

ШИФР
«ПРОГНОЗУВАННЯ»

АНОТАЦІЯ

Наукова робота складається із вступу, 4 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 65 сторінок, список літератури з 20 найменувань на 2 сторінках.

Актуальність теми. Зважаючи на значення сонячної енергії в сучасному світі, статистика генерації сонячної електроенергії дійсно ілюструє ріст цього сектора. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), сонячна енергія стала найшвидше зростаючим джерелом енергії у світі. У 2021 році виробництво сонячної енергії збільшилося на 22% порівняно з 2020 роком.

За оцінками Європейської асоціації фотовольтаїки (EPIA), у 2023 році було встановлено близько 180 гігаватт сонячних панелей у всьому світі, що подвоїло обсяг у порівнянні з 2018 роком.

Україна також спостерігає значний ріст сектора сонячної енергії. За даними Державної служби статистики України, у 2023 році в Україні було встановлено близько 6 гігаватт сонячних електростанцій.

За даними Української асоціації відновлюваної енергетики, сонячна енергія у 2023 році стала третім за обсягом виробництвом електроенергії джерелом в Україні, виробивши близько 5% всієї електроенергії.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування фотоелектричних модулів за рахунок розроблення IoT-система моніторингу параметрів генерування та сонячної інсоляції.

Об'єкт дослідження – інформаційні технології аналізу ефективності функціонування фотоелектричних модулів.

Предмет дослідження – методи і програмні засоби збору та аналізу даних, що характеризують ефективність функціонування фотоелектричних модулів.

Сфери застосування: сонячна енергетика, розробка ефективних фотоелектричних станцій.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ІНСТАЛЯЦІЯ, ЕНЕГРРОМЕТР, МІКРОКОНТРОЛЕР.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Аналіз проблематики ефективного використання сонячної енергії	8
1.2 Класифікація фотоелектричних установок, особливості розташування сонячних панелей.	11
1.3 Аналіз IoT рішень для моніторингу ефективності використання фотоелектричних модулів	15
1.4 Висновки по розділу 1	16
2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ	18
2.1 Аналіз енергетичного потенціалу України.....	18
2.2 Створення концепції IoT-системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів	21
2.3 Висновки по розділу 2	29
3 СИНТЕЗ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ІОТ-СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ.....	30
3.1 Розроблення архітектури інформаційної системи	30
3.2 Обґрунтування вибору елементів апаратної частини IoT системи.....	32
3.3 Програма мікроконтролера IoT системи збору даних функціонування фотоелектричних модулів	39
3.4 Програма серверної частини IoT системи збору даних функціонування фотоелектричних модулів	45
3.5 Висновки по розділу 3	54
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІОТ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ.	55

4.1 Експериментальне дослідження IoT системи оцінки ефективності функціонування фотоелектричних панелей	55
4.2 Висновки по розділу 4	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

ВСТУП

За оцінками Європейської асоціації фотовольтаїки (EPIA), у 2023 році було встановлено близько 180 гігаватт сонячних панелей у всьому світі, що подвоїло обсяг у порівнянні з 2018 роком.

Україна також спостерігає значний ріст сектора сонячної енергії. За даними Державної служби статистики України, у 2023 році в Україні було встановлено близько 6 гігаватт сонячних електростанцій.

За даними Української асоціації відновлюваної енергетики, сонячна енергія у 2023 році стала третім за обсягом виробництвом електроенергії джерелом в Україні, виробивши близько 5% всієї електроенергії.

Ці статистичні дані свідчать про те, що сонячна енергія швидко зростає як у світі, так і в Україні, що робить оцінку ефективності фотоелектричних модулів ще більш актуальною для забезпечення стабільного та ефективного використання цього джерела енергії.

Оцінка ефективності функціонування фотоелектричних модулів є надзвичайно актуальною темою з кількох причин:

- перехід до відновлюваної енергії: у зв'язку з ростом свідомості про проблеми забруднення довкілля та зменшення запасів природних палив, багато країн переходять до використання відновлюваних джерел енергії, фотоелектричні модулі, зокрема сонячні панелі, стають ключовим елементом в цьому переході;
- зростання популярності сонячної енергії: сонячна енергія стає все більш популярною як джерело електроенергії для домогосподарств, комерційних підприємств та промислових об'єктів, оцінка ефективності фотоелектричних модулів є ключовою для забезпечення ефективності та стабільності цієї системи;
- технологічні вдосконалення: розвиток технологій у виробництві фотоелектричних модулів призводить до появи нових матеріалів, дизайнів та

методів виготовлення, що потребують оцінки їх ефективності порівняно з традиційними підходами.

- економічні переваги: оцінка ефективності фотоелектричних модулів також важлива для визначення їх економічної доцільності, розрахунки повернення інвестицій та оптимальної рентабельності часто базуються на точних даних щодо ефективності фотоелектричних систем.

Отже, оцінка ефективності фотоелектричних модулів не лише допомагає забезпечити стабільність постачання електроенергії, а й сприяє розвитку відновлюваної енергетики та зменшенню впливу на довкілля.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування фотоелектричних модулів за рахунок розроблення IoT-система моніторингу параметрів генерування та сонячної інсоляції.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз особливостей використання фотоелектричних модулів в розрізі визначення оптимальних умов їхньої роботи;
- здійснити оцінку факторів які впливають на генерацію фотоелектричних модулів;
- синтезувати апаратно-програмний комплекс IoT-системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів.
- здійснити практичне тестування макетного зразка.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз проблематики ефективного використання сонячної енергії

Світове споживання електроенергії зростає з постійним економічним розвитком і зростанням населення. Незважаючи на зростання популярності відновлюваної енергії [1], викопне паливо залишається основним джерелом енергії для виробництва електроенергії. Щоб задовольнити зростаючий попит на електроенергію, одночасно зменшуючи вплив на навколишнє середовище, відновлювана енергетика подається як важлива альтернатива. Серед різних відновлюваних джерел енергії сонячна енергія має великий потенціал для задоволення зростаючих потреб у споживанні енергії.

У 2022 році введення нових потужностей вітрових та сонячних установок залишалися на високому рівні (+75 ГВт нової вітрової потужності та +191 ГВт нової сонячної потужності). У всьому світі частка вітрової та сонячної енергії у виробництві електроенергії зросла на 1,5 п.п. у 2022 році до понад 12% [2]

Окрім мінімального впливу на навколишнє середовище, сонячна енергія має широкий спектр переваг. Сонячна енергія широко доступна, а тому зменшує залежність від імпорту енергії. Оскільки сонячна енергія покращує енергетичну різноманітність і захищає від нестабільності цін на викопне паливо, вона допомагає підвищити надійність постачання та стабілізувати витрати на виробництво електроенергії в довгостроковій перспективі. Крім того, для сільських районів, де немає доступу до електроенергії, автономні сонячні системи часто є найбільш прийнятним рішенням для мінімальної електрифікації.

Розташування є важливим фактором який враховується під час вибору місця встановлення фотоелектричних панелей, оскільки різні місця з різними географічними та кліматичними/метеорологічними умовами можуть значно

вплинути на продуктивність фотоелектричних панелей. Для житлових і деяких нежитлових фотоелектричних систем дахи або фасади будинків часто є кращими місцями встановлення. У цих системах дослідження були зосереджені на визначенні відповідних зон на дахах будинків за допомогою детальних 3D-моделей, даних виявлення та визначення відстані (LiDAR) і систем географічної інформації (GIS) [3].

Визначення відповідних місць оптимального встановлення сонячної системи на практиці може бути складним завданням. Величина вихідної потужності сонячних панелей залежить від багатьох зовнішніх факторів середовища: величина сонячної радіації яку поглинає панель, температура фотоелектричного модуля, матеріал та технологія виготовлення фотоелектричних елементів, управління величиною генерованої потужності з врахування вольт-амперної характеристики панелі [4]. Існує велика кількість математичних моделей та пакетів прикладних програм, які описують оптимальні параметри інсталяції та використання енергії сонячних панелей [5], однак всі вони потребують перевірки та адаптації до умов конкретного регіону, що неможливо без виконання ряду експериментальних моніторингових досліджень з використанням сучасних вимірювальних пристроїв.

Щоб досягти оптимальної продуктивності фотоелектричної системи, виділимо кілька базових факторів. Кут нахилу та орієнтація панелі у просторі були широко досліджені в роботах [6, 8] для отримання максимального значення сонячного випромінювання на поверхні панелі а отже і максимальної вихідної потужності. Результати показують, що географічне положення та місцевий клімат впливають на оптимальний кут нахилу та орієнтацію сонячної фотоелектричної системи. Дослідження показали, що в північній півкулі фотоелектричні панелі, спрямовані на південь з кутом нахилу, рівним широті, досягли максимальної річної продуктивності системи [7].

Крім кута нахилу та орієнтації, дослідження показали, що різні системи відстеження сонця можуть впливати на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей [8, 9]. Дослідження, проведені в різних географічних місцях, показують, що панелі з сонячними трекерами, відстеження положення сонця виробляють більшу вихідну потужність, ніж фіксовані панелі. Наприклад, в [10] проведено дослідження в Дамаску, Сирія, і виявлено, що панель відстеження азимута (одноосьова) виробляє на 20% більше щоденної вихідної потужності, ніж фіксована панель, з набагато вищою продуктивністю (на 40% більше) вранці і ввечері.

Ще один важливий параметр, який впливає на продуктивність сонячної фотоелектричної системи, стосується матеріалу сонячних елементів. В роботі [11] досліджували три типи матеріалів — тонку плівку, монокристалічний і полікристалічний кремній — у регіоні Кахраманмараш, Туреччина. Було оцінено енергоспоживання, вартість, річний дохід, точки беззбитковості, площу встановлення та ваги кожної системи. В результаті дослідники дійшли висновку, що полікристалічна фотоелектрична система є оптимальною для регіону з точки зору найкоротшої точки беззбитковості (коли економічна віддача системи дорівнює витратам). Вони також виявили, що тонкоплівкові панелі були більш конкурентоспроможними в середовищі з високою температурою та мали перевагу з точки зору ваги. Проте тонкоплівкові панелі займали більше місця порівняно з двома іншими системами. В роботі [12] порівнювали енергетичні характеристики трьох типів фотоелектричних модулів (кристалічних, мультикристалічних і кадмієво-телуридових модулів) у кліматичних умовах турецького міста Ізміт. Вони використовували метрики оцінки нормалізованої енергії систем, коефіцієнти продуктивності, середню ефективність масиву та коефіцієнти потужності. Результати показали, що модулі телуриду кадмію генерували більше енергії з вищою середньою ефективністю масиву, коефіцієнтом продуктивності та коефіцієнтом потужності за погодних умов Ізміту.

Під час проектування фотоелектричних систем важливою є задача розрахунку та вибору необхідної кількості сонячних панелей та параметрів їх оптимальної інсталяції. Отже важливо розуміти потенціал генерації енергії в конкретному місці встановлення модулів і ефективність перетворення енергії для заданих умов.

1.2 Класифікація фотоелектричних установок, особливості розташування сонячних панелей.

Проаналізуємо динаміку зміни встановленої потужності домашніх сонячних електростанцій (СЕС), що уклали договір про постачання енергії за «зеленим тарифом» згідно даних платформи [13]. На рис. 1.1 наведено поквартальну зміну потужності які встановлені в приватних домогосподарствах [REDACTED] області.

Класифікація фотоелектричних установок, особливості розташування сонячних панелей

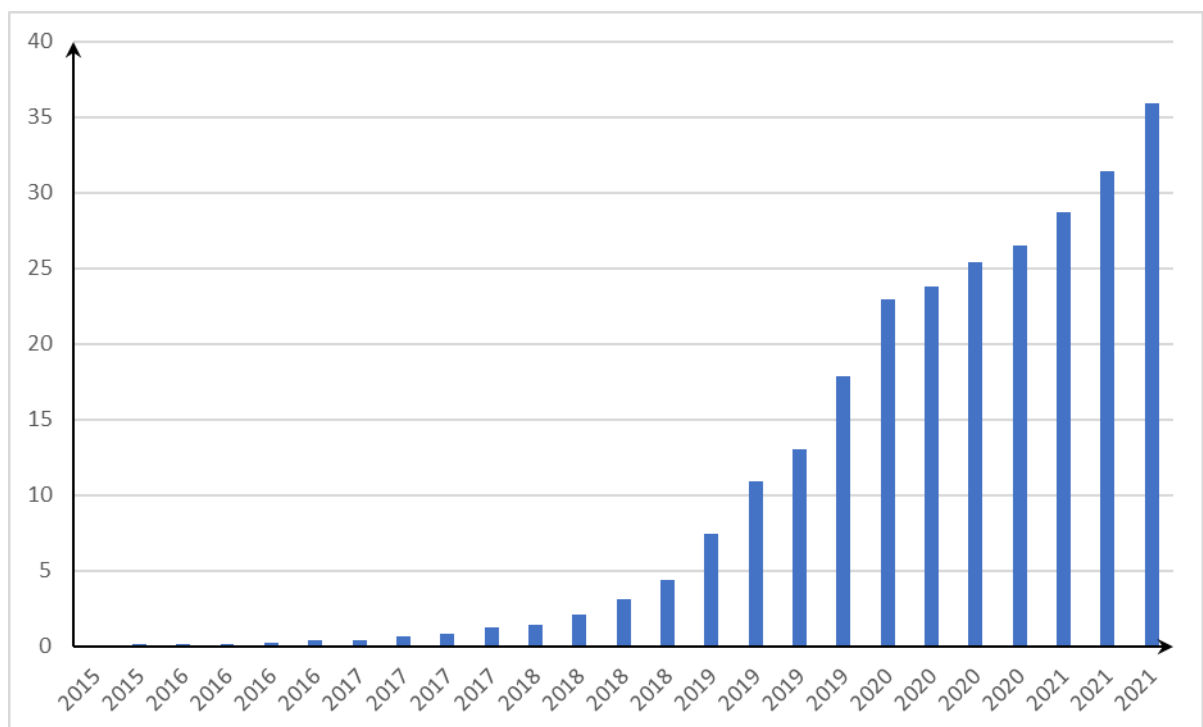


Рисунок 1.1 - Поквартальна зміна потужності СЕС які встановлені в приватних домогосподарствах [REDACTED] області, МВт

Дана статистика показує стійку тенденцію до зростання, і саме такий підхід дозволяє реалізувати концепцію розподіленого генерування електроенергії в Україні [14]. Енергетична система України сьогодні перебуває під загрозою обстрілів. Створення мережі розподіленої генерації електроенергії, може бути дієвою протидією до порушення цілісності енергосистеми при наявності дефіциту енергії. Така мережа має складатися з тисяч малих електростанцій, приватних електростанцій що допоможе нашій енергосистемі диверсифікувати генерацію і убезпечити енергетичні об'єкти від масштабних пошкоджень.

