену УФ-дозу.

На практиці для точніших вимірювань потрібно проводити калібрування датчика, використовуючи еталонні джерела УФ-випромінювання.

Графік співвідношення струму на виході сенсора до значення УФ-випромінювання наведений на рисунку 2.2.

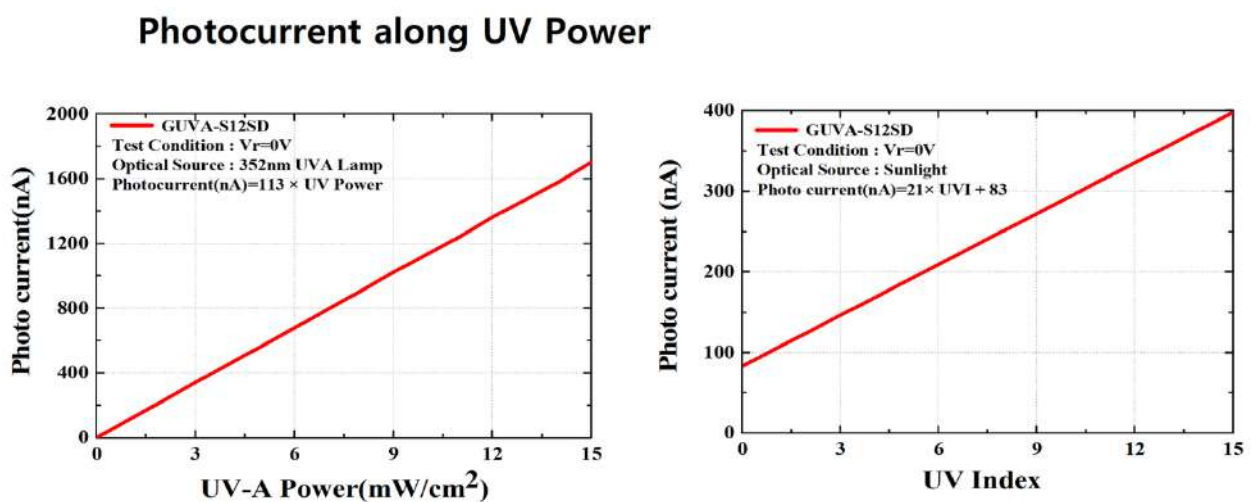


Рисунок 2.2. Графік співвідношення струму на виході сенсора до значення УФ-випромінювання [17]

2.1.1.3. Датчик температури та вологості SHT30

Для вимірювання температури та вологості в системі обрано цифровий датчик SHT30. Цей датчик має широкий діапазон вимірювання температури: від мінус 40 °С до плюс 120 °С з точністю до $\pm 0,3$ °С у діапазоні від 5 °С до 60 °С. Також він здатний вимірювати відносну вологість у діапазоні від 0 % до 100 % з точністю до 3 % у діапазоні (20 – 80) % RH. Завдяки вбудованій схемі оброблення сигналу, блоку пам'яті калібрування та енергоощадній схемі живлення, датчик забезпечує стабільність вимірювань і низьке споживання енергії.

Вибір саме цього датчика обґрунтований його здатністю до точних вимірювань за широкого діапазону температур і вологості, що є важливим для моніторингу навколишніх умов у системах, де вплив цих параметрів на інші компоненти є критичним.

2.1.1.4. Датчик освітленості GY-302 BH1750FVI

Для вимірювання освітленості обрано цифровий датчик GY-302 на базі чипа BH1750, який надає змогу точно вимірювати рівень фонового освітлення. Датчик має значну чутливість, а його спектр чутливості відповідає характеристикам людського ока, що забезпечує точність вимірювань у діапазоні (0 – 65535) лк. Завдяки прямому цифровому виходу, датчик не потребує складних обчислень або додаткового калібрування, що спрощує його інтеграцію в систему. Вибір цього датчика обумовлений необхідністю вимірювати рівень освітленості з значною точністю в межах діапазону, що охоплює звичайні умови освітлення, водночас забезпечуючи зручність використання завдяки цифровому виходу та інтегрованому перетворювачу.

2.1.1.5. Блок живлення з зарядкою від сонячної панелі

Для забезпечення живлення акумуляторної батареї в системі використано сонячну панель, літій-іонну батарею з номінальною напругою 3,7 В і місткістю 2000 мА·год, а також кілька модулів для забезпечення процесу контролю заряду та розряду батареї.

Одним зі значущих компонентів цього блоку є зарядний модуль TP4056 Type-C, який забезпечує надійний та безпечний процес заряджання літій-іонних акумуляторів. Модуль підтримує заряджання струмом до 1 А й забезпечує захист акумулятора від перегріву, перенапруги, короткого замикання та інших небезпечних умов. Для під'єднання до зарядного модуля використовується роз'єм USB Type-C, що спрощує під'єднання і полегшує користування. Під час процесу заряджання індикатор на платі показує стан заряду: червоний світлодіод сигналізує про процес заряджання, а зелений або синій світлодіод – про завершення процесу заряджання.

Аби забезпечити стабільний процес заряджання батареї, у системі використовується DC-DC понижувальний перетворювач MP1584. Цей модуль слугує для пониження напруги із сонячної панелі, яка може варіюватися в межах (4,5 – 28) В, до необхідного рівня для подачі на модуль TP4056, що відповідає за заряджання літій-іонної батареї. Перетворювач має здатність гарантувати вихідну напругу в межах (2,5 – 20) В, водночас максимальний струм на виході може досягати 3 А, а стабільний струм – до 1,8 А. Це дає змогу забезпечити надійне й безпечне живлення модуля TP4056, всупереч коливанням напруги із сонячної панелі. Крім того, значний ККД (до 90 %) перетворювача допомагає мінімізувати втрати енергії, що є важливим для системи, яка працює на відновлювальних джерелах енергії, як-от сонячна панель.

Завдяки цим модулям система забезпечує зарядження акумулятора від сонячної панелі та стабільне живлення під'єднаних пристроїв, що дає змогу зберегти енергію та реалізувати автономність системи.

2.1.1.6. Вимірювання напруги акумулятора

Для моніторингу стану акумулятора в системі використовується вимірювання напруги за допомогою дільника напруги. Оскільки напруга батареї може перевищувати допустимі рівні вхідної напруги АЦП мікроконтролера, реалізовано дільник на двох резисторах номіналом 100 кОм та 27 кОм. Дільник знижує вхідну напругу до безпечного рівня для подальшого оцифрування. Отримана на вході АЦП напруга дає змогу оцінити фактичний рівень заряду акумулятора.

Відновлення реальної напруги батареї здійснюється за формулою:

$$U_{\text{батареї}} = U_{\text{АЦП}} \times \left(1 + \frac{27 \text{ к}\Omega}{100 \text{ к}\Omega} \right) = U_{\text{АЦП}} \cdot 1,27 ,$$

де $U_{\text{АЦП}}$ – напруга, виміряна мікроконтролером після дільника.

Коефіцієнт 1,27 враховує співвідношення між резисторами та є множником для коригування значення напруги акумулятора на основі виміряної напруги через АЦП.

2.2. Розроблення програмного застосунку для обладнання

2.2.1. Інструменти та програмне середовище

ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) – це офіційний набір інструментів для розроблення програмного засобу для мікроконтролерів серії ESP32, наданий компанією Espressif.

Цей фреймворк містить усі необхідні бібліотеки, драйвери та утиліти для створення програм для пристроїв на основі ESP32 [18].

ESP-IDF надає повний набір функціональних можливостей, охопно з підтриманням Wi-Fi, Bluetooth (BLE), роботи з периферійними пристроями, файловими системами. Фреймворк підтримує багатозадачність за допомогою операційної системи FreeRTOS, що дає змогу керувати виконанням різних завдань.

Важливою особливістю ESP-IDF є те, що основною мовою програмування є C.

Використання мови C дає змогу досягти помітної продуктивності та оптимізації, що критично важливо для роботи з обмеженими ресурсами, як-от пам'ять та процесорний час. Це також надає розробникам повний контроль над апаратними ресурсами мікроконтролера, що робить ESP-IDF зручним інструментом для створення рішень у галузі IoT.

Окрім того, ESP-IDF містить інструменти для компіляції та завантаження вбудованої програми на мікроконтролери, а також для налагодження та тестування програм.

2.2.2. Практичні особливості використання Bluetooth Low Energy (BLE)

Реалізація бездротового зв'язку між пристроєм та мобільним застосунком відбувається за допомогою технології Bluetooth Low Energy (BLE). Ця технологія є оптимальним вибором для систем, що працюють від батареї, завдяки своїй здатності забезпечувати передавання даних із низьким енергоспоживанням.

Аби реалізувати обмін даними через BLE, необхідно визначити базову структуру, яку сформовано з таких елементів:

- Сервіс (Service) – логічне об'єднання пов'язаних характеристик, що описує функціональність пристрою.
- Характеристики (Characteristics) – основні одиниці обміну даними між сервером та клієнтом. Кожна характеристика має унікальний ідентифікатор UUID (Universally Unique Identifier) та може підтримувати операції читання, запису або надсилання повідомлень.
- Дескриптори (Descriptors) – необов'язкові допоміжні об'єкти, які містять метадані або конфігурацію характеристик.

У розробленій системі ESP32-C6 є BLE-сервером, який оголошує набір сервісів і характеристик, доступних для взаємодії. Мобільний застосунок є BLE-клієнтом, що ініціює з'єднання, зчитує або записує дані та відстеження зміни значення характеристик.

2.2.3. Імплементация комунікації за допомогою BLE

Аби реалізувати Bluetooth Low Energy (BLE) комунікацію, у проєкті використано підхід, що ґрунтується на створенні одного GATT-сервісу, який містить шість основних характеристик.

Кожна характеристика реалізована як набір атрибутів у таблиці – масив структур `esp_gatts_attr_db_t`, що реєструється під час ініціалізації BLE.

Сервіс та характеристики мають такі призначення:

Сервіс (UUID 0xFFA0) – основна одиниця, що об'єднує пов'язані характеристики.

Перша керівна характеристика (UUID: 0xFF00) надає дозвіл на читання та запис.

Вона використовується для передавання команди та часового проміжку від клієнта для ініціалізації отримання всіх збережених входжень даних із сенсорів через першу характеристику для передавання даних.

Перша характеристика передавання даних (UUID: 0xFF01) надає право на читання та можливість підписатися на отримання повідомлень через механізм сповіщень, для цього містить Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD), який дає змогу клієнту підписатися на отримання сповіщень або відмовитися від них. Використовується для передавання даних, сформованих на основі параметрів, отриманих через першу керівну характеристику.

