

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/01>**Бешлей П.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ¹

У роботі досліджено існуючу систему віддаленого моніторингу та управління SmartESS, що використовується в автономних сонячних електростанціях. Виявлено обмеження системи, зокрема неефективне управління енергоспоживанням через ручне втручання, обмежену адаптацію до змін погодних умов, недостатню інтеграцію з системами "розумного будинку" та відсутність динамічного реагування на коливання виробництва сонячної енергії. Одним із основних недоліків усіх сучасних систем моніторингу сонячної енергії є їх нездатність вимірювати та ресструвати сонячну енергію, яка не використовується безпосередньо для живлення пристроїв або зарядки акумуляторів, особливо в умовах відсутності навантаження. Через цей недолік, системи моніторингу можуть недооцінювати загальну кількість енергії, яку можуть виробляти сонячні панелі. Це може вплинути на планування та ефективність використання сонячної енергії. Для вирішення цих недоліків запропоновано та реалізовано метод адаптивного управління навантаженням у гібридних електромережах з використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії. Метод базується на використанні сенсора освітленості біля сонячних панелей, що дозволило визначити модель кореляції між рівнем освітленості і потужністю генерації сонячної енергії. У системі Smart Life створені сценарії управління навантаженням, які використовують кореляційну модель для автоматичного реагування на зміну інтенсивності світла та вироблення сонячної енергії. Система працює таким чином, що коли відбуваються зміни в інтенсивності світла, вона автоматично робить прогнози щодо майбутнього вироблення сонячної енергії. На основі цих прогнозів розробляються різні сценарії управління навантаженням. Однією з ключових особливостей цієї системи є використання розумних розеток для управління електроприладами. Зокрема розумні розетки визначають рівень енергоспоживання підключених до них пристроїв та можуть автоматично вмикати або вимикати прилади в залежності від доступності для їх живлення сонячної енергії. Наприклад, якщо виробляється багато сонячної енергії, система може включити деякі прилади, а коли енергії мало – вимкнути їх автоматично. У практичному застосуванні розроблений метод дозволив автоматично та ефективно використовувати сонячну енергію для потреб домогосподарства, адаптуючись до змін погодних умов у реальному часі без потреби ручного втручання.

Ключові слова: Інтернет речей, гібридні електромережі, система SmartESS, система Smart life, розумні пристрої, сонячна енергія.

Постановка проблеми. Зростання світового енергоспоживання посилює навантаження на традиційні енергетичні джерела та природні ресурси, акцентуючи увагу на необхідності енергетичної трансформації [1]. Використання цифрових технологій у поєднанні з відновлюваною енергетикою відкриває шлях до створення інноваційних,

ефективних та екологічно чистих енергосистем [2]. Однією з ключових аспектів застосування цифрових технологій є використання систем віддаленого моніторингу та управління гібридними електромережами з сонячною генерацією, які працюють на «зеленій» енергії [3]. Серед недоліків існуючих систем моніторингу варто відзначити неефективне управління енергоспоживанням через залежність від ручного втручання, недостатню адаптацію до змін погодних умов, обмежену інтеграцію з системами "розумного будинку" та відсутність динаміч-

¹ Робота виконана за підтримки українського проекту № 0123U101692 «Стратегічні напрямки, методи та засоби цифровізації та інтелектуалізації енергетичних систем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій»

ного реагування на коливання виробництва сонячної енергії [4–6]. Ці виклики вимагають розробки сучасних систем моніторингу та управління, які включають в себе технології Інтернету речей (IoT) для автоматизації та адаптації процесу управління навантаженням на основі аналізу реальних даних щодо доступності сонячної енергії, що дозволить оптимізувати використання енергії та підвищити загальну ефективність системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженнях, представлених у роботах [7–10], системи енергомоніторингу на базі IoT виявляють значний потенціал для збору та аналізу даних про енергоспоживання в режимі реального часу. Вони використовують передові технології, такі як розумні лічильники та сенсори, розташовані в будівлях, для надання детальної інформації про споживання енергії. Передові методи аналітики, такі як машинне навчання та інтелектуальний аналіз даних, обробляють ці дані для виявлення закономірностей, аномалій та можливостей для оптимізації енергоспоживання. Ці системи відкривають широкі можливості для оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності енергетичних мереж. Проте, одним із важливих викликів у використанні таких систем є точність прогнозування генерації сонячної енергії. Це стає складним завданням через потребу враховувати різноманітні параметри, такі як розташування сонячних станцій, їхні технічні характеристики, індивідуальні потреби споживачів у енергії та змінні погодні умови. Для досягнення точних прогнозів, необхідно навчати моделі, які вимагають велику кількість даних та обчислювальних ресурсів. Крім того, такі моделі можуть бути чутливими до змін в параметрах та умовах, що може знизити їхню надійність.