Розрізняють два види малих СЕС – гібридні та мережеві. На рис. 1.2 зображено структуру гібридної сонячної електростанції, вона дозволяє забезпечити автономне електропостачання від фотоелектричних модулів за рахунок накопиченої електроенергії в акумуляторах, які покривають нерівномірність генерації. Якщо потужності не достатньо здійснюється її споживання з мережі

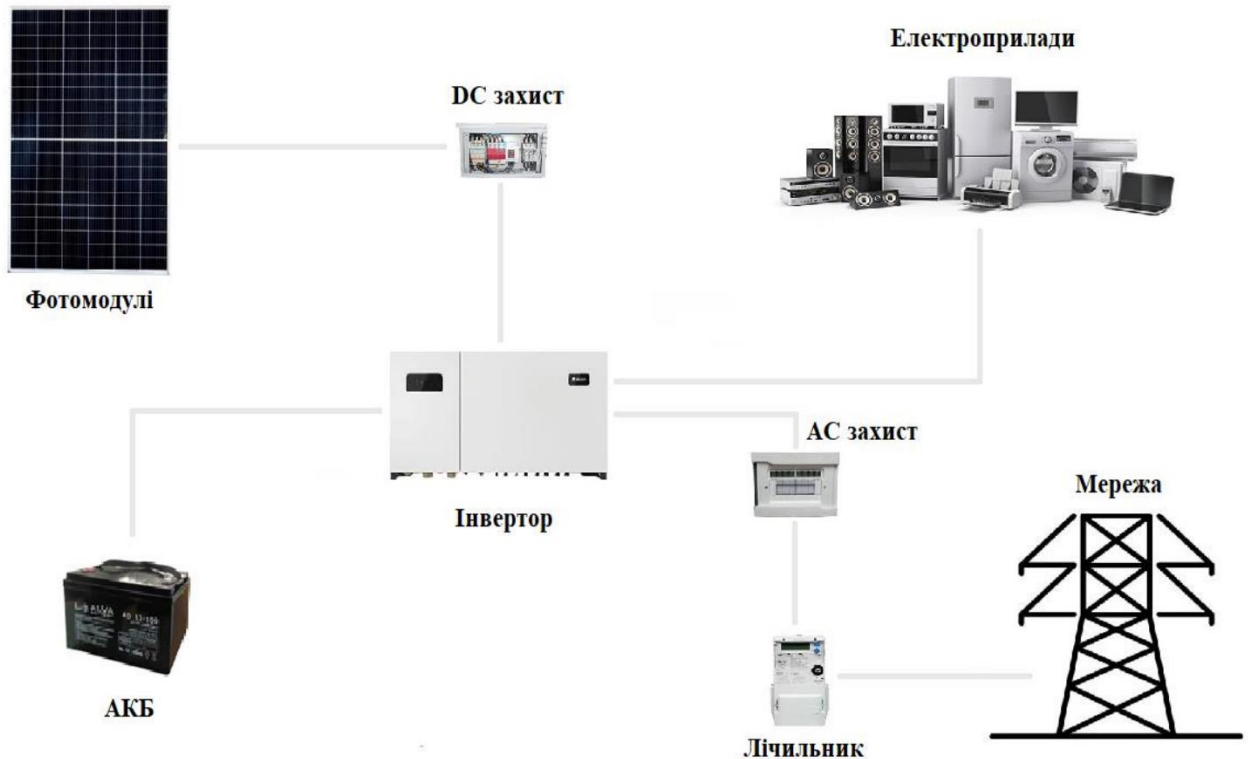


Рисунок 1.2 - Структура гібридної сонячної станції

На рис. 1.3 зображено структуру мережевої сонячної електростанції, вона дозволяє забезпечити автономне електропостачання тільки коли є достатня генерація сонячними панелями, інакше потужність споживачів покривається енергією із мережі. Головною відмінністю є те, що в такому випадку відсутні накопичувачі енергії. Тому дефіцит покривається мережею а при наявності надлишків генерації відбувається рекуперація в мережу.

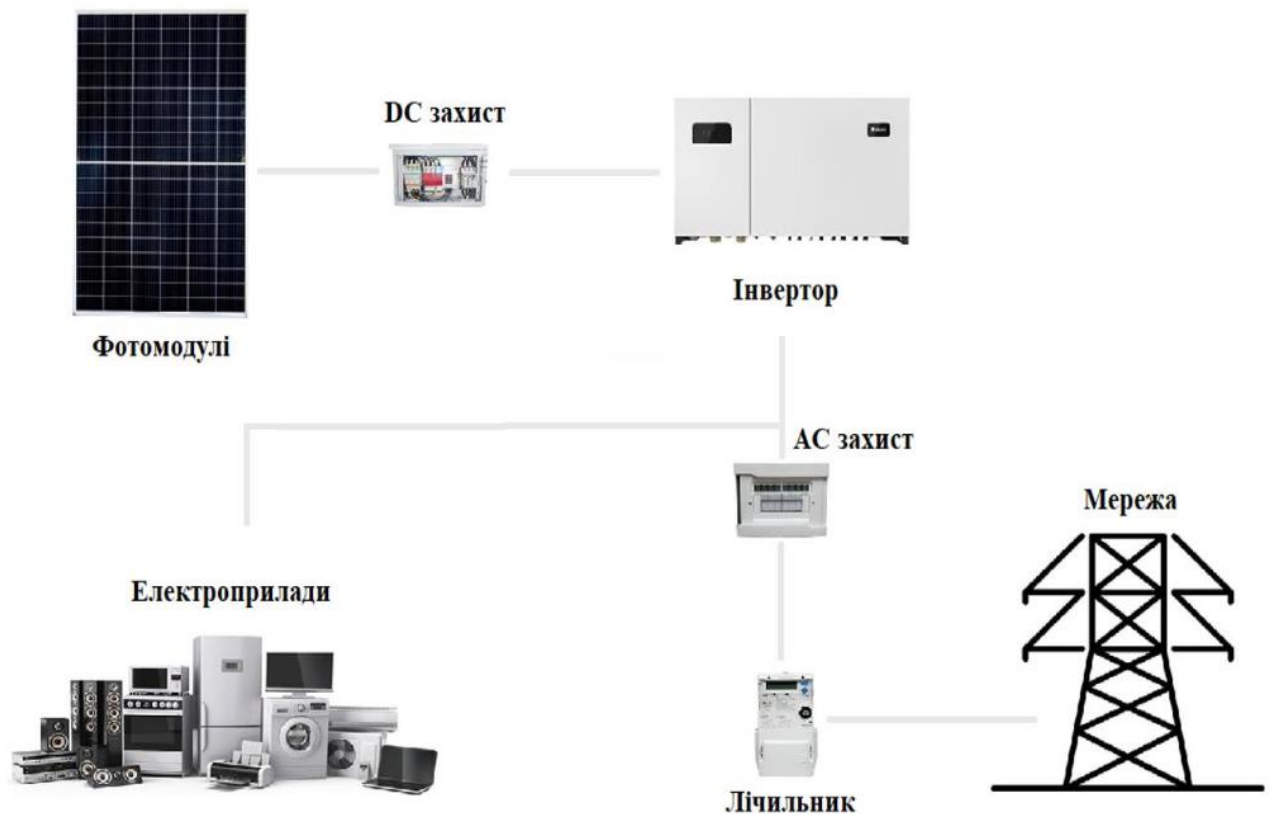


Рисунок 1.3 - Структура мережевої сонячної станції

В таких малих сонячних станціях виникає актуальна задача знаходження оптимального місця розташування сонячної панелі і можливість оцінки ефективності її функціонування для того чи іншого варіанту. Це може бути розташування на фасаді, даху чи навіть всередині приміщення [15]. На рис. 1.4 зображено різноманітні варіанти встановлення сонячних панелей.

Розташування на фасадах може мати багатоваріантні умови, які будуть відрізнятись від оптимальних, наприклад якщо є можливість встановити панелі на стіні яка розташована не на південь а на схід. В такому випадку

найбільш ефективно така панель буде працювати вранці а уже після обіду сонячна активність різко скорочується, крім того є інші фактори: наявність додаткової забудови поряд, дерева які затримують випромінювання, активність відбитого випромінювання. Тобто потрібно враховувати технічні, та технологічні особливості, які важко обрахувати математично, але для кожного фактичного місця розташування можна визначати дослідно, якщо за допомогою сенсорів фіксувати генерування сонячної панелі та визначати зовнішні умови.

Враховуючи специфіку розташування слід використовувати ІоТ рішення для швидкого визначення ефективності конкретного місця розташування.



Рисунок 1.4 - Варіанти встановлення сонячних панелей на фасадах та дахах будинків [15]

1.3 Аналіз IoT рішень для моніторингу ефективності використання фотоелектричних модулів

В роботі [16]. запропоновано IoT систему для моніторингу сонячної установки (рис.1.5). Мета системи максимізувати вихідну потужність за допомогою налаштування кута її встановлення в реальному часі відносно положення сонця. Дана система побудована на контролері Arduino який зчитує в режимі реального часу струм та напругу фотоелектричного модуля а результати моніторингу відправляються на сервер через модуль Wi-Fi. В результаті отримані графіки дозволяють оцінити ефективність роботи фотоелектричних модулів. Також маючи статистику за тривалий час можна проводити економічну оцінку використання сонячних панелей.

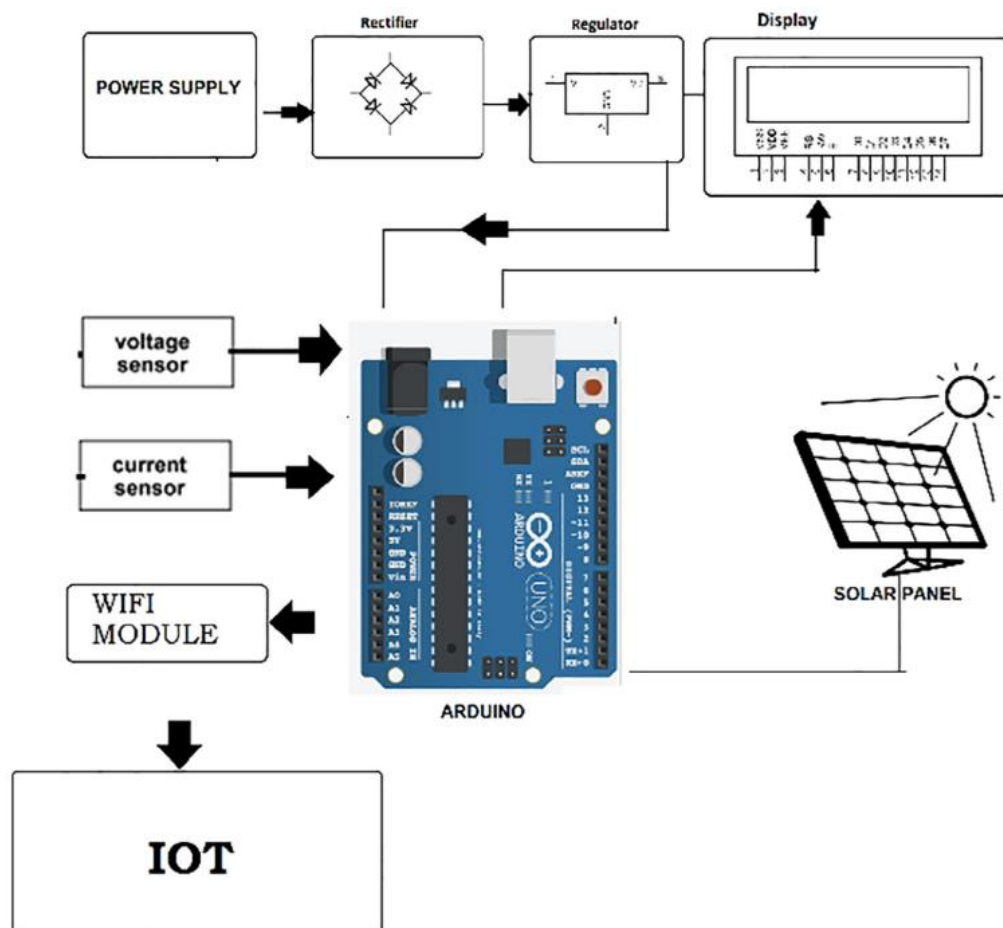


Рисунок 1.5 - IoT система моніторингу фотоелектричних модулів [16]

В роботі [17] авторами запропоновано методику, та відповідний IoT

пристрій (рис. 1.6) для визначення потужності, яка генерується фотоелектричними модулями. Даний пристрій має компактні розміри, що важливо для його автономної роботи, крім того у ньому не використовується окремий сенсор напруги, його функцію виконує подільник та АЦП мікроконтролера ESP32 на якому уже інтегровано WiFi модуль та інші комунікаційні інтерфейси. Також до складу системи входить дисплей для відладки та відображення інформації по місцю. Проведені дослідження зі зміною положення панелі дозволяють визначити оптимальне розташування, в якому отримуємо максимальну середньодобову потужність. Для обробки інформації використано IoT платформу ThingSpeak доступ до зчитування та запису забезпечується через API з використанням ідентифікаційного ключа.

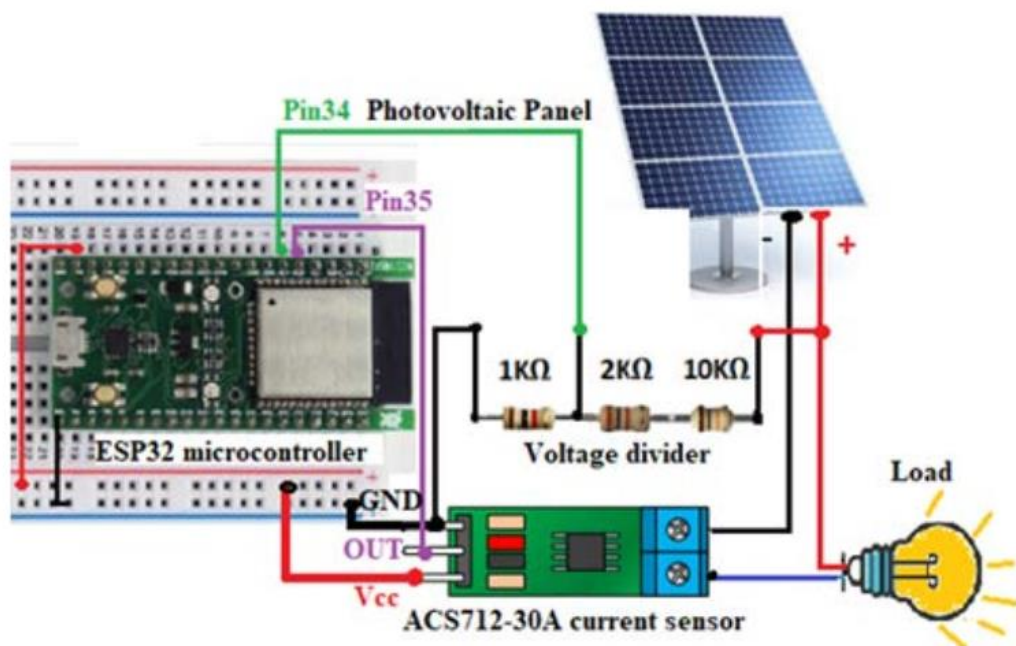


Рисунок 1.6 - IoT система визначення потужності сонячної панелі [17]

1.4 Висновки по розділу 1

У цьому розділі було проведено аналіз проблематики предметної області, а саме проблеми побудови IoT систем оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів. Розглянуто особливості

функціонування сонячної енергетики, зокрема відзначено важливість аналізу генерування енергії в залежності від умов зовнішнього середовища, та розміщення фотоелектричних модулів. Основні функції системи: збір даних з відповідних сенсорів в цифровому вигляді, накопичення даних за значний період часу, первинна обробка даних моніторингу, аналіз та прогнозування вироблення енергії.

2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

2.1 Аналіз енергетичного потенціалу України

Україна має сприятливе географічне розташування для розвитку фотоелектричної генерації. Згідно з картою інсоляції (рис. 2.1), приблизно на 80% території країни середній показник становить більше трьох одиниць.

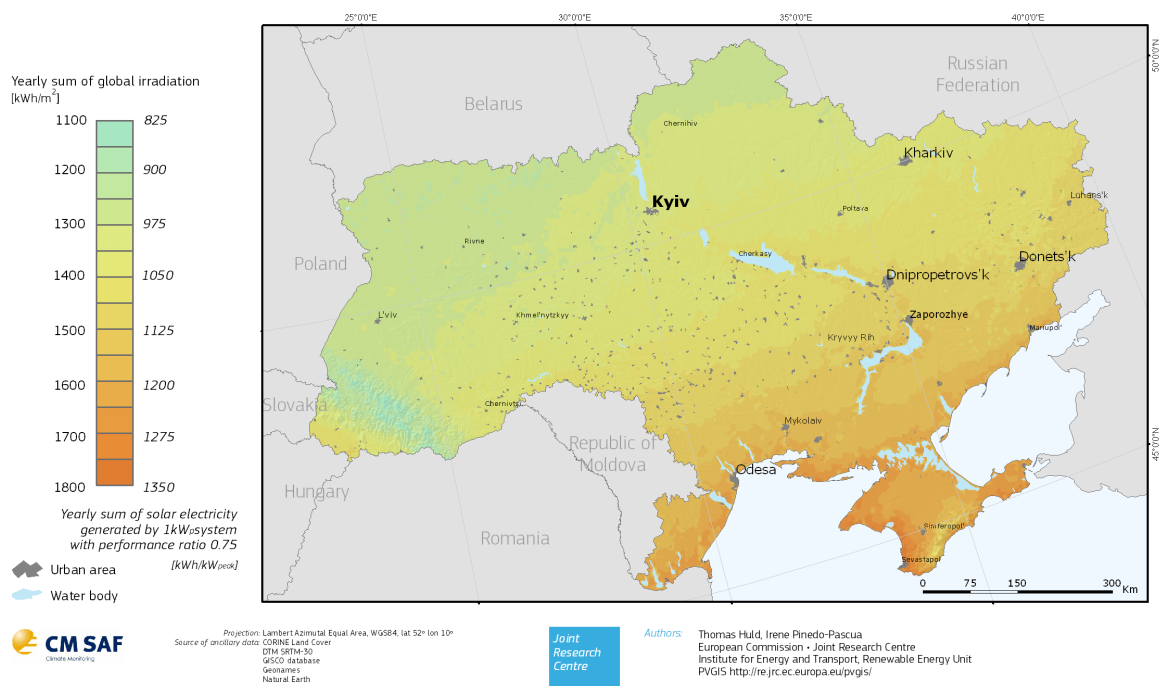


Рисунок 2.1 – Карта сонячної інсоляції України

Це набагато вище або на рівні з іншими європейськими країнами, які активно застосовують енергію сонця для електропостачання та обігріву своїх будинків. Основні переваги використання сонячної енергетики для України:

- є великий потенціал для збільшення виробництва сонячної енергії, особливо в сільських районах, де є величезні вільні простори для розміщення сонячних панелей;

- розвиток сонячної енергетики допоможе зменшити залежність від імпортованих джерел енергії, таких як газ чи нафта;
- виробництво сонячної енергії є екологічно чистим процесом, що не супроводжується викидами вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, що сприяє зменшенню впливу на навколишнє середовище;
- розвиток сонячної енергетики стимулює інновації в галузі технологій відновлювальних джерел енергії, що може призвести до створення нових робочих місць та прискорення технологічного прогресу;
- застосування сонячної енергії може призвести до зменшення витрат на енергію для підприємств та домогосподарств, що сприятиме економічному розвитку країни.