Приклад об'явлення описаної характеристики наведений на рисунку 2.3.

```
static const esp_gatts_attr_db_t gatt_table_db[S0_IDX_SIZE] =
{
    ...

    /* Characteristic Declaration */
    [IDX_0_CHAR_1_D] =
    {{ESP_GATT_AUTO_RSP}, {ESP_UUID_LEN_16, (uint8_t *)&character_declaration_uuid, ESP_GATT_PERM_READ,
        CHAR_DECLARATION_SIZE, CHAR_DECLARATION_SIZE, (uint8_t *)&char_prop_read_notify}},

    /* Characteristic Value */
    [IDX_0_CHAR_1_D_VAL] =
    {{ESP_GATT_AUTO_RSP}, {ESP_UUID_LEN_16, (uint8_t *)&GATTS_0_CHAR_1_UUID, ESP_GATT_PERM_READ,
        GATTS_CHAR_VAL_LEN_MAX, sizeof(char_base_value), (uint8_t *)char_base_value}},

    /* Client Characteristic Configuration Descriptor */
    [IDX_0_CHAR_1_D_NOT] =
    {{ESP_GATT_AUTO_RSP}, {ESP_UUID_LEN_16, (uint8_t *)&character_client_config_uuid, ESP_GATT_PERM_READ | ESP_GATT_PERM_WRITE,
        sizeof(uint16_t), sizeof(data_ccc), (uint8_t *)data_ccc}},

    ...
};
```

Рисунок 2.3. Об'явлення першої характеристики передавання даних

Після оброблення запиту, пристрій надсилає сповіщення із зазначенням довжини доступних даних, що записані до характеристики. Це дає змогу клієнту зрозуміти, скільки байтів варто очікувати для подальшого зчитування.

Друга керівна характеристика (UUID: 0xFF02) надає дозвіл на читання та запис, використовується для передавання команд для налагодження пристрою через мобільний застосунок.

Друга характеристика передавання даних (UUID: 0xFF03) надає право на читання та можливість підписатися на отримання повідомлень через механізм сповіщень. Для цього характеристика містить Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD), який дає змогу клієнту підписатися на отримання сповіщень або відмовитися від них. Використовується для передавання даних, сформованих на основі команди налагодження, отриманих через другу керівну характеристику. Після оброблення запиту пристрій надсилає сповіщення із зазначенням довжини доступних даних, що записані до характеристики.

Характеристика передання періодичних даних (UUID: 0xFF04) надає право на читання та можливість підписатися на отримання повідомлень через механізм сповіщень. Для цього характеристика містить Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD), який дає змогу клієнту підписатися на отримання сповіщень або відмовитися від них. Використовується для передавання даних, сформованих на основі вимірювань із сенсорів із періодичністю п'ять хвилин. Після оброблення запиту, пристрій надсилає сповіщення із зазначенням довжини доступних даних, записаних до характеристики.

Характеристика синхронізації часу (UUID: 0xFF05) надає дозвіл на читання та запис. Використовується для передавання команди та часу для синхронізації годинника пристрою з годинником мобільного застосунку.

Для оброблення подій GATT-сервера, що надходять від BLE-стека, використовується функція `gatts_event_handler`. Під час події `ESP_GATTS_REG_EVT` (реєстрація профілю), у разі успішної реєстрації, дескриптор `gatts_if` (інтерфейс GATT-сервера) зберігається в таблиці профілів `client_profile_tab`.

Також для всіх подій функція перебирає всі профілі в `client_profile_tab`, і якщо подія належить певному профілю або має загальний інтерфейс (`ESP_GATT_IF_NONE`), викликається відповідна функція зворотного виклику (`gatts_cb`), що призначена для оброблення подій цього профілю. Код описаної функції наведений на рисунку 2.4.

```
static void gatts_event_handler(esp_gatts_cb_event_t event, esp_gatt_if_t gatts_if, esp_ble_gatts_cb_param_t *param)
{
    if (event == ESP_GATTS_REG_EVT) {
        if (param->reg.status == ESP_GATT_OK) {
            client_profile_tab[PROFILE_APP_IDX].gatts_if = gatts_if;
        } else {
            ESP_LOGE(GATTS_TABLE_TAG, "reg app failed, app_id %04x, status %d",
                    param->reg.app_id,
                    param->reg.status);
            return;
        }
    }
    for (int idx = 0; idx < PROFILE_NUM; idx++) {
        if (gatts_if == ESP_GATT_IF_NONE || gatts_if == client_profile_tab[idx].gatts_if) {
            if (client_profile_tab[idx].gatts_cb) {
                client_profile_tab[idx].gatts_cb(event, gatts_if, param);
            }
        }
    }
}
```

Рисунок 2.4. Код функції `gatts_event_handler`

У функції `gatts_profile_event_handler` (`gatts_cb`) кожного профілю відбувається оброблення взаємодії клієнта із сервером. Основна логіка реалізована у випадку події `ESP_GATTS_WRITE_EVT`, яка відповідає за оброблення записів до характеристик. У цій події перевіряється, чи запис відбувається в кілька етапів (`prepare write`). Далі, залежно від цільової характеристики, викликається одна з трьох функцій:

- `proceed_time_handle` – викликається під час синхронізації часу. Отримана послідовність байтів із характеристики синхронізації часу конвертується у формат Unix-часу. Якщо поточний час не встановлено, значення застосовується як системний час пристрою. Код описаної функції наведений на рисунку 2.5.

```

esp_err_t proceed_time_handle(esp_ble_gatts_cb_param_t *param){
    if(param->write.handle != _handle_table[IDX_0_CHAR_5_T_VAL]){
        return ESP_OK;
    }
    uint16_t len;
    uint8_t* data;
    esp_ble_gatts_get_attr_value(param->write.handle, &len, (const uint8_t*)&data);
    time_t gottime = convertToTime(len, data);

    setSystemTime(gottime);

    if(!_setted_actual_time_and_started_processing){
        _setted_actual_time_and_started_processing = true;
        startProcessingTimer();
    }

    return ESP_OK;
}

```

Рисунок 2.5. Код функції оброблення події синхронізації часу

- `proceed_first_control_handle` – використовується під час запиту на отримання збережених записів за певний часовий проміжок. Послідовність байтів із першої контрольної характеристики конвертується в пару часових міток (`timestamp_start`, `timestamp_end`). Далі формується запит до системи збереження сенсорних даних, а отримані результати передаються через першу характеристику передавання даних. Код функції оброблення події запиту даних за певний часовий період наведений на рисунку 2.6.

```

esp_err_t proceed_first_control_handle(esp_ble_gatts_cb_param_t *param){
    if(param->write.handle != _handle_table[IDX_0_CHAR_0_C_VAL]){
        return ESP_OK;
    }
    uint16_t len;
    uint8_t* data;
    static sensor_entries sentries;
    free_sensor_entries(&sentries);

    esp_ble_gatts_get_attr_value(param->write.handle, &len, (const uint8_t*)&data);
    time_pair tpair = convertToTimePair(len, data);
    time_segment tsegment = prepareTimeSegment(&tpair);
    sentries = readEntriesByTimeSegment_m(tsegment);

    change_value_and_notify(_handle_table[IDX_0_CHAR_1_D_VAL], _conn_id, sentries.count * ENTRY_SIZE, sentries.data);

    return ESP_OK;
}

```

Рисунок 2.6. Код функції оброблення події запиту даних за певний часовий період

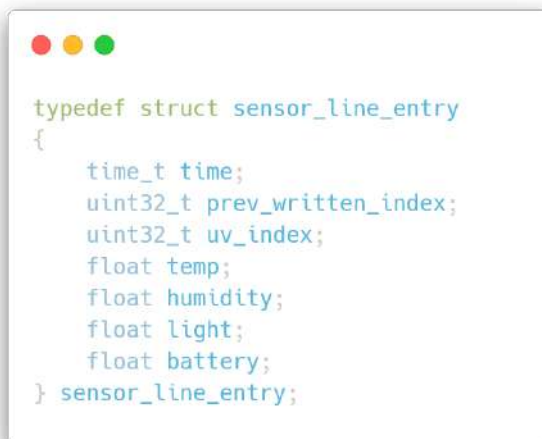
- `proceed_second_control_handle` – обробляє запити на виконання команд налагодження. Отримані байти з другої контрольної характеристики інтерпретуються як код команди та додаткові параметри (якщо є). За потреби результати виконання команди формуються у відповідь і записуються в другу характеристику передавання даних.

2.2.4. Структура збереження даних

Структура `sensor_line_entry` використовується для зберігання повного набору сенсорних даних, зібраних у певний момент часу. Вона містить такі поля:

- `time_t time` – мітка часу у форматі Unix-часу, яка вказує, коли отримано сенсорні дані. Відповідає часовій точці, кратній п'яти хвилинам.
- `uint32_t prev_written_index` – індекс попереднього запису в системі збереження.
- `uint32_t uv_index` – значення UV-індексу, що показує рівень ультрафіолетового випромінювання в момент процесу збирання.
- `float temp` – температура повітря в градусах Цельсія.
- `float humidity` – відносна вологість повітря у відсотках.
- `float light` – рівень освітлення, у люксах.
- `float battery` – поточна напруга батареї.

Нижче, на рисунку 2.7, наведений код цієї структури.



```
typedef struct sensor_line_entry
{
    time_t time;
    uint32_t prev_written_index;
    uint32_t uv_index;
    float temp;
    float humidity;
    float light;
    float battery;
} sensor_line_entry;
```

Рисунок 2.7. Структура збереження даних для повного набору сенсорних даних

Окрім структури `sensor_line_entry`, що описує окремий запис сенсорних даних, у системі також використовується структура `sensor_entries`, яка призначена для представлення колекції сенсорних записів. Вона містить такі поля:

- `sensor_line_entry* data` – вказівник на масив структур `sensor_line_entry`. Цей масив зберігає кілька послідовних записів даних сенсорів, які можна отримати з пам'яті або підготувати до передавання клієнту.
- `uint16_t count` – кількість записів у масиві `data`.

У проєкті для збереження історії даних сенсорів використовується файловий розділ, що ґрунтується на файловій системі SPIFFS (SPI Flash File System). Ця система надає змогу працювати з даними як з бінарними файлами без додаткових потреб. Загалом для збереження даних виділено 1 МБ флешпам'яті.

Оскільки флешпам'ять має обмежену кількість циклів перезапису, вирішено організувати запис у бінарний файл, попередньо розмічений на фіксовану кількість записів. Це дає змогу перезаписувати окремі записи за індексом, що значно продовжує термін служби флешпам'яті.

Файл для збереження даних має розмір розрахований на 288 записів, що відповідає 24 годинам збору даних із п'ятихвилинним інтервалом. Такий підхід уможливорює зберігати дані за один день. За необхідності, можна з мінімальними змінами збільшити розмір і чергувати записи між сегментами пам'яті для збільшення терміну експлуатації флешпам'яті.

Сенсорні дані зберігаються у файлі «/spiffs/day_entry_storage.bin». Для спрощення роботи із цим файлом реалізовано набір функцій.

Для ініціалізації зберігання – функція `initializeStorageIfNeeded` перевіряє наявність файлу. Якщо файл відсутній, він створюється з попередньо визначеним розміром, що вміщає 288 записів.