Автори роботи [11] пропонують систему управління енергоспоживанням, яка оптимізує використання сонячних панелей та електромережі для зменшення витрат на електроенергію. Система автоматично перемикається між джерелами енергії для максимальної ефективності та економії коштів. Недоліком пропонованої системи є відсутність урахування змін кількості генерованої сонячної енергії в залежності від погодних умов та відсутність автоматичної адаптації навантаження для максимізації використання сонячної енергії у реальному часі.

У роботі [12] досліджено застосування IoT для моніторингу та розподілу енергії гібридної сонячної електростанції. Для цього використовуються різні IoT-пристрої, такі як серводвигуни, світлозалежні резистори, Arduino та контролер МРРТ, щоб оптимізувати збір сонячної енергії. Додатково використовується датчик температури для аналізу впливу погодних умов на роботу системи. Всі дані, такі як температура, вологість, напруга та струм,

відображаються в реальному часі на сервері Thing Speak, що дозволяє користувачам відстежувати щоденне використання сонячної енергії та її ефективність. Важливо зауважити, що цей проект є прототипом, і реальний розподіл енергії не був виконаний, але планується використовувати IoT для контролю за навантаженням у майбутньому. Недоліком пропонованої системи моніторингу та управління є обмеженість щодо урахування тільки температури зовнішнього середовища, що стає недостатнім для точного визначення обсягу генерації сонячної енергії, оскільки інші важливі фактори, такі як хмарність і освітленість, не враховуються належним чином.

Метою роботи є покращення функціональності існуючих систем моніторингу та управління в гібридних електромережах шляхом інтеграції IoT-орієнтованої системи Smart Life та розробки методу адаптивного управління навантаженням та ефективного використання сонячної енергії.

Виклад основного матеріалу. Сучасні досягнення у галузі сонячної енергетики стрімко розвиваються, і однією з передових інновацій на ринку є гібридна сонячна станція. Ця технологія виявляється надзвичайно ефективною і ідеальною для використання у приватних домогосподарствах. Гібридна сонячна електростанція представляє собою оптимальний компроміс між автономними і мережевими сонячними електростанціями, забезпечуючи стабільний доступ до електроенергії і здатність працювати автономно в разі відключення мережі. У роботі досліджується власна сонячна електростанція, що складається з п'яти панелей Longi LR5-72НТН, кожна з яких має потужність 580 Вт, загалом надаючи 2900 Вт потужності. Установка доповнена гібридним інвертором Altek Atlas потужністю 3,6 кВт-24В, а також парою 12-вольтових гелевих батарей об'ємом 100 ампер кожна, які з'єднані послідовно.

Для спрощення управління системою, в інверторі вбудований модуль збору даних з Wi-Fi підтримкою, що дозволяє віддалено і неперервно контролювати продуктивність системи, виконувати діагностику компонентів, змінювати робочі налаштування і надавати моніторингові дані. Доступ до реєстратора даних і з'єднання з ним здійснюються через маршрутизатор KuWfi PRO POE 4G LTE [11–13].

Розгортання автономної сонячної системи відкриває нові можливості для домогосподарств, але успішне використання її потенціалу залежить від розуміння та ефективного використання цієї технології. Перший крок – це глибокий аналіз своїх енергетичних звичок, включаючи моніторинг щоденного споживання електроенергії. Ще однією важливою складовою є оптимізація використання побутових приладів, з метою максимально ефективного використання сонячної енергії, зокрема,

запуск приладів із високим енергоспоживанням під час пікової сонячної активності. Це покращує ефективність використання сонячної енергії та зменшує залежність від традиційних джерел електроенергії. Крім цього, необхідно уважно стежити за зарядкою та розрядкою акумулятора, щоб уникнути його передчасного зносу. Останнім, але не менш важливим етапом є використання програмованих функцій автономних сонячних систем.

Це дозволяє налаштувати систему на оптимальні режими роботи, які відповідають вашому розпорядку дня та потребам в енергії.

Отже, розглянемо процес моніторингу та управління автономною сонячною електростанцією за допомогою використання відомої системи моніторингу та управління виробника SmartESS для інвертора Altek, встановленої на мобільному додатку (рис. 2).