Станом кінець 2020 року встановлено СЕС загальною номінальною потужністю 6320 МВт без урахування близько 407,9 МВт потужностей, які перебувають на окупованій Росією території, які генерують 1,265 млрд кВт·год електроенергії. Частка СЕС на перший квартал 2021 року загальній генерації України складає близько 6 % [18]. На рис. 2.2 зображено діаграму генерації сонячними електростанціями. З діаграми можна зробити висновок про швидкий розвиток цього напрямку енергетики.

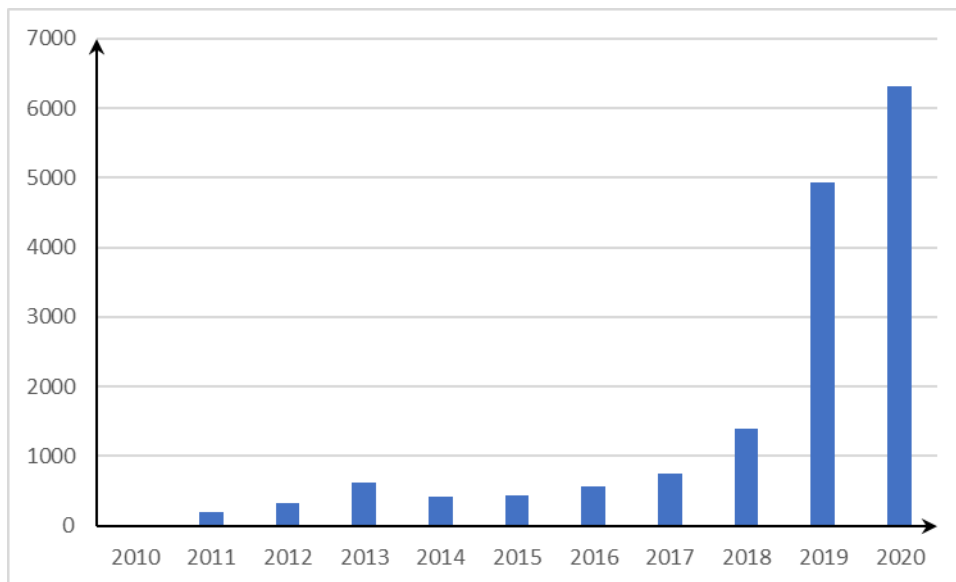


Рисунок 2.2 – Діаграма сонячної генерації в Україні (МВт)

Для визначення енергетичного потенціалу використання сонячної енергії проаналізуємо середній місячний рівень сонячної радіації в м. [REDACTED], який можна поширити і на всю область. Дані багаторічних спостережень наведено в табл. 2. [19]

Табл. 2 – Середній місячний рівень сонячної радіації в м. [REDACTED] (кВт·год/м²/день).

Січ.	Лют.	Бер.	Кві.	Тра.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Гру.	середн.
1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,1	0,9	3,11

Орієнтовну добову потужність генерації сонячних панелей для кожного місяця можна визначити із співвідношення:

$$W_{\text{С.Е.}}^{\text{доб.}} = P_{\text{п}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_1 \cdot S_{\text{п}} \cdot n, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{п}}$ – потужність сонячної панелі;

k_1 - середній місячний рівень сонячної інсоляції, який залежить від географічних координат та способу встановлення панелі (табл. 2);

k_{π} – коефіцієнт перетворення залежить від розташування і характеристик панелі, показує ефективність перетворення світлової енергії в електричну;

n – кількість панелей;

S_{π} - площа панелі.

Отже найбільш важливим і варіативним параметром є рівень сонячної інсоляції він змінюється в широких межах в залежності від орієнтації площини панелі в просторі і від умов освітленості в конкретних умовах інсталяції фотоелектричного модуля.

2.2 Створення концепції IoT-системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів

Як було відзначено для визначення необхідного місця розташування сонячних панелей необхідно створити відповідну IoT-систему яка б надавала оцінку ефективності перетворення енергії фотоелектричними модулями. Завданням IoT-системи є визначення необхідних параметрів та характеристик апаратно-програмного комплексу для моніторингу електричних параметрів генерації сонячної панелі при різних значеннях кута встановлення в заданих географічних координатах, з врахуванням погодних умов.

В останні роки вчені розробили різноманітні методи з метою максимізації генерації енергії фотоелектричних панелей, які можна умовно розділити на дві основні групи. Перша категорія методів включає в себе ті, які спрямовані на знаходження максимальної потужності, шляхом застосування контролерів з різноманітними алгоритмами, які надають змогу відслідковувати електричні параметри фотоелектричних панелей і забезпечують їх ефективну роботу в точці, близькій до максимуму вихідної потужності..

Друга група методів стосується визначення та забезпечення оптимального кута нахилу сонячних панелей, який враховує географічні координати, сонячну активність, погодні умови, температуру сонячної панелі і інші фактори. У цьому випадку оптимізація кута нахилу вимагає автоматичної фіксації параметрів генерації для різних кутів нахилу, враховуючи зміни факторів, що впливають на вироблену потужність. Такий підхід враховує багатофакторний вплив та ймовірнісний характер змін параметрів, що впливають на процес генерації енергії. Тому для визначення оптимального нахилу сонячних панелей необхідно здійснювати автоматичну фіксацію параметрів генерації для різних кутів установки, при зміні параметрів, які впливають на генеровану потужність.

Аналізуючи характеристики сонячних панелей можна відзначити залежність потужності генерації від інтенсивності випромінювання та температури сонячної панелі. Ці залежності відбивають відповідні вольт-амперні характеристики, для прикладу розглянемо характеристики полікристалічної сонячної панелі MAXPOWER CS6U-345P [20], які зображено на рис. 2.3.

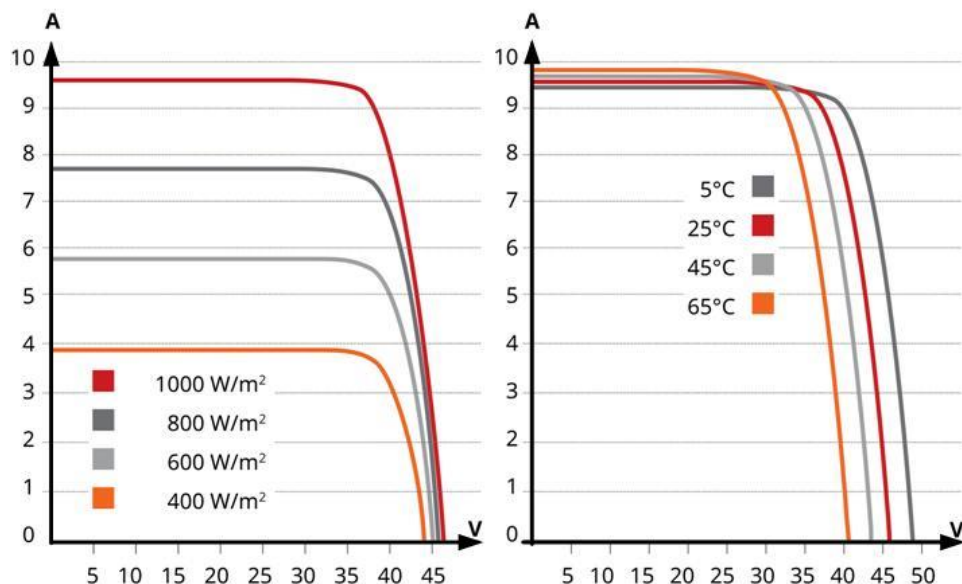


Рисунок 2.3. Вольт-амперні характеристики сонячної панелі
MAXPOWER CS6U-345P

Як видно із наведених характеристик найбільший вплив на генерацію чинить інтенсивність випромінювання джерела світла,

Якщо сонячні батареї встановлюються під деяким кутом β до горизонту, то середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню, може бути визначена за формулою [21]:

$$E_n = R \cdot E, \quad (2.2)$$

де E - середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню; R - відношення середньомісячної денної кількості сонячної радіації, що надходить на похилу і горизонтальну поверхні.

Коефіцієнт перерахунку з горизонтальної площині на похилу з південною орієнтацією дорівнює сумі трьох складових, що відповідають прямому, розсіяному і відбитому сонячному випромінюванню [21]:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) \cdot R_n + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (2.3)$$

де E_p - середньомісячна денна кількість розсіяного сонячного випромінювання, що надходить на горизонтальну поверхню; E_p / E - середньомісячна денна частка розсіяного (дифузійного) сонячного випромінювання; R_n - середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню; β - кут нахилу поверхні сонячної батареї до горизонту; ρ - коефіцієнт відображення (альbedo) поверхні Землі і навколишніх тіл, зазвичай що дорівнює 0,7 для зими і 0,2 для літа.

Середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню [21]:

$$R_{\text{н}} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{\text{зн}} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\text{зн}} \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_3 + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3 \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta} \quad (2.4)$$

де ϕ - широта місцевості, град; β - кут нахилу сонячної батареї до горизонту, град; δ - схил Сонця (кут між лінією, що з'єднує центри Землі і Сонця, і її проекцією на площину екватора) в середній день місяця, град; ω_3 - кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної поверхні, град; $\omega_{\text{зн}}$ - кут заходу Сонця для похилій поверхні з південною орієнтацією, град.

Тому, для правильної інсталяції панелей потрібно враховувати географічні координати, пору року, та погодні умови в даному регіоні. Головним недоліком існуючих підходів до визначення потужності генерування та оптимальних умов інсталяції є неточності які викликані додатковими факторами які впливають на ефективність генерації, тобто не враховується фактичний рівень генерації, що вкрай важливо при проектуванні систем автономного енергозабезпечення. Вплив додаткових факторів можна найбільш точно врахувати при проведенні експериментальних досліджень з використанням спеціальних пристроїв моніторингу параметрів генерації та зовнішнього середовища, з подальшою математичною обробкою результатів вимірювання та встановленням математичних залежностей між параметрами.

До пристрою моніторингу висувається ряд технічних вимог: неперервне вимірювання електричних параметрів: струму, напруги, потужності генерації; неперервне вимірювання параметрів зовнішнього середовища: температури, вологості, освітленості; пристрій повинен забезпечувати неперервний запис параметрів на протязі тривалого періоду часу (місяці, роки) із заданим інтервалом на надійний носій інформації;

повинна передбачатись можливість відправки даних на віддалений сервер по мережі Wi-fi .

Структурна схема запропонованого пристрою моніторингу генерації сонячної панелі зображено на рис. 2.4. Основними блоками пристрою є: мікропроцесорний головний модуль (Main monitoring module), модуль погодної станції (Weather Module), блок сенсорів (Sensors).

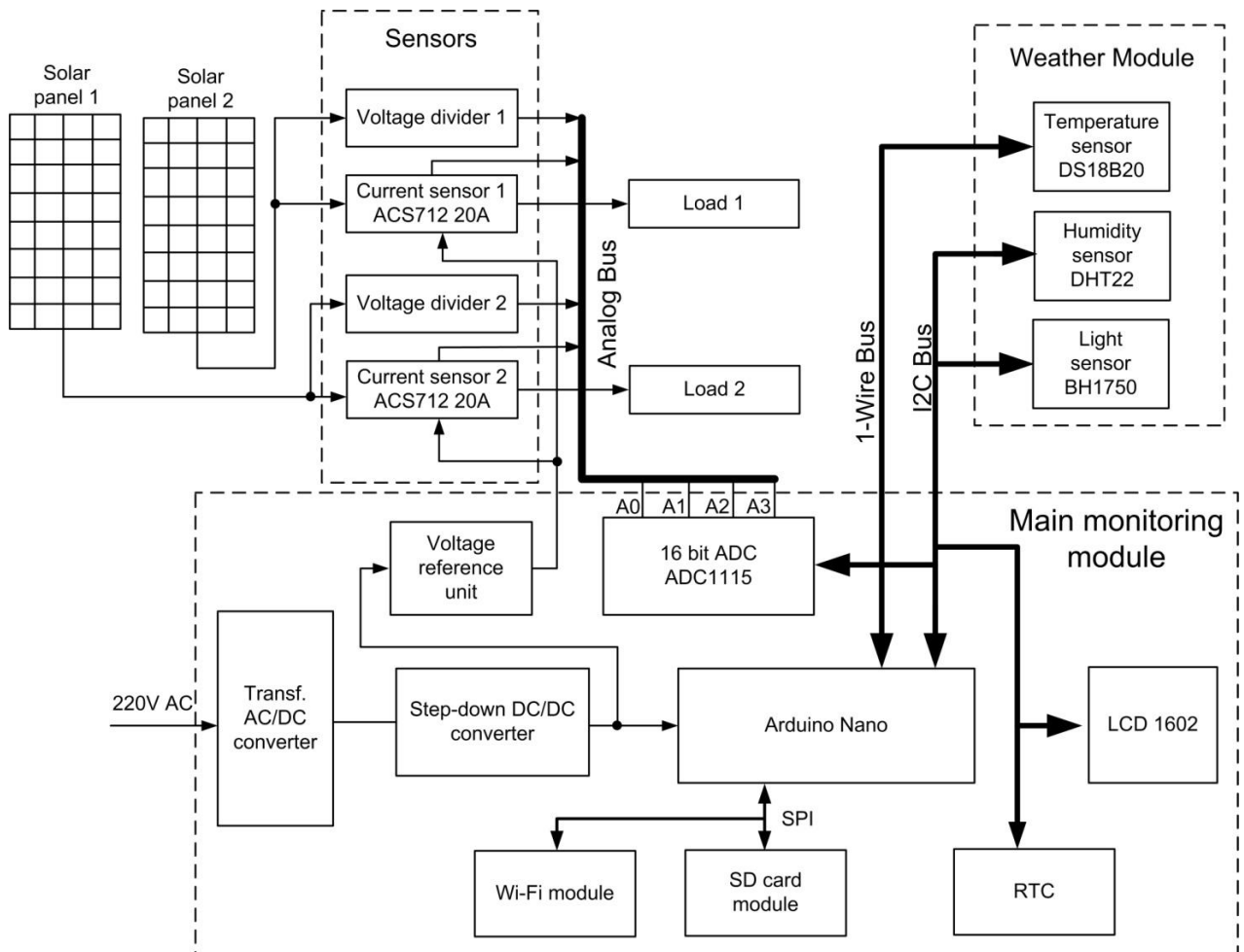


Рисунок 2.4 Структурна схема пристрою моніторингу генерації сонячної панелі

Живлення пристрою здійснюється через трансформаторний понижуючий блок живлення (Transf. AC/DC converter), для приведення вихідної напруги до рівня, що забезпечує роботу електронних пристроїв використано понижуючий DC-DC перетворювач (Step-down DC/DC

converter). Основу пристрою складає апаратна платформа Arduino Nano на базі мікроконтролера ATmega328. Пристрій здійснює двоканальне вимірювання струму і напруги сонячних панелей (Solar panel 1, Solar panel 2) або їх збірок. Струм та напруга сонячних панелей фіксуються відповідним сенсорами струму (Current sensor 1) та напруги (Voltage divider). В якості сенсора струму використано сенсор на ефекті Холла ACS712 20A, в якості сенсорів напруги використовується резистивний подільник з прецензійними резисторами. Сигнали пропорційні вихідному струму та напрузі панелей через аналогову шину подаються на входи 16 – бітного АЦП ADC1115, застосування даного АЦП дозволяє значно підвищити точність вимірювання в порівнянні із застосуванням вбудованого АЦП мікроконтролера ATmega328. Для проведення дослідження з метою визначення оптимального кута установки сонячної панелі, повинно бути забезпечено стале електричне навантаження Load 1 та Load 2 . В схемі також передбачено джерело опорної напруги (Voltage reference unit) для стабільного задання зміщення сенсорів струму. Додатково до пристрою приєднується модуль погодної станції (Weather Module) із сенсором температури DS18B20, сенсором вологості DHT22 та сенсором освітленості BH1750. Дані сенсори зв'язані з основним модулем через цифрові інтерфейси 1-Wire та I2C. Також по інтерфейсу SPI здійснюється зв'язок із модулем SD карти та Wi-fi модулем. Для відображення поточних параметрів використовується дисплей LCD 1602, також передбачено наявність годинника реального часу RTC з автономним живленням для прив'язки даних вимірювання до часу.