Для запису даних реалізовані такі функції:

- `writeEntryByIndex` – запис за індексом;
- `writeEntryByTime` – запис за часом;
- `writeToNextIndex` – автоматичний запис у наступну комірку.

Код функції `writeEntryByIndex` наведений на рисунку 2.8.



```
bool writeEntryByIndex(sensor_line_entry *entry, uint16_t index){
    entry->prev_written_index = _last_written_index;
    bool ret = writeToFile(getStorageName(), ENTRY_SIZE * index, ENTRY_SIZE, (uint8_t*)entry);
    _last_written_index = index;
    return ret
}
```

Рисунок 2.8. Код збереження даних сенсорів у системі збереження за заданим індексом

Індекс для запису обчислюється як номер п'ятихвилинного інтервалу від початку доби.

Для читання даних передбачено функції:

- `readEntriesByIndex_m` – читання за індексом;

- `readEntriesByTimeSegment_m` – читання за часовим сегментом, що дає змогу отримати записи з певного періоду часу.

Для очищення пам'яті реалізовано функцію `free_sensor_entries`. Окрім цього, є можливість фільтрування даних за останні 24 години через функцію `filter_last_24h`, що залишає лише актуальні записи.

2.2.5. Організація збору даних

Оскільки після запуску пристрою час за замовчуванням встановлений на 1900 рік, виникає необхідність у синхронізації системного часу. Без коректного часу неможливо забезпечити правильне збереження та подальше повернення записів сенсорних даних. Щоб уникнути помилок у часових мітках, прийнято рішення не починати збір даних до моменту успішної синхронізації. Збирання та збереження сенсорних даних запускається лише після того, як пристрій отримає точний поточний час. Через це успішна синхронізація часу запускає фонове завдання `processSensorDataTask`, наведене на рисунку 2.9.

```

void processSensorDataTask(void *param) {
    while (1)
    {
        retrieve_all_data();
        sensor_line_entry dataline = get_sensor_line_entry_data();
        dataline.time = getNextPrettyTime();
        writeEntryByEntryData(&dataline);
        change_value_and_notify(_handle_table[IDX_0_CHAR_4_D_VAL], _conn_id, ENTRY_SIZE, &dataline);
        calculateNextPrettyTimeDelta();
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(
            getDeltaToNextPrettyTimeMs()
        ));
    }
    vTaskDelete(NULL);
}

```

Рисунок 2.9. Код функції процесу зняття даних з сенсорів з періодичністю в п'ять хвилин

Фонове завдання `processSensorDataTask` в безперервному циклі виконує такі дії:

1. Визначення наступної часової мітки збору даних – обчислено найближчий момент часу, кратний п'яти хвилинам, що використано як орієнтир для запуску збору сенсорної інформації.

2. Очікування необхідного моменту – завдання переходить у режим сну за допомогою `vTaskDelay`, поки не настане обчислений момент часу.

3. Збір даних із сенсорів – викликано `retrieve_all_data`, після чого створено структура `sensor_line_entry`, що містить нові дані.

4. Прив'язка часу до даних – у поле `time` записано значення з `getNextPrettyTime`, що відображає момент збирання.

5. Збереження отриманих даних – новостворений запис передано до системи збереження за допомогою `writeEntryByEntryData`.

6. Сповіщення клієнта – актуальні дані надіслано клієнту через відповідну характеристику, передавання періодичних даних за допомогою функції `change_value_and_notify`, зображеної на рисунку 2.10.

```
esp_err_t change_value_and_notify_gattsif(uint16_t handle, uint16_t conn_id, uint16_t length, uint8_t *data, esp_gatt_if_t gatts_if){
    esp_err_t ret;
    if(conn_id != NULL_CONN_ID){
        ret = esp_ble_gatts_send_indicate(gatts_if, conn_id, handle, sizeof(length), &length, false);
        if(ret != ESP_OK){
            return ret;
        }
    }
    return esp_ble_gatts_set_attr_value(handle, length, data);
}

esp_err_t change_value_and_notify(uint16_t handle, uint16_t conn_id, uint16_t length, uint8_t *data){
    return change_value_and_notify_gattsif(handle, conn_id, length, data, client_profile_tab[PROFILE_APP_IDX].gatts_if);
}
```

Рисунок 2.10. Функція оновлення значення характеристики

2.3. Розроблення мобільного застосунку для Android

2.3.1. Вибір архітектури та інструментів

У рамках реалізації прототипу мобільного застосунку обрана платформа Android, оскільки це одна з поширених операційних систем для мобільних пристроїв. У майбутньому, після завершення етапу розроблення прототипу, застосунок може бути адаптовано до інших популярних платформ, наприклад iOS [19].

Для розроблення застосунку обрано Android Studio – офіційне інтегроване середовище розроблення. Android Studio надає широкий спектр інструментів для створення, тестування, налагодження застосунків, що надає можливість суттєво спростити процес розроблення [20].

Аби забезпечити зручну та логічну взаємодію користувача з Android-застосунком, реалізовано архітектуру на основі фрагментів (Fragment-based) у межах одного Activity (Single-Activity Architecture), де основним елементом навігації обрано шаблон з Navigation Drawer Activity. Цей підхід дає змогу структурувати навігацію між основними модулями застосунку як окремих фрагментів, доступ до яких здійснюється через бокове меню. Це рішення надає користувачу метод навігації між екранами та надає можливість для подальшого масштабування та підтримання проєкту.

2.3.2. Фрагменти та їхній функціонал

Navigation Drawer у проєкті містить пункти меню, які відповідають основним фрагментам.

Фрагмент налаштування типу шкіри та MED надає користувачу можливість обрати свій фототип відповідно до класифікації Фіцпатріка або вручну ввести відоме значення MED. У момент вибору типу шкіри значення MED автоматично підставляється згідно з типовими показниками для

відповідного типу (код наведений на рисунку 2.11), однак за потреби користувач може вказати власне значення.

```
void changeMEDUsingType(RadioGroup group, int checkedId){
    int selectedId = group.indexOfChild(_view.findViewById(checkedId));
    if (selectedId != -1) {
        float defaultMed = DEFAULT_MED_VALUES[selectedId];
        _medInput.setText(String.valueOf(defaultMed));
        saveValues();
    }
}
```

Рисунок 2.11. Код зміни та збереження значення MED відповідно до обраного типу шкіри

Отримане значення використовується в подальших обчисленнях індивідуального впливу УФ-випромінювання та оцінювання ризику виникнення сонячних опіків.

Для перегляду набраного УФ-опромінення у фрагменті реалізовано шкалу накопиченої дози УФ-опромінення та два графіки:

- Перший графік – це графік, який відображає накопичену дозу впродовж доби (із кроком п’ять хвилин), з урахуванням фактичних даних та ефективної дози після нанесення сонцезахисного крему.

Код підготування даних ефективної дози УФ-опромінення наведений на рисунку 2.12.

```

public static List<Entry> applySunCreamProtectionToEntryList(List<SunCream> sunCreams, List<Entry> entries) {
    List<Entry> result = new ArrayList<>();
    if (sunCreams.isEmpty() || entries.isEmpty()) return entries;

    Iterator<Entry> entryIterator = entries.iterator();
    Iterator<SunCream> sunCreamIterator = sunCreams.iterator();

    List<SunCream> activeSunCreams = new ArrayList<>();
    SunCream currentSunCream = sunCreamIterator.hasNext() ? sunCreamIterator.next() : null;

    while (entryIterator.hasNext()) {
        Entry entry = entryIterator.next();
        long currentTime = (long) entry.getX();
        float uvValue = entry.getY();

        activeSunCreams.removeIf(sunCream -> currentTime >= sunCream.get_applicationTime() + sunCream.get_durationMillis());

        while (currentSunCream != null && currentTime >= currentSunCream.get_applicationTime()) {
            activeSunCreams.add(currentSunCream);
            currentSunCream = sunCreamIterator.hasNext() ? sunCreamIterator.next() : null;
        }

        float maxProtection = activeSunCreams.stream()
            .map(SunCream::get_protectionFactor)
            .max(Float::compare)
            .orElse(1.0f);

        float adjustedUV = applySpfOnValue(uvValue, maxProtection);
        result.add(new Entry(currentTime, adjustedUV));
    }

    return result;
}

```

Рисунок 2.12. Код для перерахунку отриманої дози УФ-опромінення з врахуванням дії кремів для побудови графіків

- Другий графік – це кумулятивний графік, який показує сумарну УФ-дозу, що поступово накопичується впродовж доби.

Для конвертування УФ-індексу в дозу використані такі розрахунки [21]:

$$I = 25.0 \cdot UVI,$$

де I – інтенсивність УФ-випромінювання; UVI – УФ-індекс.

$$D = I^{4/3} \cdot time,$$

де D – доза УФ-опромінення; $time$ – час перебування під сонцем.

Код, який виконує ці обрахунки, наведено на рисунку 2.13.

```
private void calculateDoseBasedApprox0F5min(){
    this._uvDose = calculateDoseUnix(this._uvIndex, DatabaseManager.ONE_MIN_THRESHOLD*5);
}

public static float calculateDoseUnix(byte UVI, long time){
    return calculateDose(UVI, time / 3600000.0);
}

public static float calculateDose(byte UVI, double time){
    double I = 25.0 * UVI;
    double D = Math.pow(I, 4.0 / 3.0) * time;
    return (float) D;
}
```

Рисунок 2.13. Код обрахунків дози УФ-опромінення

На графіках для відображення отриманої та ефективної дози УФ-випромінювання застосовано різні кольори, що візуально виокремлює часові інтервали, коли нанесено сонцезахисний крем. Це дає змогу оцінити захист у певні періоди впродовж дня. Крім того, реалізовано спеціальну шкалу, яка відображає загальну накопичену дозу за день та її відсоткове співвідношення до вказаного значення MED. Шкала поступово заповнюється відповідно до накопиченої дози, змінюючи свій колір і текстове повідомлення в момент досягнення визначених меж, що виконує роль індикатора потенційної загрози виникнення сонячного опіку.

Фрагмент використання сонцезахисного крему надає користувачу інформацію у форматі графіка про часові проміжки, коли використаний сонцезахисний крем та значення крему з найбільшим SPF, використаного в кожен момент часу, через можливість накладання використань. Користувач має змогу додавати нові записи або видаляти наявні.

Під час додавання нового запису можна вказати SPF засобу та тривалість його дії. Додатково, є можливість зафіксувати нанесення крему в поточний момент або вибрати час застосування впродовж останніх 24 годин. Застосунок автоматично обчислює ефективний рівень захисту на

кожному етапі дня, враховуючи як SPF, так і термін дії сонцезахисного крему. Отримані дані використовуються для визначення ефективної УФ-дозы, що відображається у відповідному фрагменті. Варто зазначити, що останні введені користувачем значення SPF та тривалості дії сонцезахисного крему зберігаються за допомогою механізму постійного сховища SharedPreferences. Це забезпечує зручність повторного використання попередніх параметрів без необхідності вводити їх вручну щоразу під час додавання нового запису.