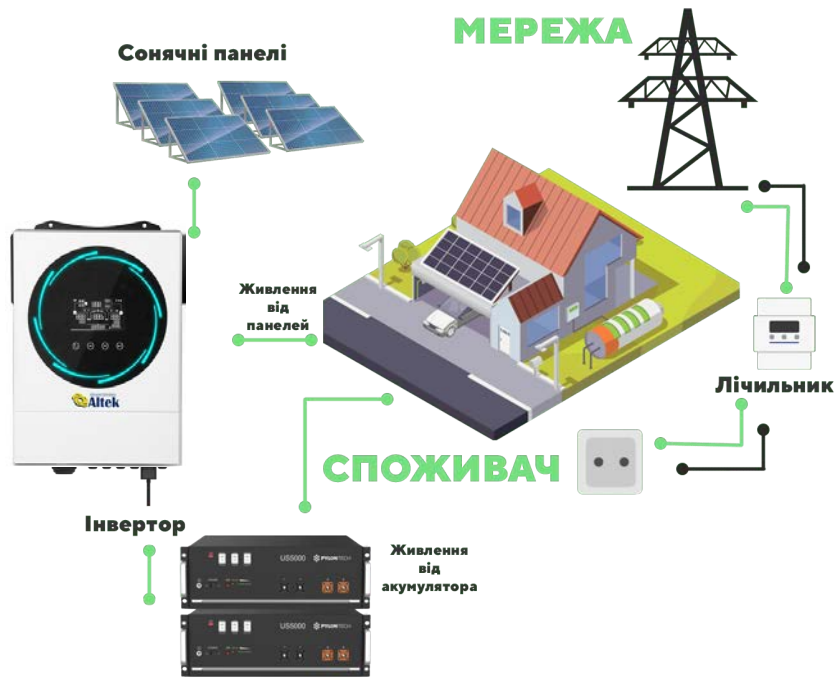


Рис. 1. Структурна схема досліджуваної системи гібридної сонячної електростанції

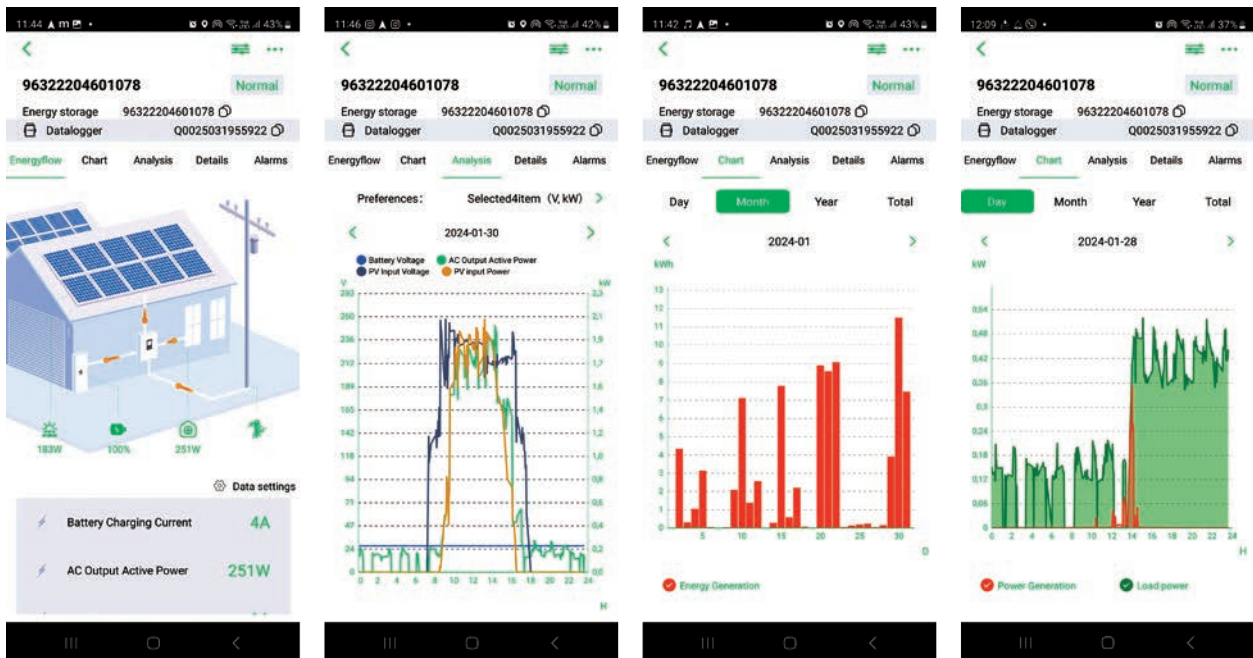


Рис. 2. Структурна схема досліджуваної системи гібридної сонячної електростанції

На рис. 2а показано інтерфейс мобільного додатка для моніторингу сонячної енергетичної системи. У верхній частині екрану вказано серійний номер системи та статус «Нормально», що свідчить про те, що система функціонує. Далі є вкладки для навігації між розділами інтерфейсу, такі як «Накопичувач енергії», «Реєстратор даних», «Графік», «Аналіз», «Деталі» та «Тривоги». У центрі екрана відображено анімацію будинку з сонячними панелями на даху, яка візуалізує потоки енергії. Індикатори на анімації показують поточну вихідну потужність сонячних панелей, рівень заряду акумуляторної батареї та споживану потужність. Нижче розташовані кнопки та інші елементи управління інтерфейсом.

На рис. 2б подано комплексний графік, який відображає динаміку чотирьох параметрів протягом доби. Ці параметри включають напругу акумуляторної батареї, напругу від сонячних панелей, потужність споживання домогосподарства та потужність генерації від сонячних панелей. Графік дозволяє спостерігати за їхньою динамікою протягом доби.