Після ввімкнення пристрій моніторингу ініціалізує SD карту та зчитує в оперативну пам'ять значення часу та дати, якщо ці дії відбулись успішно, фіксуються значення струму, напруги, потужності, температури, вологості та освітленості, які із заданим інтервалом T записуються на SD карту пам'яті. Значення інтервалу T обирається в діапазоні 1-10 хв, для забезпечення точності визначення струму, напруги та потужності використано алгоритм

усереднення на вказаному діапазоні, тоді отримаємо масив з кількістю рядків m :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_j = \frac{\sum_{i=0}^{T/\Delta t} (U_i \cdot \Delta t)}{T}; \\ I_j = \frac{\sum_{i=0}^{T/\Delta t} (I_i \cdot \Delta t)}{T}; \\ P_j = \frac{\sum_{i=0}^{T/\Delta t} (U_i \cdot I_i \cdot \Delta t)}{T}; \\ j \in N; j = 0, \frac{t}{T} \dots \frac{t}{m \cdot T}, \end{array} \right. \quad (2.5)$$

де Δt – дискретність вимірювання; U_i , I_i , P_i – елементи масиву значень напруги струму та потужності яка визначається кожен момент часу Δt ; U_j , I_j , P_j – елементи масиву усереднених значень напруги струму та потужності яка визначається на періоді T ;

Пристрій моніторингу параметрів генерації сонячної панелі наведений на рис. 2.4 використовується з панелями, які встановлено стаціонарно, він дає можливість визначати реальний рівень потужності сонячної панелі чи груп електрично з'єднаних панелей. Отримані результати моніторингу можуть бути використані для визначення коефіцієнту використання панелей, в заданих умовах їх встановлення. Запропонований підхід до побудови пристрою, як уже зазначалося, використовується з панелями, які встановлено стаціонарно. В випадку необхідності автономного вимірювання питомої потужності генерації на місцевості, із різними варіантами позиціонування панелі відносно сторін світу розроблено мобільний пристрій, структурна схема якого зображена на рис. 2.5. Малогабаритна сонячна панель (Solar panel) встановлена на двохосьовому трекері з можливістю зміни кута панелі в горизонтальній та вертикальній площині. Для повороту панелі в двох площинах використовуються горизонтальний (Gorizontal servo drive) та

вертикальний (Vertical servo drive) сервопривод. Сервоприводи мають реверсивне керування від мікропроцесорного головного модуля (Main monitoring module) через блок реле (Relay module). Мікропроцесорний головний модуль отримує інформацію про положення панелей завдяки наявності зворотного зв'язку виконаного на базі горизонтального та вертикального абсолютних енкодерів (Gorizontal encoder, Vertical encoder).

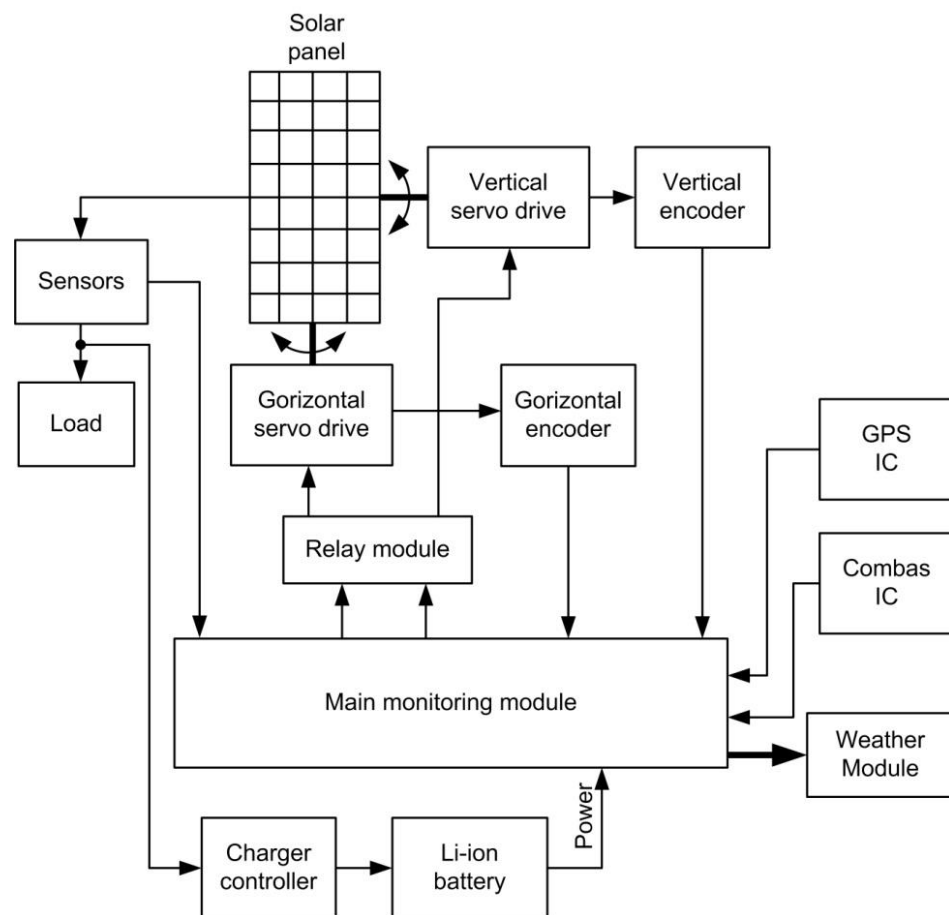


Рисунок 2.5. Структурна схема мобільного пристрою моніторингу генерації сонячної панелі

Додатково мобільний пристрій передбачає наявність сенсорів для визначення точних географічних координат та положення панелі відносно сторін світу (GPS IC та Combas IC відповідно). Для забезпечення автономного живлення всіх електронних та електромеханічних вузлів пристрою використовується літій-іонна акумуляторна батарея, що

заряджається від сонячної панелі чи іншого джерела через контролер заряду (Charger controller).

Отже розроблені підходи щодо побудови апаратно-програмного комплексу для моніторингу електричних параметрів генерації сонячної панелі дозволяють визначати характеристики генерації безпосередньо на місці їх інсталяції в заданих географічних координатах. Крім того, фіксація зміни генерування в залежності від погодних умов, протягом тривалого часу, дозволить отримати кореляційні залежності для прогнозування рівня генерації, що є важливим при формуванні автономних систем електропостачання.

2.3 Висновки по розділу 2

В цьому розділі було здійснено опис та обґрунтування факторів, які впливають на генерування електроенергії, фотоелектричними модулями з прив'язкою до географічних умов України. Розроблено концепцію IoT системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів з розробкою відповідних структурних схем. Дана система забезпечує як локальний так і віддалений збір даних.

3 СИНТЕЗ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ІОТ-СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

3.1 Розроблення архітектури інформаційної системи

Величина вихідної потужності сонячних панелей залежить від багатьох факторів: величина сонячної радіації, температура повітря, матеріал та технологія виготовлення фотоелектричних елементів, алгоритм управління потужністю генерації з врахування вольт-амперної характеристики панелі. Є велика кількість математичних моделей, які описують оптимальні параметри інсталяції та використання енергії сонячних панелей. Ці моделі потребують перевірки та адаптації до умов конкретного регіону, що неможливо без виконання ряду експериментальних досліджень. Пристрої вимірювання параметрів генерації сонячними панелями мають стаціонарне виконання, що унеможливорює їх використання в польових умовах для аналізу параметрів генерації на вже встановлених панелях.

Тому актуальною є задача розробки інформаційно-вимірювальних систем для визначення характеристик сонячних панелей за фактичних умов їх інсталяції.

До IoT системи висувається ряд вимог: можливість автономної роботи, формування віддаленої бази даних результатів вимірювання, можливість формування необхідної вибірки даних та їх обробки.

Для розв'язання задачі запропоновано пристрій структурна схема якого зображена на рис. 3.1. Сонячні панелі SP підключені через контролер UI до навантаження Z_L та акумуляторної батареї G. Для визначення струмів та напруг панелі, навантаження та акумулятора використано цифрові сенсори pAV1-3. Вихідні сигнали сенсорів пропорційні струму та напрузі поступають до мікроконтролера MCU. Для синхронізації по часу мікроконтролер

використовує інформацію модуля реального часу RTC, також передбачено запис інформації вимірювання на зовнішню карту пам'яті SD. Також для відображення поточних даних в структурній схемі передбачено OLED дисплей D Технічні характеристики пристрою наведені в табл.3.1.

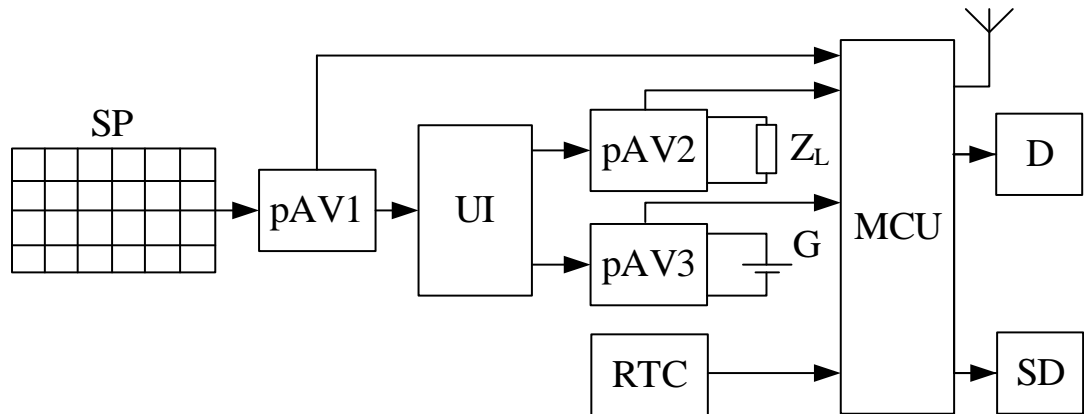


Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою для визначення характеристик сонячних панелей

Табл. 3.1 – Технічні характеристики

Параметр	Значення
Кількість каналів моніторингу	3
Діапазон вимірюваних напруг, В	0...26
Діапазон вимірюваних струмів, А	-3,6...3,6
Швидкість передачі даних, б/с	115200
Метод формув. вимірюваних значень	Усереднення 1000 значень з вибірки 128 точок
Час вибірки на канал, мс	68,1
Дискретність вимірювання, с	10
Живлення пристрою,	5В через USB, або від зовн. джерела ($V_{in} = 6...12В$).
Підключення до ПК	USB --- RS-232
Пам'ять карти Gb	4

На рис. 3.2 зображено структурну схему IoT-системи оцінювання

ефективності функціонування фотоелектричних модулів. До складу системи входять сенсор освітлення TEMT6000, сенсор температури DS18B20, енергометр трьохканальний INA3221, в якості керуючого пристрою використовується NodeMCU на базі контролера ESP8266 із Wi-Fi модулем. Зв'язок з GoogleSheets здійснюється через роутер, так як NodeMCU працює в режимі клієнта.

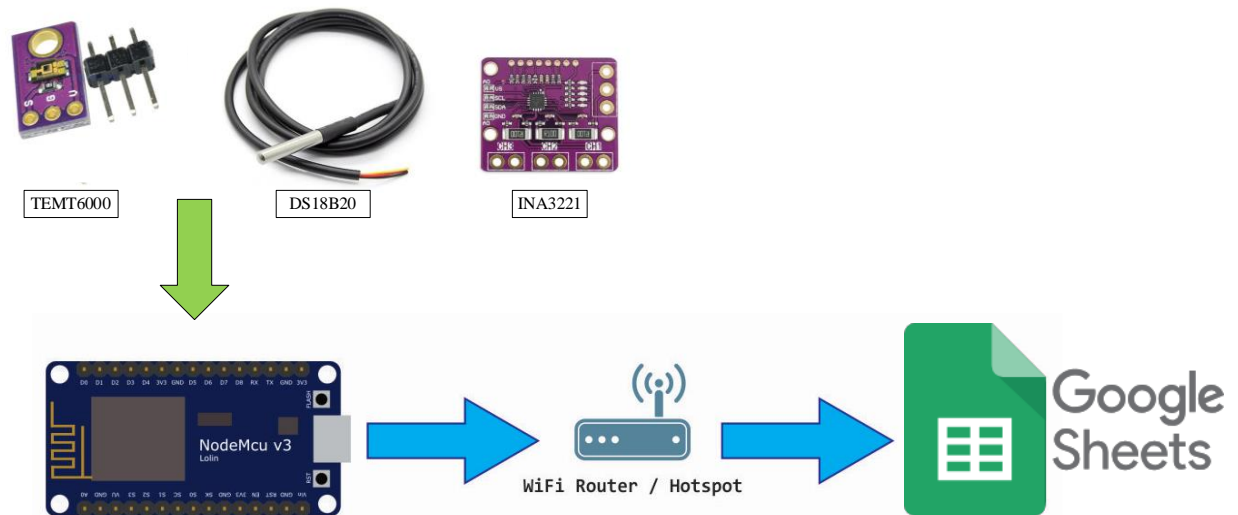


Рисунок 3.2 - Структурна схема IoT-системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів

3.2 Обґрунтування вибору елементів апаратної частини IoT системи

В якості базового контролера вибираємо плату NodeMCU (Lolin) вона являє собою плату розробника на базі чіпу ESP8266 (версія ESP12E), який представляє собою UART-WiFi модуль з ультра низьким споживанням. Сам чіп проектувався для пристроїв інтернету речей, а дана плата дозволяє спростити розробку, тому що на ній вже реалізовано підключення по USB, регулятор живлення і все виводи мікросхеми чіпу розведені на гребінки зі стандартним кроком 2.54 мм, що дозволяє вставити його в макетну плату і створити прототип навіть не включаючи паяльник. Крім цього плата поставляється з прошивкою NodeMCU, що дозволяє програмувати її за

допомогою мови Lua або за допомогою інтегрованого середовища розробки Arduino IDE. На рис. 3.3 показано зовнішній вигляд плати.

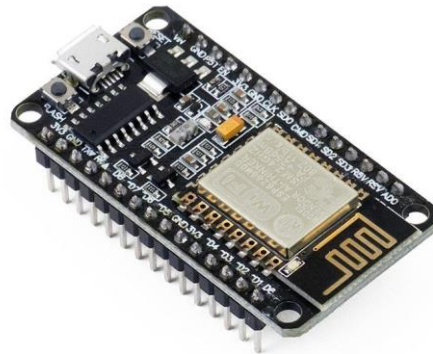


Рисунок 3.2 – Програмована плата NodeMCU

Основні характеристики:

- WiFi 802.11 b/g/n
- підтримка STA/AP/STA + AP режимів
- вбудований стек протоколів TCP/IP з підтримкою множинних клієнтських підключень (до 5)
- цифрові входи виходи D0 ~ D8, D1 ~ SD3: можуть бути використані як GPIO, PWM, ІІС, тощо.
- струм на споживання в простій: 15 мА
- Аналоговий вхід AD0
- напруга живлення: 4.5 - 9В (10В максимум), живлення від USB з наданням налагоджуваного інтерфейсу
- споживання в режимі обміну даними: ~ 70 мА (200 мА максимум).

Для програмування NodeMCU можна використати середовище розробки Arduino IDE. Мова програмування пристроїв через Arduino IDE заснована на

C/C++ і зкомпонована з бібліотекою AVR Libc дозволяє використовувати будь-які її стандартні функції. Разом з тим мова є досить простою в освоєнні,

і на даний момент Arduino IDE - це, мабуть, найзручніший спосіб програмування пристроїв на мікроконтролерах. Інтегроване середовище розробки Arduino IDE це багатоплатформовий додаток на Java, що включає в себе редактор коду, компілятор і модуль передачі прошивки в плату. Середовище розробки засноване на мові програмування Processing та спроектоване для програмування новачками, не знайомими близько з розробкою програмного забезпечення. Мова програмування аналогічна мові Wiring. Загалом, це C++, доповнений деякими бібліотеками. Програми обробляються за допомогою препроцесора, а потім компілюються за допомогою AVR-GCC. Користувачам необхідно визначити лише дві функції для того, щоб створити програму, яка буде працювати за принципом циклічного виконання: `setup()`: функція виконується лише раз при старті програми і дозволяє задати початкові параметри `loop()`: функція виконується періодично, доки плата не буде вимкнена [9] Arduino IDE для ESP8266 дозволяє створювати прошивки і прошивати їх в ESP8266 точно так же, як для плат Arduino. Крім того, є можливість використовувати практично всі Arduino бібліотеки з ESP8266 після нескладного доопрацювання. В даний час вже досить багато бібліотек адаптовано для використання з ESP8266.