Фрагмент доєднання до BLE-пристрою забезпечує користувачу інтерфейс для виявлення доступних поблизу пристроїв через сканування, вибору потрібного пристрою зі списку та подальшого доєднання або від'єднання від нього.

Фрагмент інформації про батарею надає користувачу візуальне уявлення про зміни рівня заряду пристрою за останній період у форматі графіка. На графіку відображається історія рівня заряду батареї із часовими мітками, що дає змогу відстежувати як змінювався заряд упродовж дня. Крім того, у фрагменті реалізована функція запиту до вбудованої нейронної мережі, яка здійснює прогнозування рівня заряду на найближчі одну, дві та три години на основі попередніх значень, показників сенсорів та навколишніх умов. Результати прогнозування відображаються на графіку як окрема лінія, що надає можливість користувачу оцінити потенційний рівень заряду та планувати подальше використання пристрою.

Завдяки використанню фрагментів, кожна функціональна частина застосунку є модульною, із власним циклом роботи та логікою.

Це уможлиблює уникати навантаженості в головному Activity, а також полегшує тестування, налагодження та майбутнє масштабування застосунку.

2.3.3. Збереження даних на пристрої

Аби забезпечити наявність історії вимірювань, в системі реалізовано збереження даних безпосередньо на пристрої з використанням SQLite – вбудованої реляційної бази даних Android. Для спрощення доступу до бази даних, організації CRUD-операцій та забезпечення роботи з даними використовується Room ORM (Object-Relational Mapping) – абстракція над SQLite від Google. Для збереження та використання створено кілька класів: сенсорні показники (SensorLineEntry), які відповідають структурі збереження на пристрої – sensor_line_entry, дані про крем (SunCream), для відстеження та збереження використань сонцезахисних кремів.

У класі SunCream фіксується інформація про нанесення сонцезахисного крему: час застосування, тривалість дії, SPF.

Для роботи з базою даних створено AppDatabase – основний інтерфейс до SQLite через Room. Кожна сутність має відповідний тип DAO (Data Access Object):

- SensorDataDao – для записів сенсорних даних;
- SunCreamDao – для роботи з нанесеннями сонцезахисного крему.

Основні реалізовані операції:

- Додавання одного або кількох записів (insert, insertAll), з перевіркою на наявність входжень дублікатів із різницею вказаний як параметр. Приклад коду додавання одного запису до бази даних наведено на рисунку 2.14.

```

public void insertSensorLineEntry(SensorLineEntry entry, long threshold) {
    _executorService.execute(() -> {
        long earliestTime = entry.get_time() - threshold;
        long latestTime = entry.get_time() + threshold;

        List<SensorLineEntry> existingData;
        existingData = _database.sensorDataDao().getDataWithinTimeRange(earliestTime, latestTime);

        boolean isDuplicate = false;
        for (SensorLineEntry existingEntry : existingData) {
            if (Math.abs(existingEntry.get_time() - entry.get_time()) <= threshold) {
                isDuplicate = true;
                break;
            }
        }

        if (!isDuplicate && Autil.getTwentyFourHoursAgoTimes(5) <= entry.get_time()
            && entry.get_time() <= Autil.getTwentyFourHoursAgoTimes(-1) ) {
            _database.sensorDataDao().insert(entry);
        } else {
            Log.d("DatabaseManager", "Duplicate entry found, skipping insert.");
        }
    });
}

```

Рисунок 2.14. Код перевірки дублікації та додання нового запису сенсорних даних до бази даних

- Видалення старих записів за вказаний період часу. Приклад коду наведений на рисунку 2.15.

```

@Query("DELETE FROM sensor_data WHERE _time < :timeThreshold")
void deleteEntriesOlderThanTimeThreshold(long timeThreshold);

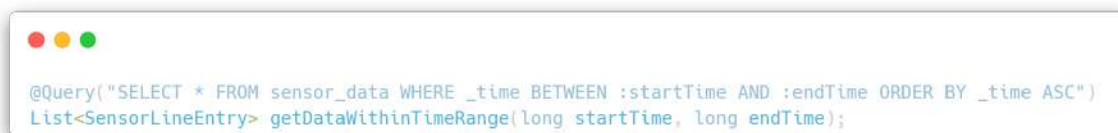
@Query("DELETE FROM sensor_data WHERE _time BETWEEN :startTime AND :endTime")
void deleteEntriesInRange(long startTime, long endTime);

```

Рисунок 2.15. Код запиту до бази даних для видалення старих записів за вказаний період часу

- Отримання даних у вказаному діапазоні (наприклад, за останні 24 години або за сьогодні) та сортування результатів за часом (висхідне/низхідне), для коректного виведення на графіках.

Приклад запиту до бази даних для отримання збереженої інформації наведений на рисунку 2.16.



```
@Query("SELECT * FROM sensor_data WHERE _time BETWEEN :startTime AND :endTime ORDER BY _time ASC")
List<SensorLineEntry> getDataWithinTimeRange(long startTime, long endTime);
```

Рисунок 2.16. Код запиту до бази даних для отримання збереженої інформації

Усі запити до бази даних виконуються у фоновому потоці для забезпечення плавності роботи інтерфейсу.

Окрім повноцінної бази даних, мобільний застосунок також зберігає конфігураційні параметри, як MED, через SharedPreferences – легковаговий механізм збереження примітивних значень (чисел, рядків, логічних прапорців) у форматі пар ключ-значення. Це уможлиблює зберігати вибраний тип шкіри або індивідуальне MED-значення після перезапуску застосунку, забезпечуючи персоналізований користувацький досвід.

Код для встановлення та збереження значення MED наведений на рисунку 2.17.



```
public void setSkinMED(float MED, Context context){
    SharedPreferences sharedPreferences = context.getSharedPreferences(PREFERENCES_FILE, Context.MODE_PRIVATE);
    SharedPreferences.Editor editor = sharedPreferences.edit();
    editor.putFloat(KEY_SKIN_TYPE_MED, MED);
    editor.apply();
    _MED = MED;
}

public float getSkinMED(){
    return _MED;
}
```

Рисунок 2.17. Код функції для встановлення та збереження значення MED

Уся взаємодія з базою даних та додатковими збереженими значеннями централізована через клас DatabaseManager, реалізований за

шаблоном Singleton. Цей підхід гарантує, що в усьому застосунку є лише один екземпляр бази даних, що унеможлиблює помилки, пов'язані з одночасним доступом із кількох потоків або створенням кількох екземплярів Room. DatabaseManager є єдиною точкою входу для зчитування та запису даних, надаючи доступ до DAO-інтерфейсів.

2.3.4. Взаємодія з пристроєм

Клас BleManager реалізує шаблон Singleton і є основною точкою взаємодії з BLE-пристроями в мобільному застосунку. Його призначення – централізовано керувати всіма аспектами роботи з Bluetooth Low Energy:

- сканування доступних BLE-пристроїв, фільтрування за назвою або UUID сервісу;
- під'єднання та від'єднання до пристрою з контролем стану з'єднання;
- ініціалізацію сервісів та характеристик після успішного під'єднання;
- синхронізацію поточного часу між смартфоном і пристроєм одразу після під'єднання;
- запит та оброблення даних із пристрою за відсутні часові періоди впродовж останніх 24 годин;
- дозвіл на періодичні сповіщення з пристрою для отримання актуальних сенсорних даних;
- надсилання та оброблення команд налагодження для розширеного аналізування роботи пристрою.

Завдяки використанню шаблону Singleton, BleManager забезпечує узгоджене використання Bluetooth-ресурсів у всьому застосунку, уникаючи дублювання логіки або конфліктів із доступом до GATT-під'єднання.

Сканування BLE-пристроїв починається з методу `startScan`, який запускає сканування з налаштованими фільтрами. Код наведений на рисунку 2.18.

```
public void startScan(ScanCallback scanCallback) {
    if (_bluetoothAdapter != null && _bluetoothAdapter.isEnabled()) {
        _bleScanner = _bluetoothAdapter.getBluetoothLeScanner();
        if (_bleScanner != null) {
            _bleScanner.startScan(_bleFilters, _scanSettings, scanCallback);
            Log.d(TAG, "BLE scan started");
        }
    }
}
```

Рисунок 2.18. Код методу ініціалізації пошуку BLE-пристроїв

Після виявлення пристроїв результат повертається через зворотний виклик `ScanCallback`.

Під'єднання до пристрою відбувається через метод `connectToDevice`, який ініціює з'єднання через GATT, встановлює MTU та виявляє сервіси. Після успішного доєднання відбувається ініціалізація характеристик та синхронізація часу. Код наведений на рисунку 2.19.

```
public void onServicesDiscovered(BluetoothGatt gatt, int status) {
    if (status == BluetoothGatt.GATT_SUCCESS) {
        handleTimeSync(gatt);
        initNotifications();
        Log.d(TAG, _appContext.getString(R.string.services_discovered));
    } else {
        Log.e(TAG, _appContext.getString(R.string.service_discovery_failed_with_status) + status);
    }
}
```

Рисунок 2.19. Код оброблення події успішного з'єднання та початку синхронізації

Синхронізація часу починається з методу `handleTimeSync`, який викликається одразу після під'єднання та використовується для синхронізації поточного часу з пристроєм через `syncTimeWithDevice`, де

використовується загальний метод для запису в характеристику `writeToCharacteristic`.

Після синхронізації часу відбувається процес отримання даних із відсутніх часових проміжків – `getDataFromTimePeriod`, що записує часовий проміжок у характеристику, а `proceedTimePeriodDataRetrieval` отримує та обробляє передані дані сенсорів, що збережені на пристрої, але не передані застосунку, після цього дані зберігаються в локальну базу даних через `DatabaseManager`.

Для отримання періодичних даних через сповіщення після під'єднання до пристрою автоматично виконується операція надання дозволу для їхнього отримання за допомогою запису на відповідну характеристику (метод `initNotifications`). Для оброблення цих даних використовується метод `proceedPeriodicDataRetrieval`, який обробляє отриману інформацію та додає її до бази даних. Відповідна частина коду наведена на рисунку 2.20.

```

private void handlePeriodicDataRetrievalChange(BluetoothGatt gatt, BluetoothGattCharacteristic characteristic){
    if(!characteristic.getUuid().equals(_uuid_char_4_d)){
        return;
    }

    Integer length = characteristic.getIntValue(BluetoothGattCharacteristic.FORMAT_UINT16, 0);
    _expectedDataSize = length;
    _bluetoothGatt.readCharacteristic(characteristic);
}

private void proceedPeriodicDataRetrieval(BluetoothGatt gatt, BluetoothGattCharacteristic characteristic, byte[] data){
    if(!characteristic.getUuid().equals(_uuid_char_4_d)){
        return;
    }
    SensorLineEntry dataLine;
    try {
        dataLine = new SensorLineEntry(data);
    } catch (IOException e) {
        throw new RuntimeException(e);
    }

    DatabaseManager.getInstance().insertSensorLineEntry(dataLine, DatabaseManager.ONE_MIN_THRESHOLD);
}

public void onCharacteristicChanged(BluetoothGatt gatt, BluetoothGattCharacteristic characteristic) {
    byte[] data = characteristic.getValue();
    String value = new String(data);
    Log.d("BleManager", "Received update: " + value);

    handlePeriodicDataRetrievalChange(gatt, characteristic);
    handleTimePeriodDataRetrievalChange(gatt, characteristic);
    handleDebugDataRetrievalChange(gatt, characteristic);
}

```

Рисунок 2.20. Код, для отримання та оброблення періодичних даних

Надсилання команд налагодження відбувається за допомогою `askDebugData` з відповідним кодом команди, `proceedDebugDataRetrieval` виконує розбір цих даних, зберігаючи результати у `DatabaseManager` для подальшого аналізування.