На рис. 2в представлений інтерфейс для вибору періоду моніторингу, такого як «День», «Місяць», «Рік» та «Всього», з можливістю перегляду даних за попередні або наступні періоди. У нижній частині графіка розташовані налаштування та іконки для додаткових функцій.

На рис. 2г наведено дані моніторингу генерації та споживання енергії за день 2024-01-28. Графік показує генерацію електроенергії зеленим кольором та споживану потужність червоним кольором. З графіка можна зрозуміти, що о 14:00 годині генерація електроенергії від сонячних панелей досягла 400 кВт, що забезпечує можливість використання енергії для підігріву через керамічну батарею. Однак через похмуру погоду рівень генерації сонячної енергії значно зменшився, і, відповідно, додаткова енергія постачається зі стандартної мережі, що є менш ефективним рішенням.

Вибір джерела енергії та способу їх взаємодії має велике значення для ефективності роботи сонячної системи. Існує три основні режими роботи інвертора рис. 3а.

Режим Utility Solar Bat (USB) – лише електромережа забезпечує електроенергією ваш будинок. Сонячна енергія та акумулятори будуть використовуватися тільки в тому випадку, якщо електромережа недоступна.

Режим Solar Utility Bat (SUB) – сонячна батарея забезпечує живлення навантажень в першу чергу, якщо сонячної енергії недостатньо для живлення

навантажень, енергія від мережі дозаряджається. Акумулятори використовуються лише тоді, коли сонячної енергії недостатньо і немає доступу до електромережі.

Режим Solar Bat Utility (SBU) – сонячна енергія забезпечує живлення ваших навантажень в першу чергу, якщо сонячної енергії недостатньо, для одночасного живлення навантажень буде використовуватися акумуляторна батарея. Електромережа використовується лише тоді, коли акумулятор розряджається до низької напруги.

В управлінні сонячними станціями вибір пріоритетного джерела зарядного пристрою є важливим для оптимізації використання сонячної енергії. Загалом є 3 режими (рис. 3б).

Режим CSO – сонячна енергія заряджає акумулятор. Електромережа використовується лише за відсутності сонячної енергії.

Режим SNU – сонячна енергія та електроенергія заряджають акумулятор одночасно.

Режим OSO – для заряджання акумулятора використовується лише сонячна енергія.

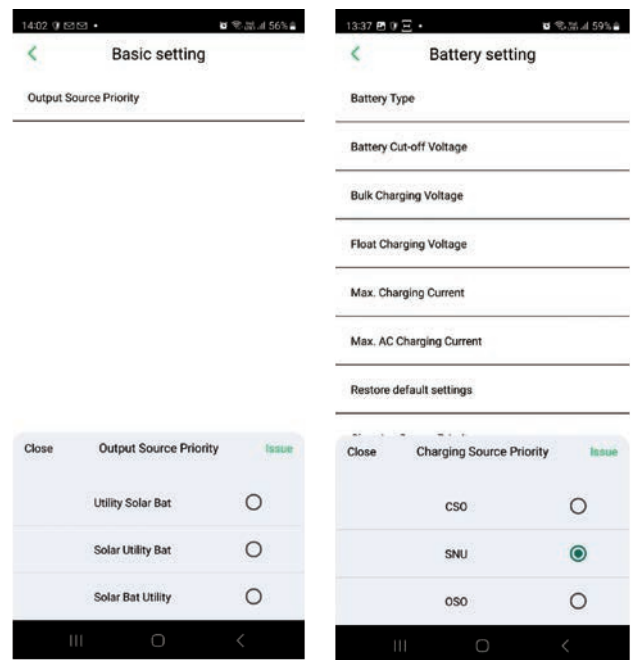


Рис. 3. Управління режимами функціонування гібридної сонячної електростанції за допомогою системи SmartESS

З описаного вище випливає, що режим USB не підходить, адже він не використовує сонячну енергію та не сприяє економії коштів. Також не має сенсу налаштовувати режим заряду SNU, оскільки він використовує електроенергію для заряду акумулятора, навіть коли є доступна сонячна енергія. Отже, основним питанням є визначення частоти

заряджання батареї, яка найбільше відповідає вашим потребам і дозволяє ефективно використовувати сонячну енергію.

Якщо ви хочете зберегти акумулятор на випадок скидання навантаження і максимізувати термін її служби, то найбільш доцільними є режими SUB і CSO. Сонячна енергія буде використовуватися тоді, коли вона доступна, а загальна електромережа поповнюватиме її запас за необхідності, наприклад, якщо хмара насунеться на панелі або сонце почне сідати. Акумулятор заряджатиметься від сонця, але в разі розряду вночі, його заряджатиме комунальна електромережа.