В якості необхідного сенсора освітленості вибираємо сенсор ТЕМТ6000 (рис.3.3) Основні характеристики:

- тип сенсора – аналоговий, фоторезистивний;
- напруга живлення – 3 - 5 В;
- діапазон спектральної чутливості – 360 нм - 970 нм;
- максимальний струм колектора – 20 мА;
- струм колектора при освітленості 20 lx – 10 мА, 100 lx – 50мА;
- розміри плати – 14х7мм .

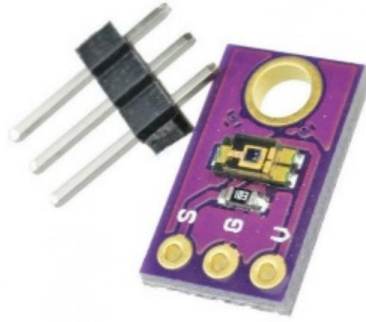


Рисунок 3.3 – Сенсор освітленості TEMT6000

Сонячна інсоляція і освітленість в люксах є двома різними, але пов'язаними концепціями, які використовуються для вимірювання світла, але з різних точок зору.

Сонячна інсоляція: Це кількість сонячної енергії, яка падає на площу земної поверхні. Вимірюється у ваттах на квадратний метр (W/m^2) і використовується у різних галузях, таких як сонячна енергетика, метеорологія та будівництво.

Освітленість в люксах: Це міра освітлення, яка визначається як кількість світла, яка падає на площу поверхні. Освітленість вимірюється в люксах (lx) і використовується для оцінки рівня світла в приміщеннях, на вулицях, у виробничих приміщеннях тощо.

Існує певна залежність між сонячною інсоляцією та освітленістю в люксах, особливо коли мова йде про освітлення приміщень або зовнішню освітленість:

Для вимірювання вихідної потужності використаємо інтегрований пристрій енергометр трьохканальний INA3221 (рис. 3.4). Цифровий 3-х канальний сенсор струму та напруги INA3221 з інтерфейсом I2C та SBUS призначений для контролю споживаного пристроями струму. Контролюється струм шунтом плюсового контакту джерела живлення. Для кожного каналу напруга джерела живлення може бути різною. Використання поширених

послідовних інтерфейсів дозволяє підключати датчик як до контролерів, так і до міні-комп'ютерів. За значенням струму та напруги також визначається генерована потужність.

Основні технічні характеристики:

- Напруга живлення: 2.7 - 5.5 В;
- Максимальний вимірюваний струм: 3.2 А;
- Максимальна вимірювана напруга: 26 В;
- Інтерфейси: I2C, SMBUS;
- Габаритні розміри модуля: 38 x 30 мм.

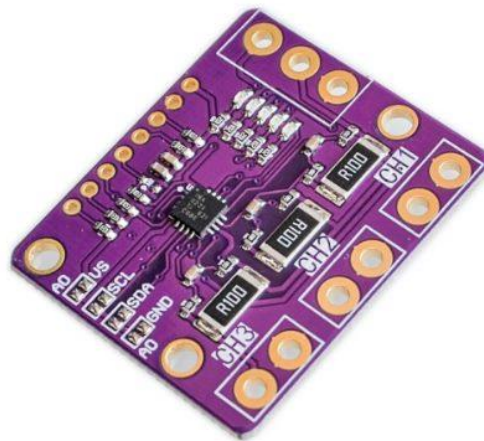


Рисунок 3.4 – Енергометр INA3221

INA3221 - це інтегрована схема моніторингу напруги, струму та потужності, що містить три незалежні канали для вимірювання цих параметрів. Ось опис основних характеристик та функцій сенсора INA3221:

- INA3221 дозволяє вимірювати напругу, струм та потужність на трьох незалежних каналах одночасно;
- інтегрована схема має три канали для моніторингу різних джерел живлення або навантажень;

- INA3221 підтримує зв'язок по шині I2C (Inter-Integrated Circuit), що робить його легким у використанні з мікроконтролерами та іншими пристроями;
- сенсор забезпечує високу точність вимірювань для надійного моніторингу напруги, струму та потужності;
- INA3221 має вбудовані захисні механізми, що дозволяють уникнути пошкодження сенсора внаслідок перевантаження;
- сенсор має низьке споживання енергії, що робить його ідеальним для застосувань, де важлива енергоефективність;
- INA3221 має ряд параметрів, які можна налаштовувати, такі як режим роботи, роздільність вимірювань та інші;
- сенсор може працювати з широким діапазоном напруги та струму, що робить його універсальним для багатьох застосувань.
- INA3221 відомий своєю високою надійністю та стабільністю, що робить його популярним в промислових та хобі проектах.

Сенсор INA3221 широко використовується для моніторингу електроживлення, навантаження та інших параметрів у різноманітних пристроях, від робочих станцій до портативних електронних пристроїв.

Для виведення інформації про параметри моніторингу обираємо дисплей SSD1306 (рис. 3.5). SSD1306 - це невеликий монохромний дисплей з органічними світлодіодами (OLED), який широко використовується в електронних проектах для відображення тексту, графіки та інших візуальних елементів



Рисунок 3.5 – Дисплей SSD1306

Основні характеристики:

- розмір екрана - 0.96";
- тип екрана - OLED;
- напруга живлення - 3-6 В;
- роздільна здатність дисплея - 128*64;
- габарити - 11x27x27 мм;
- кут огляду > 160 градусів;

Отже обране апаратне забезпечення дозволяє моніторити стан фотоелектричної панелі отримуючи дані про величину освітлення в місці інсталяції та електричну потужність генерування.

3.3 Програма мікроконтролера IoT системи збору даних функціонування фотоелектричних модулів

Відповідно до структурної схеми IoT-системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів (рис. 3.2), до програмної частини відноситься програма мікроконтролера та серверна програма для агрегування даних з можливістю їх відображення та аналізу.

Алгоритм роботи програми мікроконтролера наведено на рис. 3.6, він передбачає послідовне виконання операцій підключення до мережі, визначення параметрів генерації та сонячної інсоляції та циклічна передача одержаних даних на сервер.

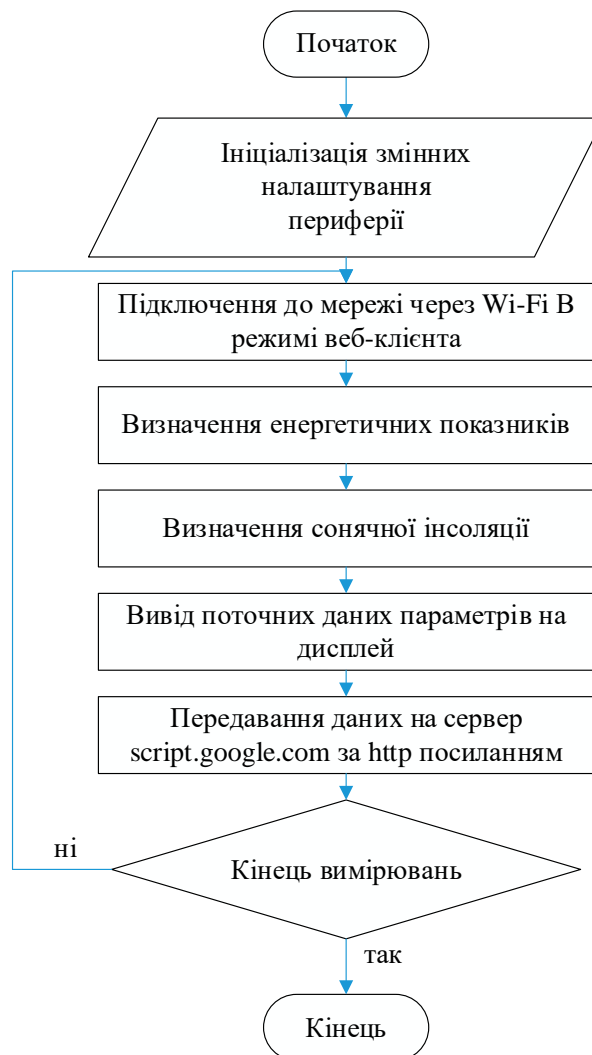


Рисунок 3.6 – Алгоритм мікроконтролера

Програму наведено в додатках, розглянемо її складові на окремих фрагментах коду. На рис. 3.7. наведено фрагмент коду, що відповідає за початкову ініціалізацію змінних та налаштування периферії.

```

1 //-----Include the NodeMCU ESP8266 Library
2 //-----see here: https://www.youtube.com/watch?v=8jMr94B8iN0 to add NodeMCU ESP12E ESP8266
3
4 #include <ESP8266WiFi.h>
5 #include <WiFiClientSecure.h>
6 #include <Wire.h>
7 #include <Adafruit_INA219.h>
8 #include <Adafruit_GFX.h>
9 #include <Adafruit_SSD1306.h>
10 Adafruit_INA219 ina219;
11 #define ON_Board_LED 2 //--> Defining an On Board LED, used for indicators when the process of connecting to a wifi router
12 #define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
13 #define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels
14 #define OLED_RESET -1 // Reset pin # (or -1 if sharing Arduino reset pin)
15 #define SCREEN_ADDRESS 0x3C ///< See datasheet for Address; 0x3D for 128x64, 0x3C for 128x32
16 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
17 //-----SSID and Password of your WiFi router.
18 const char* ssid = "UktDomNet"; //--> Your wifi name or SSID.
19 const char* password = "UKR_3526"; //--> Your wifi password.
20 //-----
21 //-----Host & httpsPort
22 const char* host = "script.google.com";
23 const int httpsPort = 443;
24 //-----
25 String T1, T2, T3, T4 ;
26 float volts, amps, microamps, lux;
27 float shuntvoltage = 0;
28 float busvoltage = 0, busvoltage_corr = 0;
29 float current_mA = 0, current_mA_corr = 2.6;
30 float loadvoltage = 0;
31 float power_mW = 0, power_mW_corr = -4;
32 WiFiClientSecure client; //--> Create a WiFiClientSecure object.
33 String GAS_ID = "AKfycbzCHYxdNjEBxWkWhjT6HkecqkWGvEPSEV6CYsGXoSnYHpmQ3VWMkh-3zfTbUZBJ6IPLg"; //--> spreadsheet script ID
34 //----- void setup

```

Рисунок 3.7 - Фрагмент коду ініціалізації

Спочатку за допомогою директиви `#include` підключаються файли бібліотек необхідні для роботи з пристроями які включені в проект, наприклад `<ESP8266WiFi.h>` - бібліотека для роботи з платами ESP в середовищі розробки Arduino IDE, `<Adafruit_SSD1306.h>` - бібліотека, яка підтримує роботу із дисплеєм SSD1306.h. Далі за допомогою директиви `#define` задаються імена необхідних констант, наприклад `SCREEN_ADDRESS 0x3C` задає адресу дисплея в I2C мережі. Наступний код фрагменту описує змінні в яких зберігаються дані для функціонування IoT системи: масиви `ssid` та `password`, зберігають ім'я та пароль точки доступу Wi-Fi до якої підключається контролер, `host` та `httpsPort` визначають ім'я хоста та порт куди будуть пересилатись дані, стрічкові змінні `T1`, `T2`, `T3`, `T4` це змінні в яких

зберігаються 4 величини моніторингу, які передаються в http-запиті, змінні типу float: volts, lux, current_mA, power_mW – це змінні із плаваючою точкою в яких зберігаються результати вимірювань необхідних та проміжних параметрів. Слід звернути увагу на змінні із індексом corr, це змінні в яких зберігаються константи для корегування вимірюваних параметрів, вони налаштовуються експериментально. Змінна String GAS_ID містить так званий ідентифікатор розгортки веб додатку на хості script.google.com. Цей ідентифікатор отримується налаштуваннях скрипта.

На рис. 3.8. наведено фрагмент коду, що відповідає за початкові установки та операції які виконуються один раз, не циклічно, ці команди об'єднуються функцією setup(). Відзначимо основні команди цього блоку коду.

```
//===== void setup
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  delay(2000);
  if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) { // Address 0x3D for 128x64
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for(;;);
  }
  delay(2000);
  WiFi.begin(ssid, password); //--> Connect to your Wifi router
  Serial.println("");
  pinMode(ON_Board_LED, OUTPUT); //--> On Board LED port Direction output
  digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH); //--> Turn off Led On Board
  if (! ina219.begin()) {
    Serial.println("Failed to find INA219 chip");
    while (1) { delay(10); }
  }
  //-----Wait for connection
  Serial.print("Connecting");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    //-----Make the On Board Flashing LED on the process of connecting to the wifi r
    digitalWrite(ON_Board_LED, LOW);
    delay(250);
    digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH);
    delay(250);
    //-----
  }
  //-----
  digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH); //--> Turn off the On Board LED when it is connected to the wifi router.
  //-----If successfully connected to the wifi router, the IP Address that will be v
  Serial.println("");
  Serial.print("Successfully connected to : ");
  Serial.println(ssid);
  Serial.print("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  Serial.println();
  //-----
  client.setInsecure();
}
```

Рисунок 3.8 – Функція setup()

Serial.begin(115200) – визначає швидкість послідовного порта для відладки на рівні 115200 бод, функція WiFi.begin(ssid, password) підключає плату до точки доступу за відповідним імям та паролем, цикл while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) відповідає за очікування підключення і моговання сигнальної лампи на платі через 0,5 секунди.

На рис. 3.9 наведено фрагмент основного коду описаного в функції loop(), усі команди цієї функції виконуються циклічно, відзначимо основні команди цього блоку коду Функція energi_meter() це користувацька функція яка відповідає за роботу із енергометром INA219, Функція Light_meter() відповідає за опитування сенсора освітленості TEMT6000.

```

76 //===== void loop
77 void loop() {
78     energi_meter();
79     Light_meter();
80     // Display static text
81     display.clearDisplay();
82     display.setTextSize(1.2);
83     display.setTextColor(WHITE);
84     display.setCursor(0, 0);
85     display.println(" SOLAR MONITORING");
86     display.setTextSize(1);
87     display.setTextColor(WHITE);
88     display.setCursor(0, 20);
89     display.print("Energy: ");
90     display.print(power_mW);
91     display.println(" mW");
92     display.setCursor(0, 30);
93     display.print("Voltage: ");
94     display.print(busvoltage);
95     display.println(" V");
96     display.setCursor(0, 40);
97     display.print("Current: ");
98     display.print(current_mA);
99     display.println(" mA");
100    display.setCursor(0, 50);
101    display.print("Light: ");
102    display.print(lux);
103    display.println(" lux");
104    display.display();
105    delay(30000);
106    sendData(); //--> Calls the sendData Subroutine
107 }
108 //=====

```

Рисунок 3.9 – Функція loop()

Далі йде блок функцій роботи із дисплеєм де функції `display.clearDisplay(); display.setTextSize(1.2); display.setTextColor(WHITE);` задають очищення дисплею, встановлення розміру шрифту та кольору тексту відповідно. Для виведення параметрів на дисплей використано наступні функції `display.setCursor(0, 20); display.print("Energy: "); display.print(power_mW); display.println(" mW");` - спочатку встановлюємо позицію курсора де буде вводитись текст, записується надпис вимірюваного параметра, поряд записується визначене число та одиниці вимірювання із переходом на наступну стрічку. Отже на дисплей виводиться вихідна потужність, напруга, струм модуля та величину освіленості в точці вимірів. Функція `delay(30000)` задає інтервал вимірювань в 30 секунд а функція `sendData()` відповідає за відправку даних на сервер.