Такий підхід надає такі переваги:

- Ізоляція логіки – BLE: `BleManager` повністю ізолює низькорівневу BLE-логіку від UI-компонентів (компонентів інтерфейсу користувача), сприяючи чистій архітектурі.
- Реактивність – оброблення подій через `BluetoothGattCallback` дає можливість негайно реагувати на зміни стану або отримання даних.
- Гнучкість – Реалізація окремих методів оброблення для різних характеристик уможливорює легко розширювати логіку без порушення наявної.

2.3.5. Механізм надсилання сповіщень

У межах функціональності Android-застосунку реалізовано механізм надсилання сповіщень користувачу про необхідність повторного нанесення сонцезахисного крему. Цей механізм базується на аналізуванні трьох вагомих параметрів:

- Останнє нанесення сонцезахисного крему – враховується встановлена користувачем тривалість дії SPF-засобу та час застосування.
- Накопичена доза ультрафіолетового випромінювання – яка розраховується за отриманими записами від BLE-пристрою та записами використання сонцезахисних кремів.
- Навколишні умови – як-от температура, вологість, отримані за записами від BLE-пристрою, які можуть вплинути на ефективність захисту.

Базуючись на цих даних застосунок обробляє інформацію та, за потреби, ініціює сповіщення, яке рекомендує користувачу повторно нанести

крем або уникати сонця, щоб уникнути надмірного впливу УФ-випромінювання.

Код прийняття рішення про необхідність надсилання сповіщення про необхідність завчасного нанесення сонцезахисного крему наведений на рисунку 2.21.

A screenshot of a code editor window showing a Java method named `shouldReapplyEarlier`. The code is as follows:

```
private boolean shouldReapplyEarlier(long remainingTime) {
    long earlierMinutes = baseRemainingTime;
    _highHum = false;
    _highTemp = false;

    if (_averageTemp > 30) {
        earlierMinutes += 15;
        _highTemp = true;
    }
    if (_averageHum > 65) {
        earlierMinutes += 15;
        _highHum = true;
    }

    if (_highHum || _highTemp) {
        return remainingTime < earlierMinutes * 60 * 1000;
    }
    return false;
}
```

Рисунок 2.21. Код прийняття рішення необхідності надсилання завчасного сповіщення

2.4. Навчання нейронної мережі для прогнозування заряду батареї

У цьому підрозділі описано побудову, навчання нейронної мережі, що прогнозує зміну заряду акумулятора системи на основі умов довкілля.

2.4.1. Використання часової мережі згортання TCN (Temporal Convolutional Network)

Для прогнозування зміни заряду батареї використано основу від Temporal Convolutional Network (TCN), яка демонструє суттєві переваги над класичними рекурентними нейронними мережами (RNN), зокрема LSTM та GRU, у завданнях моделювання часових рядів.

Причини вибору TCN [22, 23]:

1. Причинно-обумовлені згортки (Causal Convolutions).

Основна властивість TCN – відсутність передавання інформації з майбутнього в минуле. На відміну від звичайних згорткових мереж, у TCN використовується причинна згортка. Це означає, що значення залежить лише від значень у попередні моменти часу. Це критично важливо для завдань прогнозування, де не можна використовувати дані з майбутнього.

2. Розріджені згортки (Dilated Convolutions).

Застосування розріджених згорток надає змогу значно розширити ефективне вікно історії без необхідності збільшення глибини мережі. Завдяки цьому модель здатна охоплювати локальні й глобальні закономірності в часовому ряді.

3. Паралельність обчислень.

На відміну від рекурентних моделей, TCN обробляє всю послідовність одночасно, а не послідовно за один крок часу. Це забезпечує суттєве пришвидшення під час навчання та прогнозування.

4. Стабільність градієнтів та ефективне навчання.

TCN не має проблеми згасання або вибухання градієнтів, яка характерна для RNN. Це зумовлено відсутністю часової залежності у зворотному поширенні помилки.

5. Гнучкість у виборі ділянки пам'яті.

TCN надає змогу змінювати розмір ефективного вікна контексту через налаштування глибини, ширини фільтрів та розрідження. Це дає змогу адаптувати архітектуру до конкретного завдання або типу даних без радикальної зміни структури.

6. Підтримування змінної довжини вхідних послідовностей.

Подібно до RNN, TCN може обробляти послідовності довільної довжини, що забезпечує її універсальність у роботі з даними реального часу.

2.4.2. Підготовлення даних

Для формування контексту передбачення обрані такі параметри:

- Час (часові мітки) – використовується для організації даних як послідовного часового ряду, що надає змогу моделі виявляти закономірності у зміні параметрів з часом.
- Температура повітря – може безпосередньо впливати на роботу сонячної панелі та на поведінку акумулятора, зокрема його внутрішній опір та здатність до заряджання.

УФ-індекс – є важливим індикатором інтенсивності сонячного випромінювання. Це значення допомагає моделі враховувати можливість прямого освітлення панелі сонцем.

Освітленість (Lux) – характеризує загальну кількість світла, яке потрапляє на панель, і дає змогу моделі оцінити інтенсивність освітлення, що має безпосередній вплив на вироблення енергії.

Вологість повітря – висока вологість може вказувати на наявність туману або хмарності, що зменшить рівень освітленості. Це надає моделі точніше оцінити контекст генерування енергії.

Як цільову змінну для прогнозування обрано зміну заряду батареї за певний проміжок часу відносно останнього відомого значення. Такий підхід

є коректним за умови оптимального формування навчальної вибірки, зокрема, коли батарея не перебуває в стані повного заряду в періоді потенційного генерування енергії.

Підготовлення даних для навчання моделі розпочинається з попереднього оброблення, яке містить кілька важливих етапів. Насамперед для зменшення впливу випадкових шумів та поодиноких стрибків значень, здійснюється згладжування даних – обчислення медіанного значення для кожного параметра в обраний часовий інтервал. Такий підхід забезпечив стійкість до аномальних сплесків і надав можливість отримати репрезентативніше значення стану середовища.

Для забезпечення коректності обчислень подальшим кроком є усунення всіх записів із відсутніми значеннями.

Для врахування майбутнього контексту в моделі використовується прогнозування погоди, отримане з API Open-Meteo [24]. Цей сервіс надає безоплатний доступ до погодних даних із мінімальним часовим кроком в одну годину. На основі цих даних отримані прогнозовані значення температури, вологості, УФ-індексу та рівня хмарності на найближчі три години.

Цей сервіс також інтегрований у мобільний застосунок, де використовується для забезпечення моделі відповідним майбутнім контекстом у режимі реального часу.

Оскільки модель працює з даними з кроком у п'ять хвилин, прогнозовані значення проходять інтерполяцію для приведення до необхідної частоти. Додатково рівень хмарності обробляється для апроксимації рівня освітленості, щоби спрогнозувати роботу сенсора освітленості.

Далі формується вхідний контекст, який містить дві частини: фактичних вимірювань за попередні три години та прогнозованих погодних параметрів на наступні три години. Обидві частини мають часовий крок у

п'ять хвилин, що в сумі дає 72 часові відмітки (36 + 36). Для кожної відмітки враховуються чотири параметри: температура, вологість, рівень освітленості та УФ-індекс. Так, модель отримувала вхідний тензор розмірності (72, 4).

Для кожного тензора контексту генерується послідовність змін заряду батареї для 36 майбутніх часових міток, де кожна зміна визначається як різниця між значенням заряду на момент останнього фактичного моменту в контексті та відповідним значенням заряду в майбутній часовій мітці.

2.4.3. Архітектура моделі на основі TCN

Побудована модель базується на послідовній архітектурі (Sequential) з використанням часової згорткової мережі (TCN). Структура моделі містить кілька шарів:

1. InputLayer:

- Вхідний шар приймає послідовності довільної довжини (None), що надає змогу моделі працювати з різними часовими контекстами. Кількість параметрів (4) відповідає числу вхідних ознак: температура, вологість, УФ-індекс та освітленість.

2. TCN-шар:

- Обрана кількість фільтрів надає змогу мережі видобувати шаблони з даних, водночас не збільшуючи надмірно кількість параметрів.
- Ядро згортки розміром 3 забезпечує локальний контекст для кожного елемента послідовності, що надає можливість моделі виявляти короткотривалі залежності між параметрами.
- Обрана конфігурація розріджених згорток уможливорює моделі охоплювати різні масштаби залежностей у даних. Мале розрідження (1) надає можливість моделі виявляти короткотривалі залежності, тоді як велике розрідження (16) надає можливість враховувати довготривалі

зв'язки, що є критичними для прогнозування на триваліших часових інтервалах.

- Параметр `padding` зазначає використання причинно-обумовленої згортки.
- Використання залишкових з'єднань допомагає моделі передавати градієнти через кілька шарів. Це дає змогу уникнути проблеми згасання градієнтів і покращує навчання.
- Регуляризація через випадкове вимкнення 10 % нейронів на кожній ітерації допомагає уникати перенавчання, що є важливим для забезпечення стабільності моделі.
- Повернення всієї послідовності уможливорює передбачення одразу декількох значень майбутніх моментів часу.
- Функція активації `LeakyReLU` уможливорює пропускати малу кількість негативних значень, що допомагає уникати проблеми «мертвих нейронів» і підтримувати активність нейронів за негативних значень входу.

3. Шар `Lambda`:

- обрізає вихід `TCN`, залишаючи лише останні 36 часових моментів, які відповідають прогнозованим майбутнім значенням.

4. Щільні шари (`Dense`):

- Перший щільний шар (128 нейрони). Цей шар надає моделі будувати складніші зв'язки між часовими шаблонами та результатом. Активація `LeakyReLU` допомагає моделі залишатися гнучкою.
- Другий щільний шар (64 нейрони). Цей шар забезпечує глибше узагальнення даних, що надає можливість моделі зосереджуватися на найбільш важливих закономірностях перед кінцевим передбаченням.
- Вихідний шар (`Dense(1)`). Відповідає регресійному прогнозуванню зміни заряду батареї на кожному з 36 часових моментів.

5. LearnableOffset:

- Цей додатковий шар додає зсув значення, з можливістю навчання, до фінального передбачення, що надає моделі краще компенсувати потенційні систематичні відхилення.