Якщо головною метою є максимізація використання сонячної енергії, включаючи її використання вночі, то налаштування SBU та OSO може бути оптимальним варіантом. У цьому режимі сонячна енергія буде використовуватися для заряджання акумуляторної батареї, і система буде автоматично використовувати її, коли це потрібно, щоб забезпечити стабільну подачу енергії. Акумуляторна батарея буде використовуватися вночі до досягнення певного рівня розряду (зазвичай 50% ємності), після чого вона буде лише на резервний запас для використання в разі пікового навантаження або поганих погодних умов. Цей підхід ефективний, але може бути ризикованим у випадку тривалих хмарних днів або інтенсивних опадів, коли сонячна генерація обмежена.

Третім варіантом є збалансований підхід, який ураховує ризик втрати ефективності через недостачу сонячної енергії та забезпечує її максимальне використання. Це налаштування включає в себе використання SUB та OSO. В такому режимі сонячна енергія буде споживатися для живлення ваших пристроїв, а акумуляторна батарея буде заряджатися лише за потреби. При цьому, акумулятор також буде заряджатися від сонячної енергії, якщо це можливо. Коли настає ніч та сонячні панелі припиняють генерувати енергію, інвертор автоматично переходить на живлення від електромережі. На цей момент батарея буде близькою до повного заряду, за винятком випадків довготривалих похмурих днів. З більш консервативним підходом, можна використовувати CSO для зарядки акумулятора, коли сонячна енергія недоступна, що забезпечить повний заряд акумуляторної батареї перед ніччю.

У процесі дослідження системи моніторингу виявлено декілька недоліків. Зокрема, через крок моніторингу у 5 хвилин, система не може реєструвати короткотривалі піки споживання електроенергії, такі як раптове включення потужного

електричного обладнання (наприклад, насоса для закачування води). Якщо система моніторингу сонячної енергії не фіксує короткочасні піки споживання, це може призвести до неправильного управління переходом на акумуляторне живлення, особливо в ситуаціях, коли насуваються хмари і зменшується вироблення сонячної енергії. Як наслідок, акумулятори можуть перевантажуватися, використовуючись частіше або інтенсивніше, ніж це необхідно. Це може призвести до глибокого розряду акумуляторів, що негативно впливає на їхній термін служби та загальну ефективність системи, оскільки постійний глибокий розряд може знизити їхню здатність зберігати заряд і скорочувати тривалість їхнього експлуатаційного циклу.

Одним із основних недоліків усіх сучасних систем моніторингу сонячної енергії є їх нездатність вимірювати та реєструвати сонячну енергію, яка не використовується безпосередньо для живлення пристроїв або зарядки акумуляторів, особливо в умовах відсутності навантаження. Через цей недолік, системи моніторингу можуть недооцінювати загальну кількість енергії, яку можуть виробляти сонячні панелі. Це може вплинути на планування та ефективність використання сонячної енергії.

Іншим важливим недоліком є відсутність механізму автоматичного керування навантаженням побутових пристроїв у Smart ESS, що призводить до збільшення споживання енергії та витрат, особливо у періоди нестабільного виробництва сонячної енергії. Це підкреслює необхідність розробки більш гнучких та інтелектуальних систем управління енергоспоживанням, які б могли інтегруватися з розумними пристроями дому IoT для автоматизації та оптимізації використання енергоресурсів в режимі реального часу.

З цієї причини пропонується рішення, яке полягає у використанні відомої системи Smart Life для управління розумним будинком [17], що використовує технологію IoT. Ця система охоплює широкий спектр розумних пристроїв, включаючи системи освітлення, опалення та охолодження, розумні розетки, камери безпеки, датчики та інші побутові прилади, якими можна легко керувати через єдиний інтерфейс. Завдяки використанню безпроводних технологій та IoT пристроїв, Smart Life дозволяє об'єднати ці пристрої в єдину екосистему. Користувачі можуть дистанційно керувати цими пристроями через мобільний додаток, налаштовувати автоматичні сценарії для підвищення комфорту, енергоефективності та безпеки.