На рис. 3.10 зображено фрагмент коду функції `energi_meter()` вимірювання енергетичних параметрів енергометром INA219.

```

108 //=====
109 void energi_meter() {
110     shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();
111     busvoltage = ina219.getBusVoltage_V()+busvoltage_corr;
112     current_mA = ina219.getCurrent_mA()+current_mA_corr;
113     power_mW = ina219.getPower_mW()+power_mW_corr;
114     loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage / 1000);
115     Serial.print("Bus Voltage:  "); Serial.print(busvoltage); Serial.println(" V");
116     Serial.print("Shunt Voltage: "); Serial.print(shuntvoltage); Serial.println(" mV");
117     Serial.print("Load Voltage:  "); Serial.print(loadvoltage); Serial.println(" V");
118     Serial.print("Current:      "); Serial.print(current_mA); Serial.println(" mA");
119     Serial.print("Power:        "); Serial.print(power_mW); Serial.println(" mW");
120     Serial.println("");
121     delay(2000);
122 }
123 //=====
124 void Light_meter() {
125     volts = analogRead(A0) * 5.0 / 1024.0;
126     amps = volts / 10000.0; // across 10,000 Ohms
127     microamps = amps * 1000000;
128     lux = microamps * 2.0;
129     delay(3500);
130     // Check if any reads failed and exit early (to try again).
131     String V = "Voltage : " + String(volts) + " V";
132     String L = "Light : " + String(lux) + " lx";
133     Serial.println(V);
134     Serial.println(L);
135 }
136 //=====

```

Рисунок 3.10 – Функції `energi_meter()` та `Light_meter()`

Методи `ina219.getShuntVoltage_mV()`, `getBusVoltage_V()`, `ina219.getCurrent_mA()` та `ina219.getPower_mW()` відповідають за зчитування значень напруги на шунті, напруги живлення, струму фотоелектричної панелі та потужності генерації відповідно, ця інформація також дублюється для відладки в послідовний порт. Також на рис. 3.10 зображено фрагмент коду функції `Light_meter()` вимірювання сонячної інсоляції сенсором ТЕМТ6000. Пропорційна напруга перетворюється в цифровий код за допомогою 10-розрядного АЦП контролера ESP8266 ця інформація також дублюється для відладки в послідовний порт.

На рис. 3.11 зображено фрагмент коду функції `sent_Data()` яка відправляє http запит з результатами моніторингу з використанням методу `client.print`.

```

138 //===== void sendData
139 // Subroutine for sending data to Google Sheets
140 void sendData() {
141     Serial.println("=====");
142     Serial.print("connecting to ");
143     Serial.println(host);
144     //-----Connect to Google host
145     if (!client.connect(host, httpsPort)) {
146         Serial.println("connection failed");
147         return;
148     }
149     //-----Processing data and sending data
150     //String string_temperature = String(tem);
151     T1 = String(lux);
152     T2 = String(power_mW);
153     T3 = String(busvoltage);
154     T4 = String(current_mA);
155     String url = "/macros/s/" + GAS_ID + "/exec?lux=" + T1 + "&power=" + T2 + "&volt=" + T3 + "&current=" + T4;
156     Serial.print("requesting URL: ");
157     Serial.println(url);
158
159     client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +
160         "Host: " + host + "\r\n" +
161         "User-Agent: BuildFailureDetectorESP8266\r\n" +
162         "Connection: close\r\n\r\n");
163
164     Serial.println("request sent");

```

Рисунок 3.11 – Функція `sent_Data()`

3.4 Програма серверної частини IoT системи збору даних функціонування фотоелектричних модулів

Дані із сенсорів не можуть тривало накопичуватись в пам'яті контролера, для їхнього збору необхідно мати віддалений сервер, який буде реагувати на запити від контролера і записувати інформацію в своїй пам'яті для тривалого зберігання та подальшого аналізу. Є різні технології такого зберігання в роботі пропонується використати Google Sheets так як це доступний інструмент для збору даних де одразу можна здійснити попередній аналіз та обробку.

Google Sheets - це потужний онлайн інструмент, який надає безліч можливостей для роботи з даними та таблицями. Ось докладніше про його можливості:

1) онлайн доступ та спільна робота: Google Sheets дозволяє працювати з даними в режимі онлайн, надаючи можливість одночасно редагувати таблиці кільком користувачам. Це ідеально підходить для спільної роботи над проектами або документами;

2) робота з даними: є можливість вводити, редагувати та аналізувати різноманітні дані в таблицях Google Sheets. Це може бути будь-що від чисел та тексту до дат та формул, що дозволяє створювати складні моделі та аналізувати дані;

3) функції та формули: Google Sheets має вбудовані функції та формули для автоматизації обчислень та аналізу даних. Ви можете використовувати їх для виконання різноманітних завдань, від простих обчислень до складних аналітичних операцій;

4) графіки та діаграми: вбудовані інструменти Google Sheets дозволяють легко створювати графіки та діаграми на основі ваших даних. Це допомагає візуалізувати дані та зробити їх зрозумілішими для аналізу;

5) фільтрація та сортування: Google Sheets надає можливість легко фільтрувати та сортувати дані в таблицях, що допомагає швидко знаходити необхідну інформацію та організовувати дані;

6) спеціальні функції: крім стандартних функцій, Google Sheets має широкий спектр спеціальних функцій, які дозволяють виконувати різноманітні завдання, такі як робота з часом, текстом, статистикою тощо;

7) імпорт та експорт даних: є можливість легко імпортувати дані з інших джерел, таких як Microsoft Excel, а також експортувати дані в різні формати файлів, що дозволяє легко обмінюватися даними з іншими програмами;

8) можливості форматування: Google Sheets дозволяє налаштовувати вигляд та формат своїх даних, використовуючи різноманітні опції форматування, такі як колір тексту, шрифт, рамки та інші стилізації.

Використовуючи функції Google Sheet на інших вкладках документу можна формувати необхідні вибірки та здійснювати обробку інформації про енергетичні процеси в системі.

Apps Script - це сервіс від Google, який дозволяє створювати та розгортати додатки та скрипти для різних продуктів Google, таких як Google Sheets, Google Docs, Google Forms та інші. Скрипти для Apps Script пишуться мовою JavaScript, що робить їх доступними для багатьох розробників, оскільки JavaScript є однією з найпоширеніших мов програмування. Apps Script має простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс розробки, що дозволяє швидко створювати та розгортати різноманітні додатки та скрипти. За допомогою Apps Script можна автоматизувати рутинні завдання, такі як генерація звітів, обробка даних, надсилання повідомлень електронною поштою та багато іншого. Apps Script дозволяє розширювати функціональність різних продуктів Google, додавати нові можливості та взаємодіяти з іншими сервісами та API, можливість зберігати та обробляти дані безпосередньо у відповідних продуктах Google (наприклад, таблицях

Google Sheets) за допомогою скриптів.

Використовуючи розширення Apps Script в Google Sheets є можливість розгортання веб-додатка (рис. 3.12), який опрацьовує http-запити що періодично генеруються NodeMCU і містять результати вимірювань сенсорів які характеризують функціонування фотоелектричного модуля.

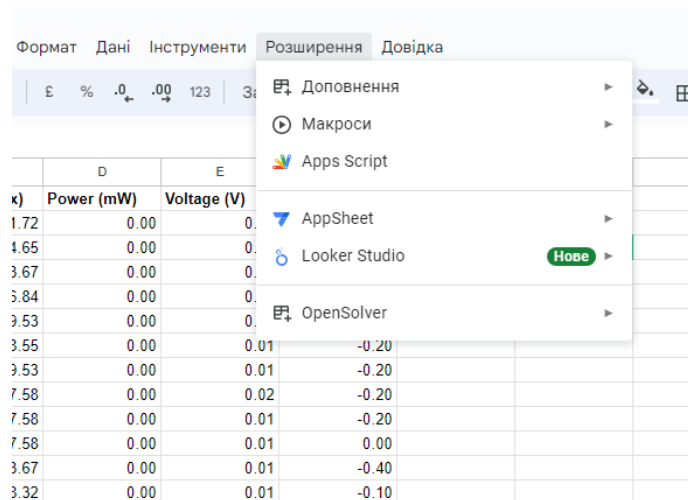


Рисунок 3.12 – Доступ до Apps Script в Google Sheets

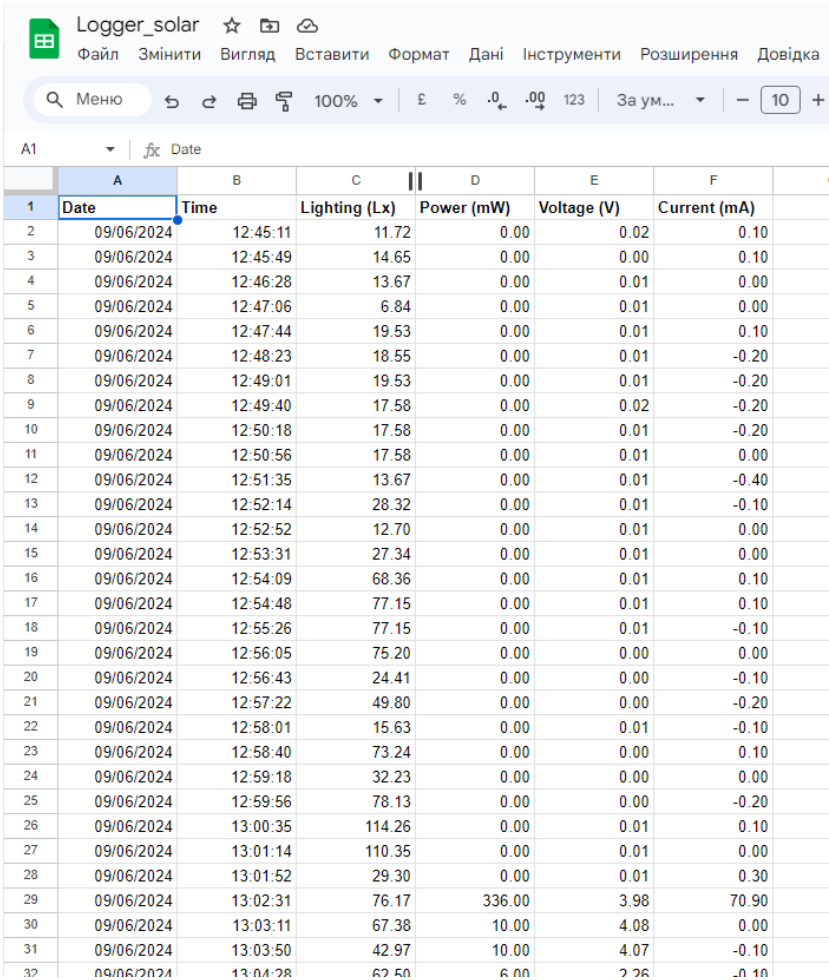
Виміряні усереднені дані струмів і напруг та розраховані потужності панелі, навантаження та акумуляторної батареї записуються через рівні проміжки часу на карту пам'яті, паралельно, через Wi-fi модуль ці дані передаються у вигляді GET запити. В якості сервера використовується Google Sheet таблиця, яка розгорнута в режимі веб-додатку за допомогою інструменту Apps Script. Відповідний js-скрипт здійснює обробку http запитів, які формує мікроконтролер, записуючи GET параметри у відповідні комірки таблиці, також передбачено запис поточного часу формування запити.

GET-запит (GET request) - це один із методів HTTP-протоколу, який використовується для отримання даних з веб-сервера. У контексті HTTP-протоколу, GET-запит надсилається з клієнта (наприклад, веб-браузера) на сервер з метою отримання відповіді, яка містить певні ресурси або дані.

GET-запит використовується для простого отримання даних з сервера,

він не змінює стану сервера або не впливає на дані на ньому. GET-запит може містити параметри, які передаються разом з URL-адресою запиту. Ці параметри можуть використовуватися для передачі додаткової інформації на сервер, наприклад, для фільтрації даних або визначення опцій запиту. Оскільки GET-запит використовується для отримання даних, він часто використовується для доступу до веб-сторінок, зображень, файлів та іншого контенту, який можна публічно переглядати.

Фрагмент таблиці наведено на рис. 3.13, дані вимірювань заповнюють її в реальному часі.



	A	B	C	D	E	F
1	Date	Time	Lighting (Lx)	Power (mW)	Voltage (V)	Current (mA)
2	09/06/2024	12:45:11	11.72	0.00	0.02	0.10
3	09/06/2024	12:45:49	14.65	0.00	0.00	0.10
4	09/06/2024	12:46:28	13.67	0.00	0.01	0.00
5	09/06/2024	12:47:06	6.84	0.00	0.01	0.00
6	09/06/2024	12:47:44	19.53	0.00	0.01	0.10
7	09/06/2024	12:48:23	18.55	0.00	0.01	-0.20
8	09/06/2024	12:49:01	19.53	0.00	0.01	-0.20
9	09/06/2024	12:49:40	17.58	0.00	0.02	-0.20
10	09/06/2024	12:50:18	17.58	0.00	0.01	-0.20
11	09/06/2024	12:50:56	17.58	0.00	0.01	0.00
12	09/06/2024	12:51:35	13.67	0.00	0.01	-0.40
13	09/06/2024	12:52:14	28.32	0.00	0.01	-0.10
14	09/06/2024	12:52:52	12.70	0.00	0.01	0.00
15	09/06/2024	12:53:31	27.34	0.00	0.01	0.00
16	09/06/2024	12:54:09	68.36	0.00	0.01	0.10
17	09/06/2024	12:54:48	77.15	0.00	0.01	0.10
18	09/06/2024	12:55:26	77.15	0.00	0.01	-0.10
19	09/06/2024	12:56:05	75.20	0.00	0.00	0.00
20	09/06/2024	12:56:43	24.41	0.00	0.00	-0.10
21	09/06/2024	12:57:22	49.80	0.00	0.00	-0.20
22	09/06/2024	12:58:01	15.63	0.00	0.01	-0.10
23	09/06/2024	12:58:40	73.24	0.00	0.00	0.10
24	09/06/2024	12:59:18	32.23	0.00	0.00	0.00
25	09/06/2024	12:59:56	78.13	0.00	0.00	-0.20
26	09/06/2024	13:00:35	114.26	0.00	0.01	0.10
27	09/06/2024	13:01:14	110.35	0.00	0.01	0.00
28	09/06/2024	13:01:52	29.30	0.00	0.01	0.30
29	09/06/2024	13:02:31	76.17	336.00	3.98	70.90
30	09/06/2024	13:03:11	67.38	10.00	4.08	0.00
31	09/06/2024	13:03:50	42.97	10.00	4.07	-0.10
32	09/06/2024	13:04:28	62.50	6.00	2.26	-0.10

Рисунок 3.13 – Фрагмент таблиці з вимірювальними значеннями генерації

За опрацювання одержаного http-запиту відповідає js-скрипт лістинг якого зображено на рисунку 3.8. Якщо отримано запит, що містить ідентифікатор документа в стрічку в окремі колонки записуються дата та час,

показання температури та сенсора освітлення відповідно, при отриманні наступного повідомлення запис відбувається у вільній, тобто наступній стрічці.

```

1  function doGet(e) {
2      Logger.log( JSON.stringify(e) );
3      var result = 'Ok';
4      if (e.parameter == 'undefined') {
5          result = 'No Parameters';
6      }
7      else {
8          var sheet_id = '1TIMguX-4cWDzyU4l0c6V9ewt171ky8AVkvJ7WnXsBRA'; // Sp
9          var sheet = SpreadsheetApp.openById(sheet_id).getActiveSheet();
10         var newRow = sheet.getLastRow() + 1;
11         var rowData = [];
12         var Curr_Date = new Date();
13         rowData[0] = Curr_Date; // Date in column A
14         var Curr_Time = Utilities.formatDate(Curr_Date, "GMT+3", 'HH:mm:ss');
15         rowData[1] = Curr_Time; // Time in column B
16         for (var param in e.parameter) {
17             Logger.log('In for loop, param=' + param);
18             var value = stripQuotes(e.parameter[param]);
19             Logger.log(param + ':' + e.parameter[param]);
20             switch (param) {
21                 case 'lux':
22                     rowData[2] = value; // Lux in column C
23                     result = 'Lux Written on column C';
24                     break;
25                 case 'power':
26                     rowData[3] = value; // Power in column D
27                     result += ' ,Power Written on column D';
28                     break;
29                 case 'volt':
30                     rowData[4] = value; // Voltage in column E
31                     result += ' ,Voltage Written on column D';
32                     break;
33                 case 'current':
34                     rowData[5] = value; // Current in column F
35                     result += ' ,Current Written on column D';
36                     break;
37                 default:
38                     result = "unsupported parameter";
39             }
40         }
41         Logger.log(JSON.stringify(rowData));
42         var newRange = sheet.getRange(newRow, 1, 1, rowData.length);
43         newRange.setValues([rowData]);
44     }
}

```

Рисунок 3.14 – Скрипт обробки запитів від NodeMCU

Розглянемо детальніше елементи скрипта. Змінна `sheet_id` містить ідентифікатор таблиці в яку будуть автоматично вноситись дані моніторингу, цей ідентифікатор доступний в адресній стрічці браузера. `rowData[0] = Curr_Date`: це запис в нульовий стовпчик (стовпчик A) значення дати та часу для 3 часового поясу за Грінвічем (`var Curr_Time =`