Для навчання моделі використовується оптимізатор Adam, який є адаптивним варіантом стохастичного градієнтного спуску та забезпечує ефективне оновлення ваг мережі за наявності градієнтів із шумом. Як функцію втрат (loss function) обрано середньоквадратичну помилку (MSE, Mean Squared Error), яка є однією з поширених метрик для завдання регресії, оскільки вона посилює вплив великих відхилень і сприяє зменшенню загальної похибки прогнозування.

Загальний код розробленої моделі наведений на рисунку 2.22.

```

class LearnableOffset(Layer):
    def __init__(self):
        super(LearnableOffset, self).__init__()
        self.offset = self.add_weight(name="offset", shape=(), initializer="zeros", trainable=True)

    def call(self, inputs):
        return inputs + self.offset

model = Sequential([
    InputLayer(input_shape=(None, X.shape[2])),

    TCN(
        nb_filters=256,
        kernel_size=3,
        dilations=[1, 2, 4, 8, 16],
        padding='causal',
        use_skip_connections=True,
        dropout_rate=0.1,
        return_sequences=True,
        activation=LeakyReLU(alpha=0.01)
    ),
    Lambda(lambda x: x[:, -36:, :]),
    Dense(128, activation=LeakyReLU(alpha=0.01)),
    Dense(64, activation=LeakyReLU(alpha=0.01)),

    Dense(1),
    LearnableOffset()
])

model.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae', 'mse', 'cr2_metric])

```

Рисунок 2.22. Код структури моделі

2.5. Висновки до розділу 2

Отже, у розділі розглянуто вагомі етапи побудови енергоощадного приладу для моніторингу УФ-випромінювання, температури, освітленості, вологості та рівня заряду батареї.

Особливу увагу приділено вибору компонентів, організації передавання даних через BLE, збереженню інформації на пристрої та процесу збору даних. Окрім того, описано структуру мобільного застосунку, який побудовано на основі фрагментів у межах одного Activity, а також його взаємодію з пристроєм через BLE. У застосунку реалізована система збереження даних і механізм надсилання сповіщень, що залежать від часу дії сонцезахисного крему та погодних умов.

Окрім того, розглянуто застосування нейронної мережі для прогнозування рівня заряду батареї. Додання архітектури TCN (Temporal Convolutional Network) дає можливість врахувати майбутній контекст, що значно покращило точність прогнозування.

У результаті створено систему для моніторингу УФ-випромінювання з можливістю прогнозування заряду батареї, що сприяє ощадному використанню електроенергії та оптимізації роботи пристрою.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА АПРОБАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі представлені результати проведених досліджень, що стосуються створення системи моніторингу УФ-випромінювання, разом із оцінюванням точності розробленої моделі. Також описана робота мобільного застосунку, який є частиною цієї системи, зокрема, розглянуто його інтерфейс та механізми взаємодії користувача з програмою.

3.1. Проведені дослідження

Під час розроблення системи проведено збір даних та дослідження для подальшого навчання нейронної мережі та тестування загальної відповідності даних.

Для збору даних створено тестовий макет описаного в роботі пристрою. Зовнішній вигляд макету пристрою наведений на рисунку 3.1.

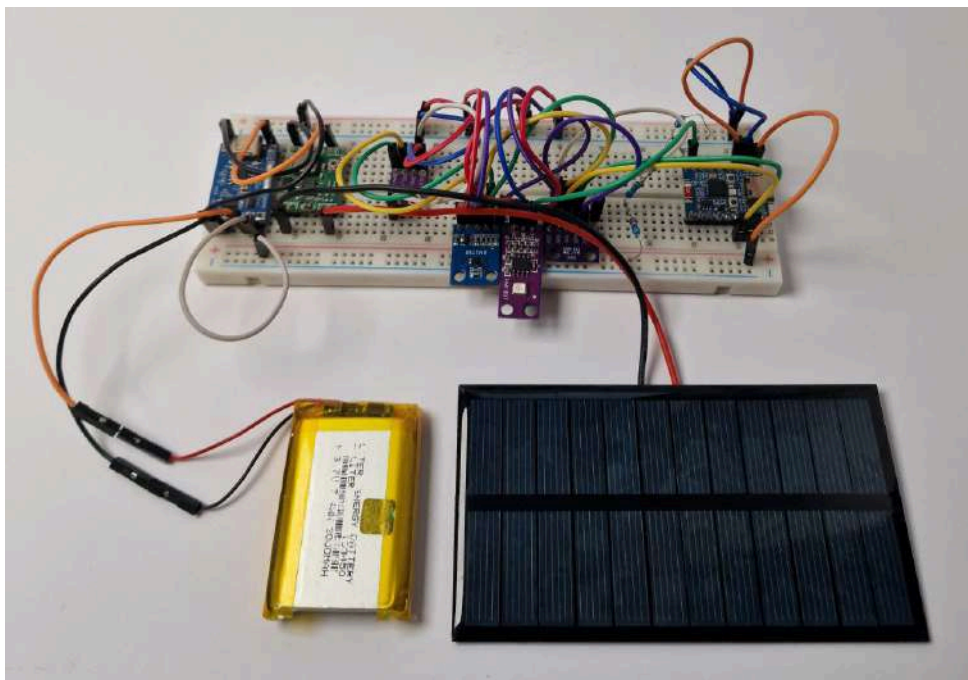


Рисунок 3.1. Тестовий макет

Функціональна схема пристрою наведена на рисунку 3.2.

Умовні позначення:

- **I2C** — (Inter-Integrated Circuit) послідовний інтерфейс для зв'язку між мікроконтролером та периферійними пристроями.
- **ADC** — (Analog-to-Digital Converter) аналогово-цифровий перетворювач, який дозволяє мікроконтролеру зчитувати аналогові сигнали у цифровій формі.
- **BLE** — (Bluetooth Low Energy) енергоефективна бездротова технологія зв'язку для передачі даних між пристроями на короткій відстані.
- **POW** — (Power) позначення ланцюга живлення або вузла подачі енергії в системі.
- **USB power** — живлення пристрою через USB-роз'єм.



Рисунок 3.2. Функціональна схема

У процесі збору даних, отримано дані з чотирьох сенсорів пристрою: сенсор УФ-випромінювання, температури, вологості, освітленості, а також показники заряду акумуляторної батареї блоку живлення.

Збір даних проводився в природних умовах в Україні на території Київської області у період з березня по квітень 2025 року. Збір даних проводився продовж трьох тижнів. За цей період зібрано більше 1300 моментів даних з сенсорів.

Для забезпечення взаємодії пристрою з користувачем створено мобільний застосунок. Застосунок надає можливість користувачу ввести свої персоналізовані дані (тип шкіри або значення MED) для отримання інформації про дозу УФ-опромінення та персоналізованих сповіщень з рекомендаціями необхідності використання захисту від сонця.

Аби підрахувати актуальну дозу УФ-опромінення, користувачу надається можливість вказати час моменту використання сонцезахисного крему та зазначити його характеристики: SPF та час дії.

У мобільному застосунку використано набір графіків для ознайомлення користувача з отриманою дозою УФ-опромінення отриманого упродовж доби з відображенням повної дози УФ-опромінення отриманої від сонця та актуальної, з урахуванням використання сонцезахисних кремів.

Під час збору даних досліджено вплив роботи обчислювальних елементів пристрою, сонячної батареї та модулів контролю заряджання, а також температури, вологості, УФ-випромінювання та освітленості на процеси заряджання та розряджання батареї.

На базі досліджених даних побудована нейронна мережа для передбачення значення заряду батареї.

3.2. Робота мобільного застосунку

Після встановлення мобільного застосунку на смартфон, для коректної роботи користувачеві потрібно зайти в меню налаштувань, яке автоматично відкривається під час першого запуску. У цьому меню користувач зможе обрати свій тип шкіри за шкалою Фіцпатріка, що уможливить встановити значення MED за замовчуванням для обраного фототипу. Якщо користувач знає точне значення MED, він може ввести його вручну для покращення точності сповіщень. Вікно вибору фототипу наведено на рисунку 3.3.

Set your MED value or simply
choose skin type

Skin Type I (Very Light)

Skin Type II (Light)

Skin Type III (Light-Medium)

Skin Type IV (Medium)

Skin Type V (Dark)

Skin Type VI (Very Dark)

MED value:

400.0

SAVE

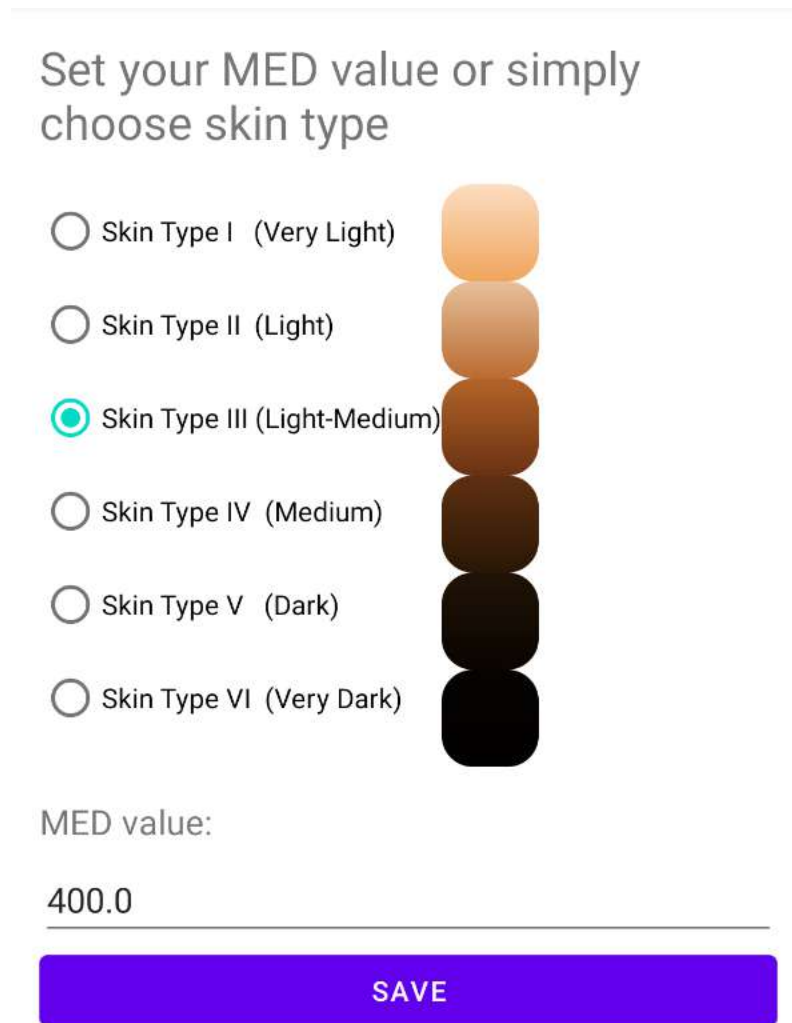


Рисунок 3.3. Вибір фототипу

Після встановлення персональних налаштувань, користувач має під'єднати смартфон до пристрою через відповідне вікно, яке можна відкрити через бокове меню навігації. Далі, за необхідності, користувач повинен надати дозвіл на використання Bluetooth та GPS для визначення місцеперебування – ці налаштування необхідні для забезпечення роботи BLE в мобільному застосунку. Після активації BLE користувач може просканувати місцевість на наявність сумісних пристроїв та отримати їх список. Потім він може обрати необхідний прилад для подальшої спільної роботи. Після приєднання автоматично ініціюється спроба синхронізації

часу між пристроєм і мобільним застосунком, а також синхронізація відсутніх записів на мобільному застосунку щодо даних приладу.