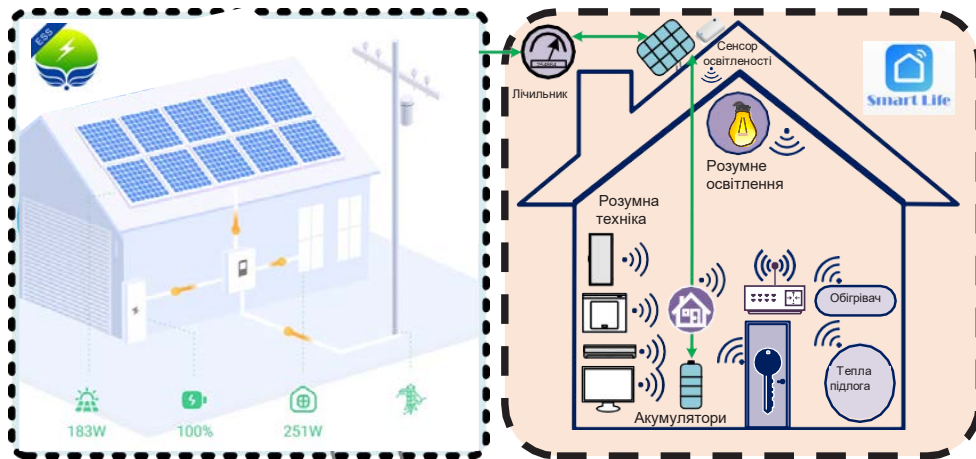


Рис. 4. Схема адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах

Можна налаштувати розумні сценарії: при зміні погодних умов (температура, вологість, погода, схід/захід сонця, швидкість вітру), при зміні місцезнаходження (вихід з локації, вхід в локацію), таймер (налаштування увімкнення/вимкнення за часом та днями тижня), при зміні стану пристрою (наприклад, при виявленні руху датчиком, увімкнення одного або декількох пристроїв в системі).

У роботі запропоновано схему на рис. 4, що відображає синергію між системами Smart Life та Smart ESS, призначену для покращення використання сонячної енергії. Для реалізації запропонованої схеми розроблено метод адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах. Цей метод використовує сенсор освітленості для оптимізації використання сонячної енергії в реальному часі. Система автоматично регулює навантаження шляхом включення та вимкнення розумних пристроїв в залежності від рівня освітленості і вимог споживачів, забезпечуючи оптимальне використання доступної сонячної енергії. Цей підхід дозволяє зменшити витрати на електроенергію і сприяє створенню більш стабільних і ефективних гібридних електромереж.

Розглянемо детально принцип роботи запропонованого методу адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій для ефективного використання сонячної енергії в гібридних електромережах. На рис. 5 показано інтерфейс мобільного застосунку Smart Life, який демонструє список IoT-пристроїв, підключених до розумного будинку. У списку представлені різні пристрої, якими можна віддалено керувати через додаток,

такі як датчик газу, система теплої підлоги, керамічні обігрівачі, датчик освітленості, розумні продовжувачі, а також розумні розетки та чайник.

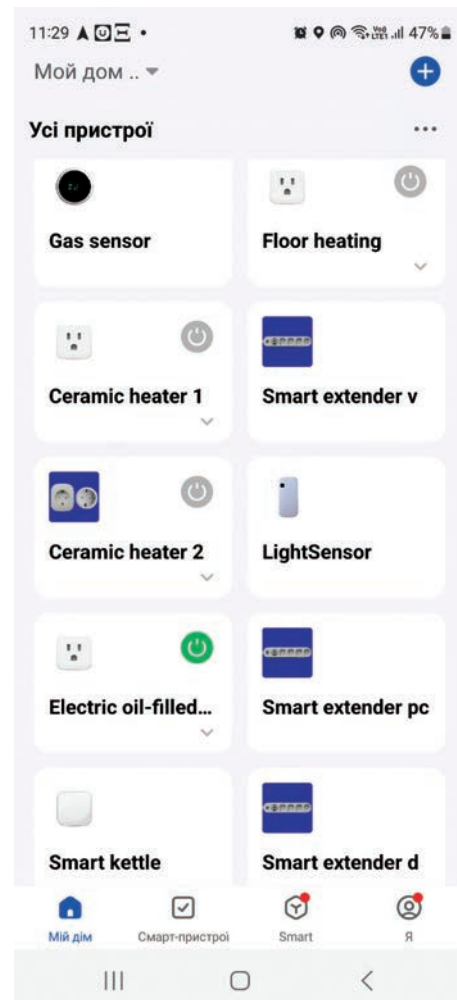


Рис. 5. Інтерфейс мобільного додатку Smart Life для віддаленого управління розумними IoT пристроями