Utilities.formatDate(Curr_Date, "GMT+3", 'HH:mm:ss')). Заповнення стовпців відбувається по відповідному параметрі в запиті і реалізується конструкцією switch-case (рис. 3.15).

```

Logger.log(param + ':' + e.parameter[param]);
switch (param) {
  case 'lux':
    rowData[2] = value; // Lux in column C
    result = 'Lux Written on column C';
    break;
  case 'power':
    rowData[3] = value; // Power in column D
    result += ' ,Power Written on column D';
    break;
  case 'volt':
    rowData[4] = value; // Voltage in column E
    result += ' ,Voltage Written on column D';
    break;
  case 'current':
    rowData[5] = value; // Current in column F
    result += ' ,Current Written on column D';
    break;
  default:
    result = "unsupported parameter";
}

```

Рисунок 3.14 – Конструкція switch-case скрипта для заповнення даних

Код скрипта управляє обробкою HTTP GET запитів у середовищі Google Apps Script. function doGet(e) : Початок оголошення функції doGet, яка відповідає за обробку HTTP GET запитів:

- Logger.log(JSON.stringify(e));: Записує у журнал (лог) параметри отриманого запиту у вигляді рядка JSON;
- var result = 'Ok';: ініціалізує змінну result значенням 'Ok', яке буде відправлене як відповідь на запит за замовчуванням;
- if (e.parameter == 'undefined') : перевіряє, чи відсутні параметри в запиті;

- `result = 'No Parameters';`: якщо відсутні параметри, змінна `result` приймає значення `'No Parameters'`;
- `var sheet_id = '1TIMguX4cWDzyU4l0c6V9ewtl71ky8AVkvJ7WnXsBRA';`: задає ідентифікатор Google Таблиці, де зберігатимуться дані;
- `var sheet = SpreadsheetApp.openById(sheet_id).getActiveSheet();`: відкриває Google Таблицю за заданим ідентифікатором і отримує посилання на її активний аркуш;
- `var newRow = sheet.getLastRow() + 1;`: знаходить порожній рядок для запису нових даних;
- `var rowData = [];`: створює масив для збереження даних, які будуть записані в Google Таблицю;
- `var Curr_Date = new Date();`: отримує поточну дату та час;
- `rowData[0] = Curr_Date;`: записує поточну дату в першу колонку;
- `var Curr_Time = Utilities.formatDate(Curr_Date, "GMT+3", 'HH:mm:ss');`: форматує поточний час у вказаний формат;
- `rowData[1] = Curr_Time;`: Записує поточний час у другу колонку.
- `for (var param in e.parameter) {`: перебирає параметри, передані у запиті;
- `var value = stripQuotes(e.parameter[param]);`: видаляє лапки зі значення параметра;
- `switch (param) {`: Перевіряє параметр та визначає колонку для запису значення;
- `Logger.log(JSON.stringify(rowData));`: Записує масив даних у журнал (лог) у вигляді рядка JSON.
- `var newRange = sheet.getRange(newRow, 1, 1, rowData.length);`: Отримує діапазон для запису даних у Google Таблицю.
- `newRange.setValues([rowData]);`: Записує дані у вказаний діапазон у Google Таблиці.

- `return ContentService.createTextOutput(result);`: повертає результат обробки запиту у вигляді текстового виводу;
- `function stripQuotes(value) {`: початок оголошення функції `stripQuotes`, яка видаляє лапки зі значень;
- `return value.replace();`: повертає значення з видаленими лапками з початку та кінця рядка.

Для введення в дію скрипта у вигляді веб-додатку необхідно перейти у відповідне меню. Після його активації отримуємо ідентифікатор розгортки (рис. 3.15).

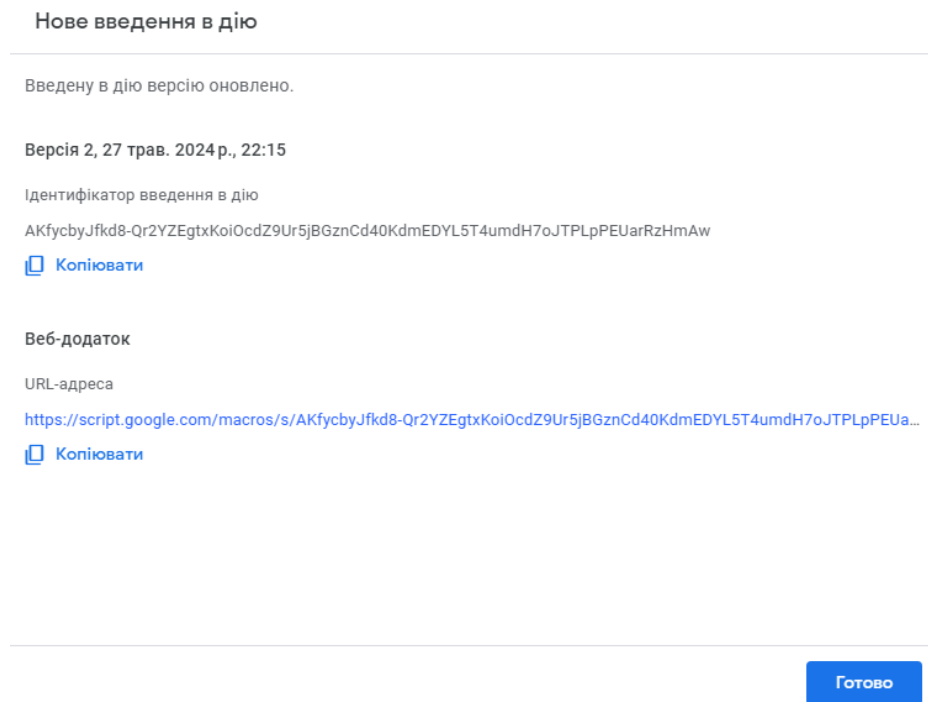


Рисунок 3.15 - Отримання посилання веб-додатку для збору даних

Аналогічний підхід реалізовано для збору даних про параметри навколишнього середовища, які впливають на генерацію, це освітлення та температура, вимірювання проводились всередині приміщення таблиця вимірянних значень приведена на рис. 3.16.

Графіки зміни освітленості та температури на протязі 5-денного періоду спостережень зображено на рис. 3.16. Маючи ці значення можна прогнозувати можливості генерування енергії фотоелектричними модулями.

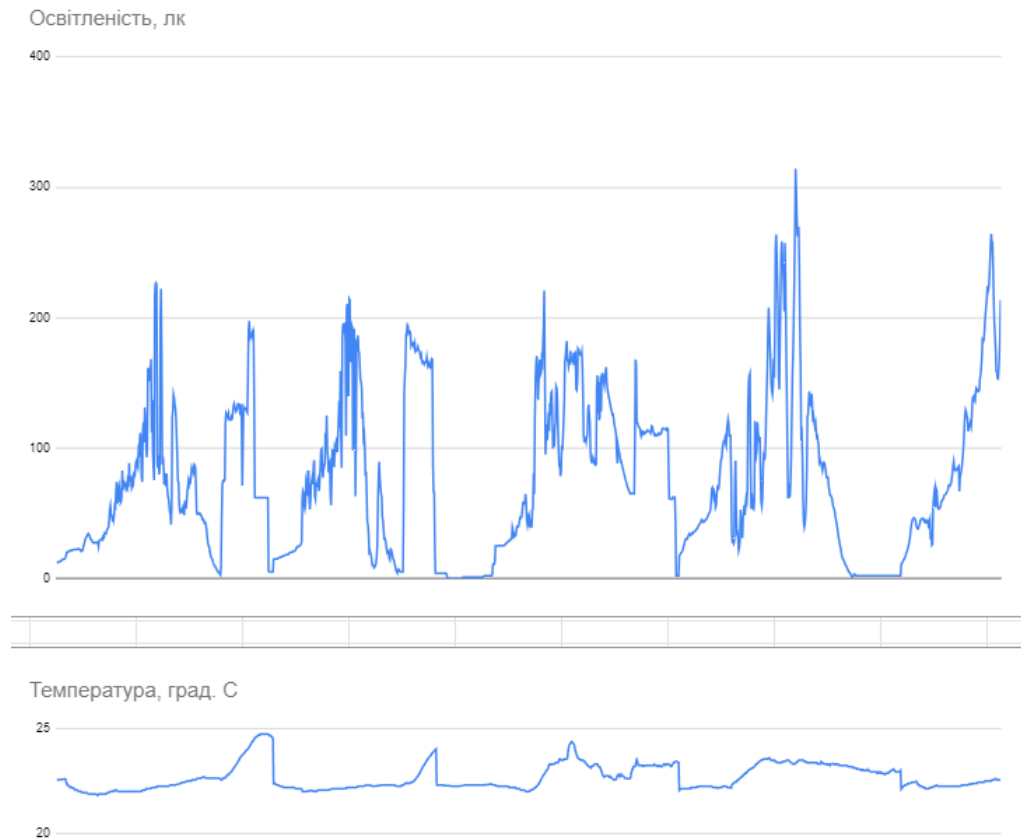


Рисунок 3.16 – Графіки зміни освітленості та температури на протязі 5-денного періоду спостережень

3.5 Висновки по розділу 3

В даному розділі було розроблено інформаційну систему для аналізу генерації електроенергії фотоелектричними модулями та сонячної інсоляції. Вибрано апаратне забезпечення: контролер, енергометр, сенсор освітлення. Використовуючи розширення Apps Script в Google Sheets розгорнуто веб-додаток, який опрацьовує http-запити що періодично генеруються контролером NodeMCU і містять результати вимірювань сенсорів які характеризують функціонування фотоелектричного модуля. Для обробки запитів створено відповідний js-скрипт, який формує структуровану таблицю даних.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІОТ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

4.1 Експериментальне дослідження ІоТ системи оцінки ефективності функціонування фотоелектричних панелей

Схема ІоТ пристрою, побудованого із вибраних елементів, зображена на рис. 4.1. Для практичної реалізації обраний одноканальний енергометр INA219 Живлення пристрою здійснюється від джерела постійної напруги 5В, через USB конектор. Напруга фотоелектричної панелі підключається до виводів Source Terminal а навантаження до виводів Load Terminal.

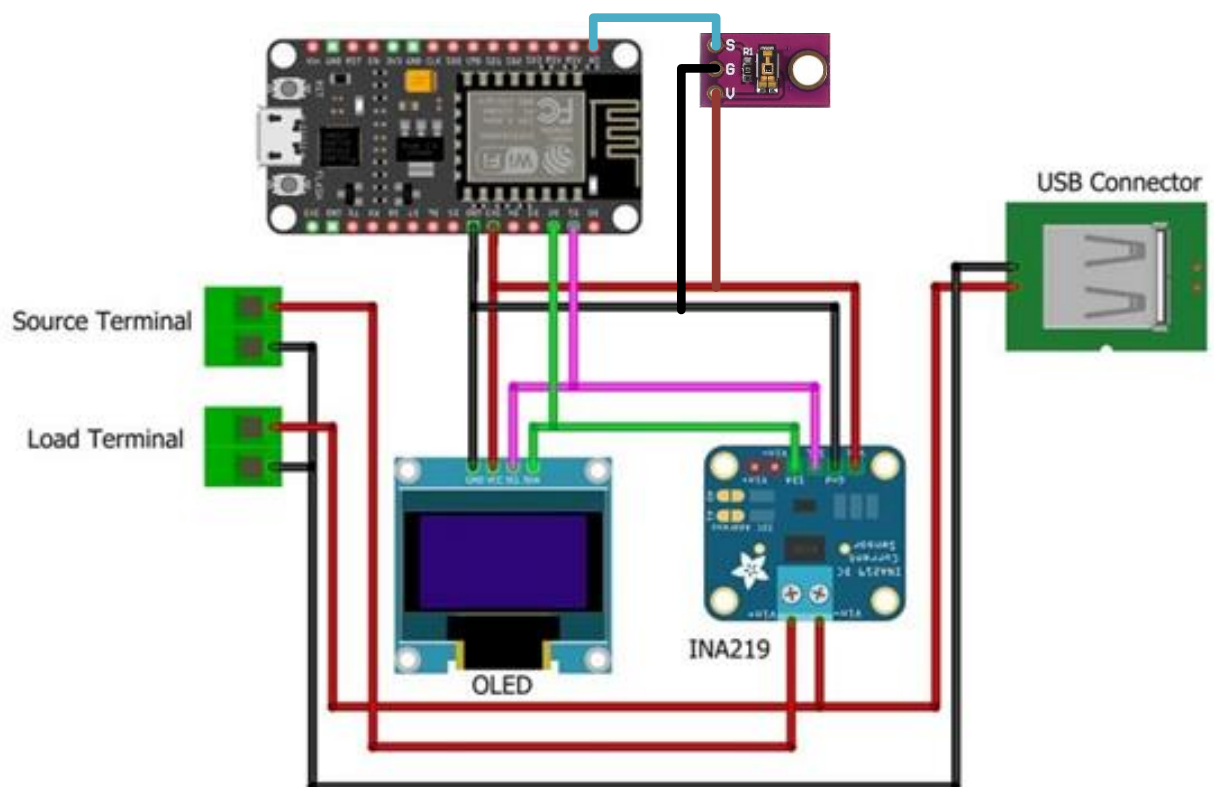


Рисунок 4.1 – Схема ІоТ пристрою для аналізу генерації електроенергії фотоелектричними модулями

Зібраний макет пристрою оцінки ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями зображено на рисунку 4.2. Усі електронні компоненти розміщуються на макетній платі швидкого без пайкового монтажу, відповідні з'єднання зроблені провідниками, в якості джерела електроенергії в даному макеті виступає живлення від USB кабелю через відповідний пін на платі. В якості навантаження слугують два послідовно ввімкнені світлодіоди

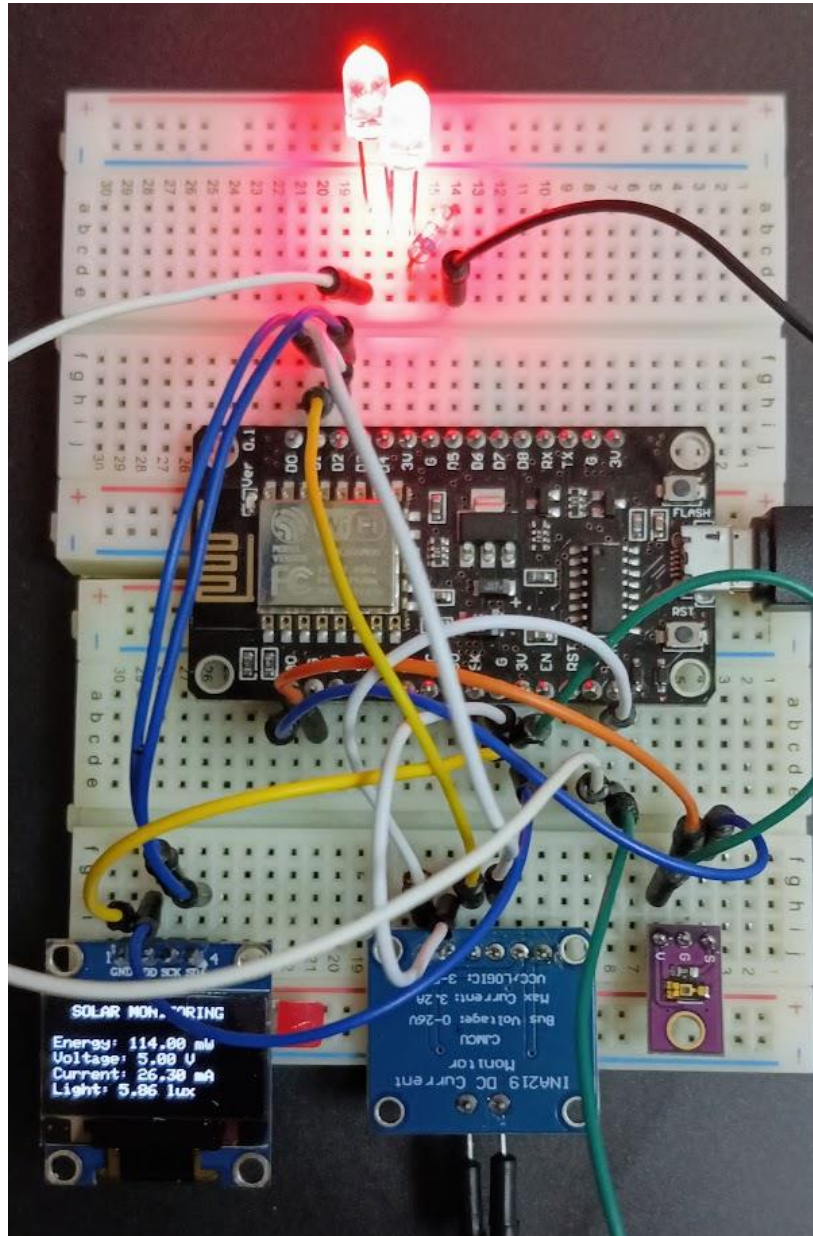


Рисунок 4.2 – Схема IoT пристрою для аналізу генерації електроенергії фотоелектричними модулями зібрана на макетній платі

Поточні дані також виводяться на монохромний OLED дисплей SSD1306 (рис. 4.3) а саме: рівень генерованої потужності, напруга на виході панелі, струм що протікає через фотоелектричні модулі, а також рівень освітленості в люксах.