Після цього користувач може перейти до вікна перегляду статистики УФ-опромінення для перегляду отриманої інформації з пристрою та побачити відсоток накопиченого опромінення щодо вказаного значення MED. Зовнішній вигляд вікна перегляду статистики наведений на рисунку 3.4.

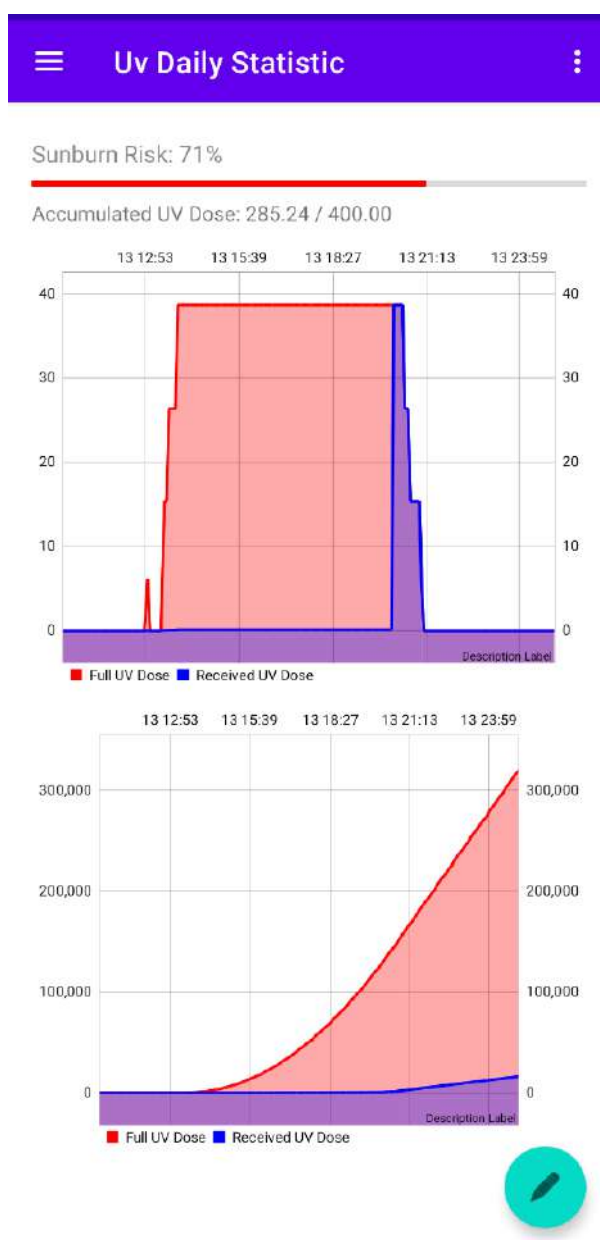


Рисунок 3.4. Статистичні графіки УФ-опромінення

Для того, щоби застосунок коректно розрахував отриману дозу УФ-опромінення, необхідно в вікні використання сонцезахисних кремів додати моменти їхнього застосування.

Користувач має змогу вказати SPF та час дії крему. Ці параметри враховуватимуться під час збереження моменту використання крему, який можна вказати як поточний час або обрати конкретний момент через вікно введення часу. Вказаний час трактується як найближчий попередній момент, що відповідає наданим параметрам.

За потреби користувач може перейти до вікна перегляду заряду батареї, де відображається графік її стану, а також є можливість отримати прогнозування від інтегрованої нейронної мережі щодо майбутнього заряду. Це надає змогу визначити, чи потрібно під'єднувати пристрій до електромережі, чи наявного заряду та заряджання від сонячної панелі достатньо.

Загальна схема використання мобільного застосунку наведена на рисунку 3.5.

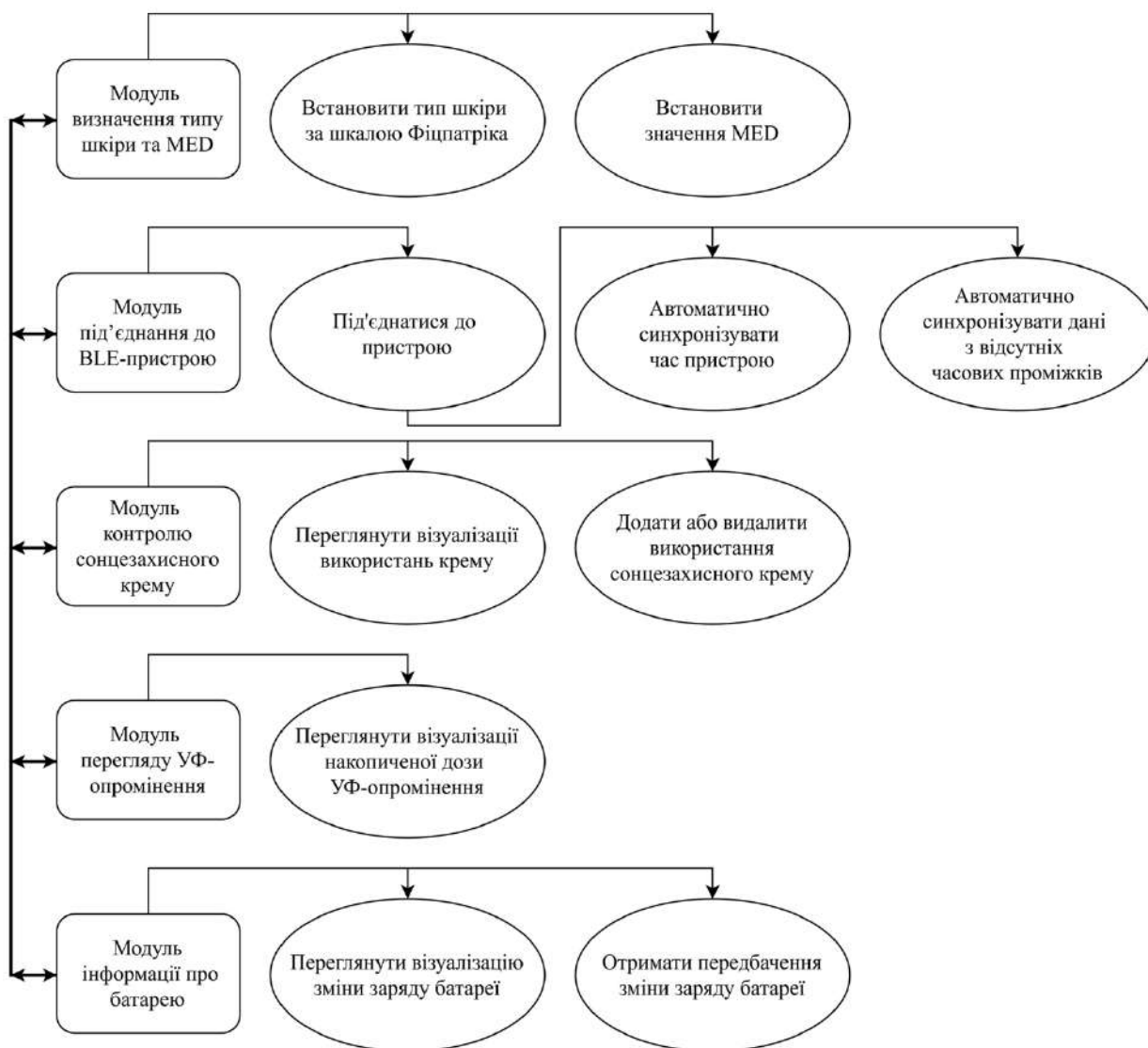


Рисунок 3.5. Схема використання мобільного застосунку

Слід зазначити, що коли дія останнього нанесеного крему добігає кінця, застосунок надсилає сповіщення з рекомендацією повторно нанести його. Зовнішній вигляд сповіщення наведений на рисунку 3.6.

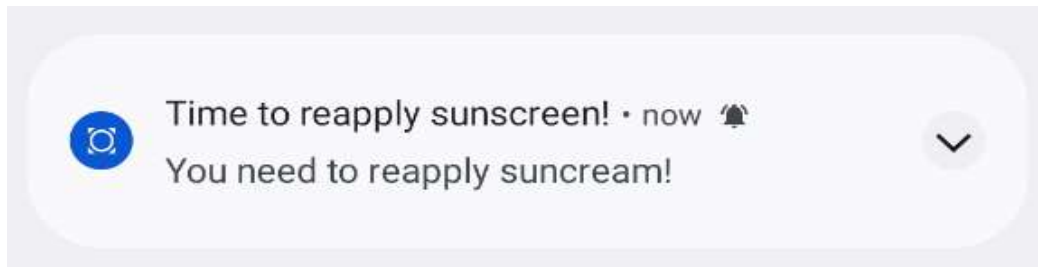


Рисунок 3.6. Сповіщення про необхідність повторного нанесення сонцезахисного крему

За певних умов докілья, як-от висока температура або вологість, сповіщення надсилається раніше, оскільки система припускає, що ефективний період дії крему скоротиться. Зовнішній вигляд сповіщення для цього випадку наведений на рисунку 3.7.

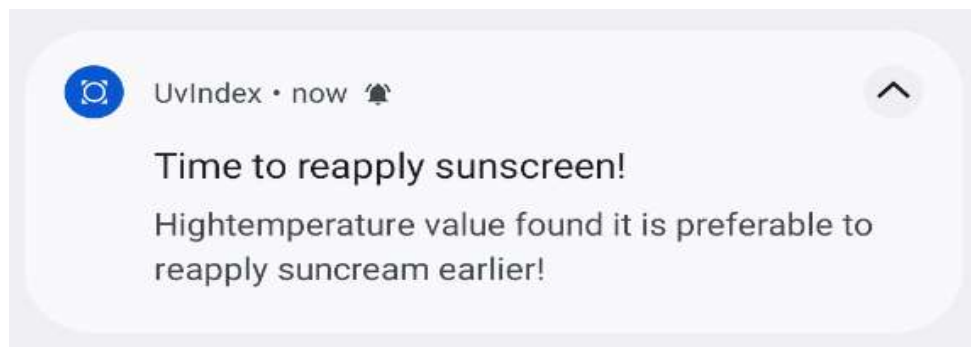


Рисунок 3.7. Сповіщення про необхідність повторного нанесення сонцезахисного крему через високу температуру або вологість

3.3. Оцінка точності моделі

Для оцінки роботи побудованої TCN-моделі використані класичні метрики регресійного аналізу:

- MAE (Mean Absolute Error) – середня абсолютна похибка, яка визначає середню величину відхилення передбачень моделі від фактичних значень. Вимірюється в одиницях, що й цільова змінна:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|,$$

де y_i – фактичне значення; \hat{y}_i – передбачене значення; n – кількість точок у вибірці.