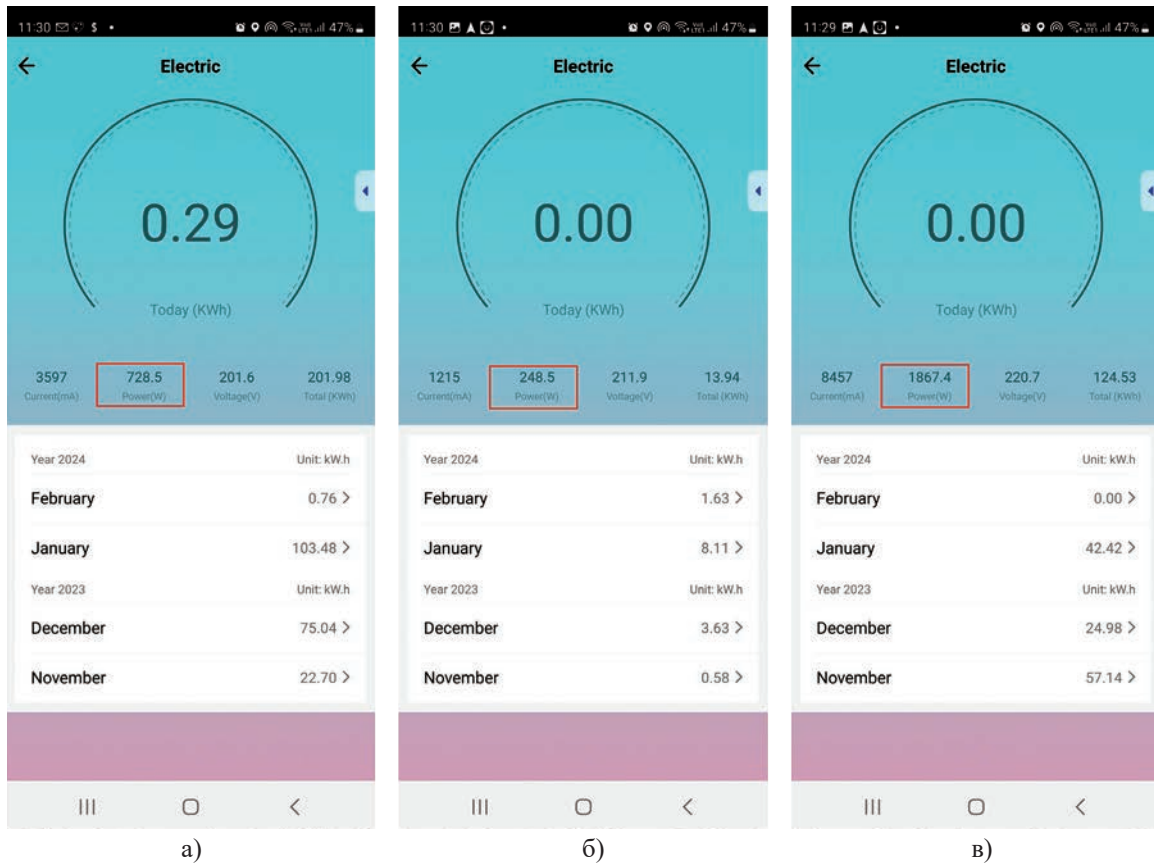


Рис. 6. Енергоспоживання пристроїв

На першому етапі методу використовувались розумні розетки з функцією енергомоніторингу для вимірювання потужності, яку споживають побутові пристрої. Завдяки цьому виявлено, що система теплої підлоги споживає 728 Вт (рис. 6а), керамічний обігрівач споживає 248 Вт (рис. 6б), а електричний масляний обігрівач – 1876 Вт (рис. 6в). На другому етапі методу було встановлено Wi-Fi сенсор освітленості біля сонячних панелей, що забезпечило можливість точного відстеження рівня освітленості в реальному часі з інтервалом вимірювань щосекунди, деталі чого представлено на рис. 7 (інтервал вимірювання кожної секунди рис. 7а, та протягом доби рис. 7б). Важливо забезпечити синхронізацію часу між записами даних з датчиків освітленості та системи моніторингу SmartESS виробленої сонячної енергії, щоб дані відповідали один одному за часом.

Для аналізу було використано зібрані дані, у ході чого були порівняні рівні освітленості та відповідні показники виробленої енергії. Застосування статистичних методів та візуалізація даних допомогли детально проаналізувати та виявити зв'язок між цими параметрами, надаючи цінну інформацію для ефективного використання сонячної енергії. На основі аналізу, розроблено

графічну модель, яка може точно прогнозувати вироблення енергії на основі виміряного рівня освітленості (рис. 8).