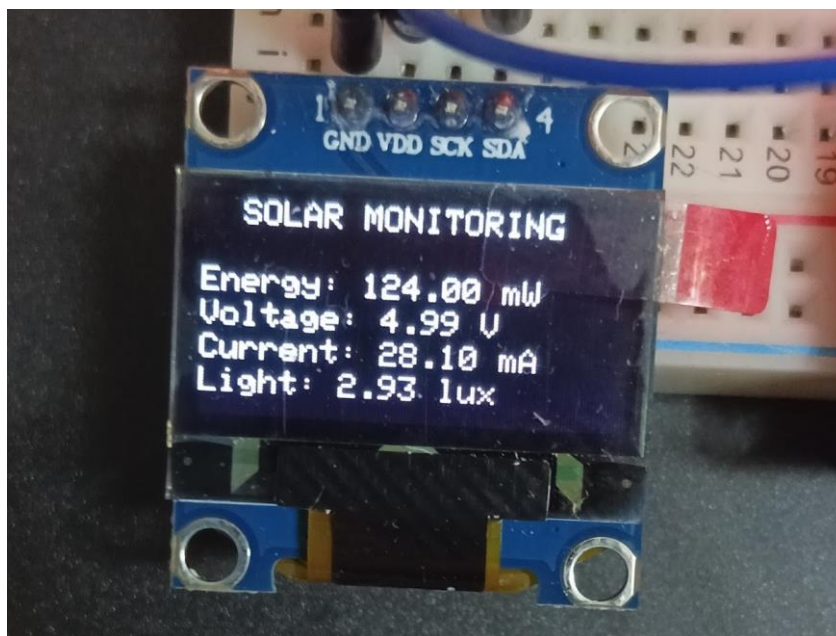


Рисунок 4.3 – Вигляд даних на дисплеї SSD1306

Для проведення тестового експерименту було вибрано місце на підвіконні однієї з аудиторій кафедри САІТ де пристрій здійснював збір даних протягом 8 годин. В результаті з періодичністю 40 секунд дані відправлялись на сторінку Google Sheets. На основі одержаних даних побудовано графік (рис. 4.4). зміни освітленості в часі, з якого видно, що освітлення протягом часу спостереження має значні нерівномірності зумовлені зміною сонячної активності, після 18.00 сонце вже не освітлює підвіконня і рівень освітленості різко спадає.

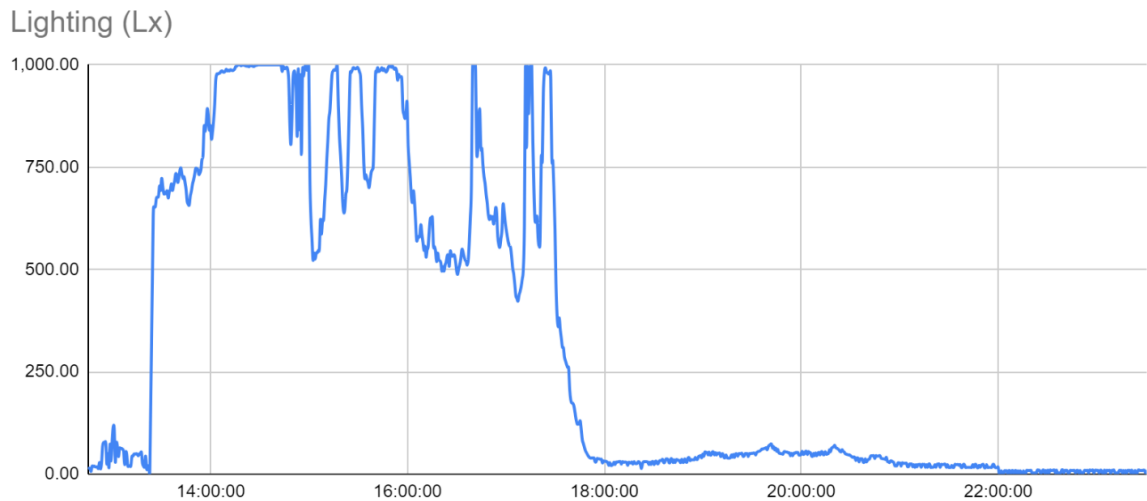


Рисунок 4.4 – Графік освітленості одержаний в тестовому режимі

Після 22.00 освітленість, а отже і інсоляція падають практично до нульового рівня. На рис. 4.5-4.7 зображено графік зміни струму, напруги та потужності в часі, як видно з графіків ці величини мають практично постійне значення (28 мА, 5 В, 124 мВт), що зумовлено постійним електричним навантаженням в ролі якого виступають два світлодіоди. Отже можна зробити висновок, що пропонована система працює стабільно, без помилкових спрацювань.



Рисунок 4.5 – Графік струму одержаний в тестовому режимі

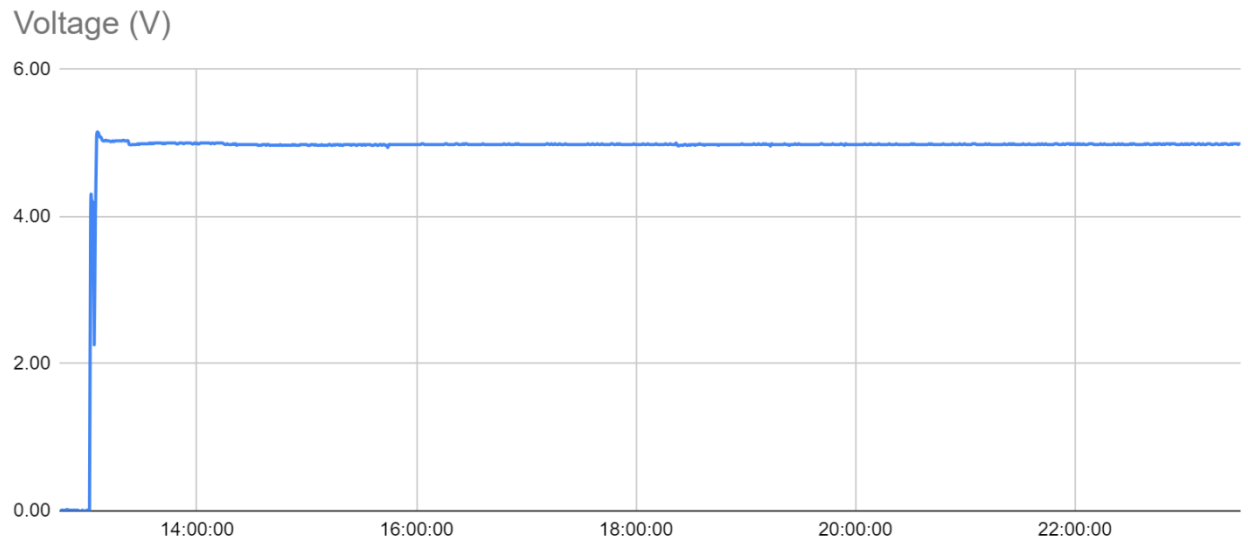


Рисунок 4.6 – Графік напруги одержаний в тестовому режимі

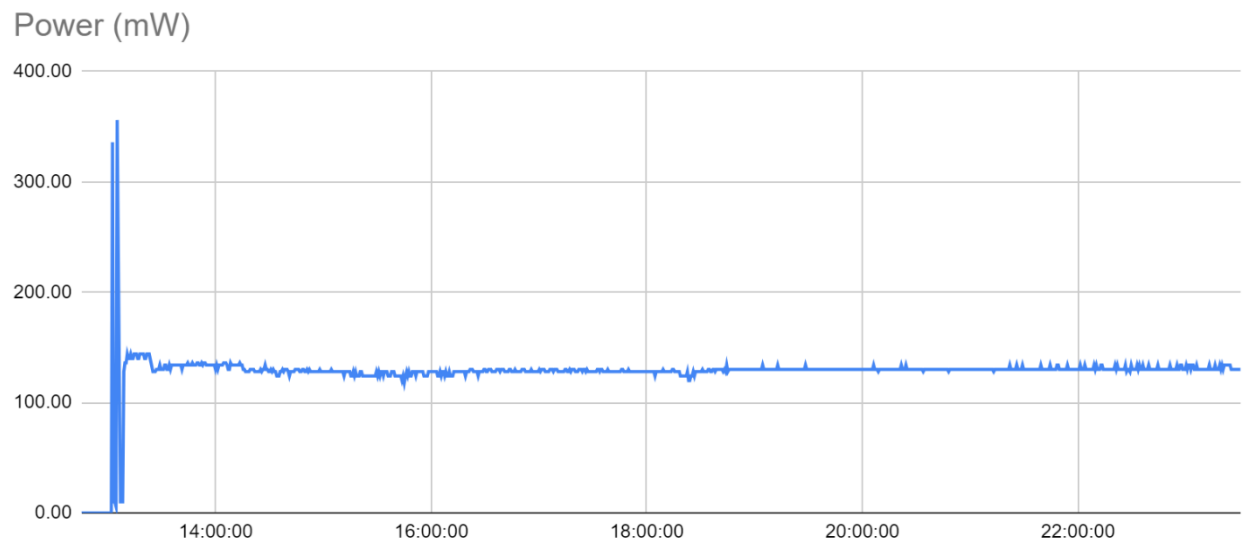


Рисунок 4.7 – Графік потужності одержаний в тестовому режимі

4.2 Висновки по розділу 4

В даному розділі було здійснено практичну реалізацію системи оцінки ефективності функціонування фотоелектричних панелей. Зібраний на макетній платі пристрій протестовано в реальних умовах потенційного місця встановлення фотоелектричного модуля. Результати тестів засвідчили, що пропонована система працює стабільно періодично надсилаючи дані в Google Sheets, де їх можна аналізувати використовуючи доступні інструменти, або імпортувати дані для їх подальшої обробки та аналізу в інших сервісах і середовищах.

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи проведено аналіз предметної області, представлено суть проблеми та доведена актуальність питання впровадження IoT-систем для визначення параметрів інсоляції та генерування енергії фотоелектричними модулями з метою оцінки ефективності їх роботи. Збільшення ефективності досягається визначенням місця встановлення панелей де забезпечується найбільший коефіцієнт використання .

В роботі проведено аналіз проблематики предметної області, а саме проблеми побудови IoT систем оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів інфраструктури. Розглянуто особливості функціонування сонячної енергетики, зокрема відзначено важливість аналізу генерування енергії в залежності від умов зовнішнього середовища, та розміщення фотоелектричних модулів. Основні функції системи: збір даних з відповідних сенсорів в цифровому вигляді, накопичення даних за значний період часу, первинна обробка даних моніторингу, аналіз та прогнозування вироблення енергії.

В другому розділі було здійснено опис та обґрунтування факторів, які впливають на генерування електроенергії, фотоелектричними модулями з прив'язкою до географічних умов України. Розроблено концепцію IoT системи оцінювання ефективності функціонування фотоелектричних модулів з розробкою відповідних структурних схем. Дана система забезпечує як локальний так і віддалений збір даних.

В третьому розділі було розроблено інформаційну систему для аналізу генерації електроенергії фотоелектричними модулями. Вибрано апаратне забезпечення: контролер, енергометр, сенсор освітлення. Використовуючи розширення Apps Script в Google Sheets розгорнуто веб-додаток, який опрацьовує http-запити що періодично генеруються контролером NodeMCU і

містять результати вимірювань сенсорів які характеризують функціонування фотоелектричного модуля. Для обробки запитів створено відповідний js-скрипт, який формує структуровану таблицю даних.

В четвертому розділі було здійснено практичну реалізацію системи оцінки ефективності функціонування фотоелектричних панелей. Зібраний на макетній платі пристрій протестовано в реальних умовах потенційного місця встановлення фотоелектричного модуля. Результати тестів засвідчили, що пропонована система працює стабільно періодична надсилаючи дані в Google Sheets, де їх можна аналізувати використовуючи доступні інструменти, або імпортувати дані для їх подальшої обробки та аналізу в інших сервісах і середовищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Energy Production and Consumption URL: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.
2. Share of wind and solar in electricity production URL: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html>
3. S. Kucuksari, A.M. Khaleghi, M. Hamidi, Y. Zhang, F. Szidarovszky, G. Bayraksan, Y.J. Son, *An Integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments*, Appl. Energy. (2014) 1601–1613. doi:10.1016/j.apenergy.2013.09.002.
4. Rouholamini A. *Optimal tilt angle determination of photovoltaic panels and comparing of their mathematical model predictions to experimental data in Kerman* /A. Rouholamini, H. Pourgharibshahi, R. Fadaeinedjad, G Moschopoulos // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2013 . 1-4. - 10.1109/CCECE.2013.6567674. URL: https://www.researchgate.net/publication/261283189_Optimal_tilt_angle_determination_of_photovoltaic_panels_and_comparing_of_their_mathematical_model_predictions_to_experimental_data_in_Kerman
5. 7 найпопулярніших програм для проектування та моделювання сонячної фотоелектричної системи URL: <https://ua.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34952960.html>
6. A.Z. Hafez, A. Soliman, K.A. El-Metwally, I.M. Ismail, *Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review*, Renew. Sustain. Energy Rev. 77 (2017) 147–168. doi:10.1016/j.rser.2017.03.131.
7. M. Benghanem, *Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia*, Appl. Energy. 88 (2011) 1427–1433. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.001.

8. D. Solyali and A. Mollaei, *A Simulation Model Based on Experimental Data to Determine the Optimal Tilt Angle for a Fixed Photovoltaic Panel*, AAES, pp. 1–11, Jul. 2023.
9. Dekkiche, M., Tahri, T., & Denai, M. (2023). Techno-economic comparative study of grid-connected PV/reformer/FC hybrid systems with distinct solar tracking systems, *Energy Conversion and Management: X*, 18, 100360.
10. A. Al-Mohamad, *Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system*, *Appl. Energy*. 79 (2004) 345–354. doi:10.1016/j.apenergy.2003.12.004.
11. S. Yilmaz, H.R. Ozcalik, S. Kesler, F. Dincer, B. Yelmen, The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation - A case study in Kahramanmaraş, Turkey, *Sustain. Energy Rev.* 52 (2015) 1015–1024. doi:10.1016/j.rser.2015.07.146.
12. Mustafa E. Başoğlu, Abdulvehhap Kazdaloğlu, Tarık Erfidan, Mehmet Z. Bilgin, Bekir Çakır, *Performance analyzes of different photovoltaic module technologies under limit, Kocaeli climatic conditions*, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52 (2015) 357–365. doi:10.1016/j.rser.2015.07.108.
13. Встановлена потужність домашніх сонячних електростанцій URL: <https://map.ua-energy.org/uk/dashboards/>
14. Розподілена генерація електроенергії: що це та чому слід її розвивати в Україні? URL: https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/233288.html.
15. Опис Kripter Rock System - фасадне кріплення URL: https://solartechnology.com.ua/shop/view/181-krepleniya_solnechnyh_panelej_na_steny_doma___kripter_rock_system
16. Bhau, G. V., Deshmukh, R. G., Chowdhury, S., Sesharao, Y., & Abilmazhinov, Y. (2023). *IoT based solar energy monitoring system. Materials today: proceedings*, 3697-3701. URL: https://www.researchgate.net/publication/353521372_IoT_based_solar_energy_monitoring_system

17. Almarzooqi, N. K., Ahmad, F. F., Hamid, A. K., Ghenai, C., Farag, M. M., & Salameh, T. (2023). *Experimental investigation of the effect of optical filters on the performance of the solar photovoltaic system*. Energy Reports, 9, 336-344 URL: https://www.researchgate.net/publication/366944097_Experimental_investigation_of_the_effect_of_optical_filters_on_the_performance_of_the_solar_photovoltaic_system
18. Сонячна енергетика України URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_енергетика_України
19. Інсоляція: вплив на виробництво електроенергії сонячними панелями URL: <https://www.solargarden.com.ua/insolyatsiya-vplyv-na-vyrobnytstvo-elektroenergiyi-sonyachnomy-panelyamy/>
20. Технічні параметри сонячної панелі MAXPOWER CS6U-345P URL: https://d3g1qce46u5dao.cloudfront.net/data_sheet/canadian_solar_datasheet_maxpower_cs6u_p_high_efficiency_v5_571_au.pdf
21. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]