Отримана середня абсолютна похибка MAE становить 15,56 мВ, що свідчить про незначне середнє відхилення моделі від фактичних значень. З огляду на типовий робочий діапазон напруги акумулятора (приблизно від 3000 до 4200 мВ), така похибка становить близько (0,4 – 0,5) % від усього діапазону зміни напруги, що є досить точним прогнозом у контексті реального застосування.

- MSE (Mean Squared Error) – середньоквадратична похибка надає можливість оцінити чутливість моделі до великих відхилень:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

де y_i – фактичне значення; \hat{y}_i – передбачене значення; n – кількість точок у вибірці.

Отримане значення $MSE = 455,3940$. Квадратичний корінь із MSE (тобто $RMSE \approx 21,34$ мВ) підтверджує прийнятний рівень варіативності помилок у прогнозі. Можна побачити, що модель може епізодично демонструвати відхилення, які перевищують середню похибку, проте такі відхилення мають поодинокий характер і не чинять суттєвого впливу на загальну якість прогнозування. Це свідчить про достатню стабільність роботи моделі в умовах помірної невизначеності та змінних вхідних даних.

- R^2 (коефіцієнт детермінації) – міра якості регресії, яка визначає частку варіації цільової змінної, яку модель змогла пояснити. Значення R^2 є в межах від 0 до 1 (у деяких випадках може бути й від'ємним за значної неточності моделі).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2},$$

де y_i – фактичне значення; \hat{y}_i – передбачене значення; \bar{y}_i – середнє фактичне значення; n – кількість точок у вибірці.

Отримане значення $R^2 = 0,813$ свідчить про те, що модель пояснює приблизно 81,3 % варіації в цільовому значенні, що є достатньо значним показником точності для завдання передбачення. Це можна умовно інтерпретувати як 81,3 % точності. Це вказує на наявність кореляції між вхідними ознаками та цільовим значенням, що робить модель придатною для практичного використання в системах з акумуляцією енергії та живлення від сонця.

3.4. Висновки до розділу 3

Отже, у цьому розділі представлені результати досліджень, проведених під час створення системи моніторингу УФ-випромінювання, а також детально описана робота мобільного застосунку. Він надає можливість додавати нові моменти використання сонцезахисного крему, наочне відображення статистики УФ-опромінення та сповіщення, засновані на часі дії крему та умовах довкілля. Це сприяє покращенню моніторингу і своєчасному отриманню користувачем необхідних сповіщень.

Також надана оцінка точності розробленої моделі, яка демонструє прийнятний рівень точності прогнозування. Модель досягла відносно низьких значень середньої абсолютної похибки (MAE) та середньоквадратичної похибки (MSE), що свідчить про точність передбачень. Крім того, помірно високий коефіцієнт детермінації R^2 підтверджує здатність моделі ефективно пояснювати варіацію в цільових значеннях.

ВИСНОВКИ

1. Завдання кваліфікаційної роботи виконано повністю, оскільки:

- Проведено аналіз наявних рішень для моніторингу ультрафіолетового випромінювання та засобів фотозахисту. Виявлено основні вади, зокрема брак персоналізації, обмежену автономність та інтеграцію.

- Досліджено наукові підходи до визначення безпечного часу перебування на сонці та методи кількісного оцінювання отриманої УФ-дозы, зокрема з урахуванням мінімальної еритемної дози (MED) та впливу сонцезахисних кремів із різним SPF.

- Сформовано вимоги до IoT-системи, що використовує індивідуальні параметри користувача (тип шкіри, SPF, MED), кліматичні умови та динаміку використання кремів, з метою надання персоналізованих рекомендацій.

- Розроблено архітектуру системи, яка охоплює портативний пристрій для енергоощадного збору параметрів довкілля, мобільний застосунок для аналізування отриманих даних і модуль рекомендацій для користувача.

- Створено робочий прототип системи, реалізовано BLE-зв'язок, візуалізацію та оброблення даних у застосунку, а також інтегровано модель прогнозування заряду акумулятора на базі нейронної мережі. Проведено тестування працездатності системи в реальних умовах.

Досягнуто поставленої мети через створення системи персоналізованого моніторингу ультрафіолетового опромінення:

- У межах дослідження реалізовано портативний пристрій для збору даних про параметри довкілля, зокрема ультрафіолетове випромінювання, температуру, вологість, рівень освітленості, а також стан акумулятора.

Пристрій використовує протокол Bluetooth Low Energy (BLE) для обміну даними з мобільним застосунком, що забезпечує низьке енергоспоживання та тривалу автономну роботу.

- Розроблено мобільний застосунок, який здійснює збір, оброблення та візуалізацію даних у реальному часі. Він враховує індивідуальні параметри користувача, як-от тип шкіри, мінімальна еритемна доза (MED), параметри використання сонцезахисного крему (SPF, тривалість дії, час нанесення), а також поточні погодні умови. Застосунок надає персоналізовані рекомендації щодо уникнення надмірного опромінення та сповіщає про перевищення безпечної дози УФ-опромінення.

- Окрім того, впроваджено модель штучної нейронної мережі, здатну прогнозувати рівень заряду акумулятора пристрою на основі зібраних сенсорних даних і поточних погодних показників (температура, освітленість, вологість, УФ-індекс). Це дає можливість оптимальніше планувати енергоспоживання та використання сонячної енергії, забезпечувати безперебійну роботу пристрою та завчасно інформувати користувача про необхідність дозарядження.

2. У процесі дослідження вперше отримано такі наукові результати:

- Уперше розроблено модель комплексної системи портативного персоналізованого моніторингу УФ-випромінювання, що поєднує сенсорний пристрій зі збереженням історії даних у локальній пам'яті та мобільний застосунок із інтегрованою нейронною мережею для прогнозування зміни рівня заряду акумуляторної батареї, яка враховує індивідуальні фізіологічні параметри користувача, зокрема тип шкіри, значення MED та інформацію про застосування сонцезахисних засобів.

- Уперше реалізовано модель нейронну мережу для прогнозування зміни заряду батареї в пристроях із живленням від сонячної енергії, яка забезпечує контекстно-орієнтоване передбачення зміни заряду батареї та є інтегрованою частиною загальної системи портативного моніторингу УФ-

випромінювання, що використовує фактичні та прогнозовані параметри довкілля.

3. Розроблена система має практичну цінність у галузі охорони здоров'я. Вона може використовуватися для профілактики УФ-опіків та контролю перебування на сонці. Її можна використовувати для широкої цільової аудиторії, зокрема для людей із підвищеною чутливістю до УФ-випромінювання, людей із дерматологічними захворюваннями та туристів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mechanisms and prevention of UV-induced melanoma - PMC. PMC Home. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5760354/>.
2. Radiation: Ultraviolet (UV) radiation and skin cancer. World Health Organization (WHO). URL: [https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-\(uv\)-radiation-and-skin-cancer](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-(uv)-radiation-and-skin-cancer).
3. Global burden of cutaneous melanoma in 2020 and projections to 2040. IARC – INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. URL: <https://www.iarc.who.int/news-events/global-burden-of-cutaneous-melanoma-in-2020-and-projections-to-2040>.
4. U.S. Environmental Protection Agency | US EPA. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/sunscreen.pdf>.
5. The Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA). URL: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/radiation-sources/more-radiation-sources/sun-protection-sunscreen>.
6. Review: La Roche-Posay's My Skin Track UV Sensor Offers Interesting Concept, but Needs Improvement. MacRumors. URL: <https://www.macrumors.com/review/la-roche-posay-uv-skin-track-sensor/>.
7. Lawlor S. I was one of the first people to try the groundbreaking wearable sensor that can detect skin-damaging UV and pollution levels, here's what happened. Glamour UK. URL: <https://www.glamourmagazine.co.uk/article/la-roche-posay-my-skin-track-uv-review>.
8. Home | dminder iphone & ipad app. Home | dminder iphone & ipad app. URL: <https://dminder.ontometrics.com>.

9. Nationaler und lokaler Wetterradar, tägliche Vorhersage, Orkane und Informationen von The Weather Channel und weather.com. The Weather Channel. URL: <http://www.weather.com>.

10. Fung L. SPF's Meaning - The Ultimate Guide to SPF Ratings. Soleo Organics. URL: https://soleoorganics.com/blogs/news/the-ultimate-guide-to-spf-ratings?srsltid=AfmBOoqos6RRykDKZ26r899hSbeOC63aoe8_gZfLivKRnOCH1oSib5JD.

11. SciELO Brasil.
URL: <https://www.scielo.br/j/bjps/a/4kkFt39DQzrhqXW7bJSxhJQ/?format=pdf>.

12. The Minimal Erythema Dose (MED) Project: In Search of Consensus on Phototesting | Actas Dermo-Sifiliográficas. Actas Dermo-Sifiliográficas.
URL: <https://www.actasdermo.org/en-the-minimal-erythema-dose-med--articulo-S1578219013001418>.

13. The Minimal Erythema Dose (MED) Project: In Search of Consensus on Phototesting | Actas Dermo-Sifiliográficas. Actas Dermo-Sifiliográficas.
URL: <https://www.actasdermo.org/en-minimal-erythema-dose-correlation-with-articulo-S1578219020301505>.

14. ICNIRP.
URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUVWorkersHP.pdf>.

15. UV Radiation and the Skin. MDPI. URL:
<https://www.mdpi.com/1422-0067/14/6/12222>.

16. Fitzpatrick, T. B. (1975). «Soleil et peau» [Sun and skin]. Journal de Médecine Esthétique (in French) (2): 33–34.

17. GUYA-S12SD Datasheet - Parallax. Parallax. URL:
<https://www.parallax.com/package/guya-s12sd-datasheet/>.

18. ESP IoT Development Framework | Espressif Systems. Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions | Espressif Systems.
URL: <https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-idf>.

19. Mobile Operating System Market Share Worldwide | Statcounter Global Stats. StatCounter Global Stats. URL: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>.

20. Download Android Studio & App Tools - Android Developers. Android Developers. URL: <https://developer.android.com/studio>.

21. Relationship between ultraviolet index (UVI) and first-, second- and third-degree sunburn using the Probit methodology - Scientific Reports. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36850-x>.

22. GitHub - zhong110020/keras-tcn: Keras Temporal Convolutional Network. GitHub. URL: <https://github.com/zhong110020/keras-tcn/tree/master>.

23. An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling. arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1803.01271>.

24. Free Open-Source Weather API | Open-Meteo.com. Free Open-Source Weather API | Open-Meteo.com. URL: <https://open-meteo.com/>.