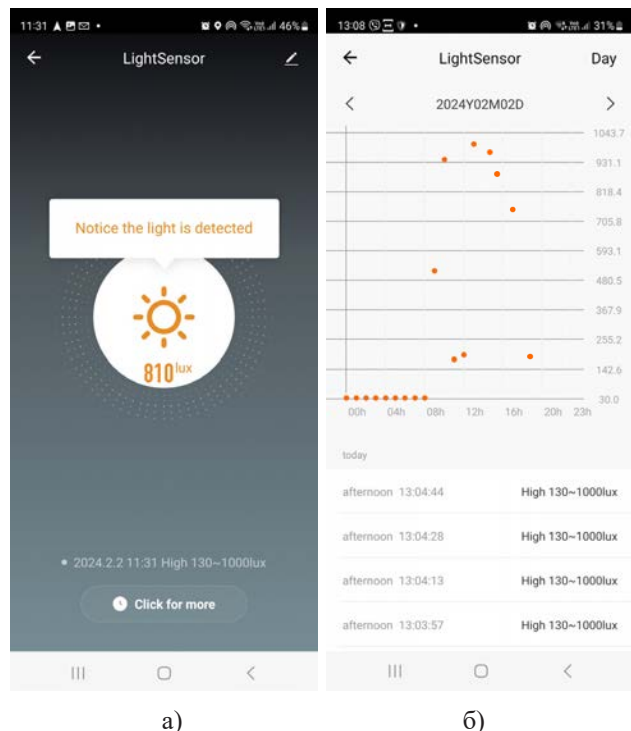


Рис. 7. Моніторинг рівня освітленості

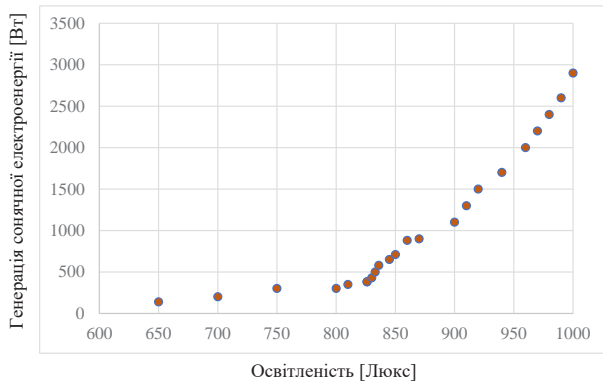


Рис. 8. Залежність генерації сонячної енергії від рівня освітленості

У наступному етапі методу, використовуючи систему Smart Life, яка об'єднує розумні розетки та інші IoT-пристрої, було розроблено автоматизований сценарій для вмикання та вимикання побутових приладів залежно від наявності сонячної енергії. Це підвищило ефективність та зручність у порівнянні з традиційними системами, що вимагають ручного управління. Основою для цього сценарію став датчик освітленості, який вимірює рівень світла в люксах. Це дало змогу точно оцінити кількість згенерованої сонячної енергії за певного числового значення в люксах.

Зокрема коли освітленість досягає рівня, достатнього для генерації необхідної кількості енергії для цих пристроїв (більше 750 люкс для керамічного підігрівача та більше 900 люкс для підігріву теплої підлоги), то створено сценарій автоматичного включення. Якщо датчик освітленості фіксує низький рівень світла (менше 750 люкс та менше 900 люкс), активується сценарій вимкнення певних

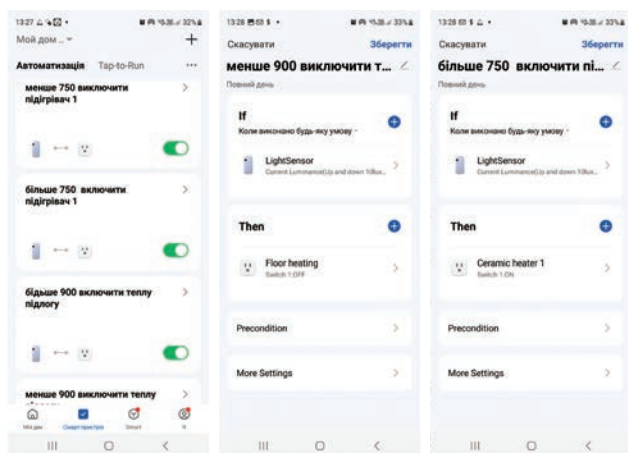


Рис. 9. Сценарій вмикання та вимикання теплої підлоги та керамічного обігрівача в залежності від рівня освітленості в системі Smart life

приладів, таких як система теплої підлоги, щоб скоротити споживання енергії у відповідь на зменшення генерації сонячної енергії (рис. 9).

Ефективність реалізації запропонованого методу адаптивного управління навантаженням із використанням IoT-технологій показано на рис. 10.

Рис. 10а відображає ситуацію без впровадження методу адаптивного управління навантаженням, де споживання енергії не зменшується у відповідь на зниження генерації сонячної енергії через похмурість. Тобто автоматичне вимкнення підігріву підлоги та керамічної батареї не відбулося. Це призвело до необхідності використання загальної електромережі та відповідно додаткових енергетичних витрат.

На рис. 10б та рис. 10в представлено дні, коли був використаний метод адаптивного управління навантаженням з використанням вище запропонованих сценаріїв автоматизації включенням IoT пристроїв. Коли вироблення сонячної енергії (червона крива) зменшується через похмурість, споживання енергії (зелена крива) автоматично знижується, що свідчить про адаптацію системи до змін в освітленості. Тобто відбувається автоматичне вимкнення/включення підігріву підлоги та керамічної батареї в залежності від освітленості. Це дозволяє забезпечити максимальне використання сонячної енергії та зниження навантаження на електромережу, що веде до економії витрат.

Ефективність використання сонячної енергії візуально відображається через перекриття червоної кривої (генерація сонячної енергії) над зеленою (споживання енергії). Чим більша площа під червоною кривою покриває зелену криву, тим ефективніше система використовує сонячну енергію. Водночас, будь-яка частина зеленої кривої, що виходить за межі червоної, вказує на використання додаткової енергії з загальної електромережі, що призводить до збільшення витрат.

Таким чином, на рис. 10б та рис. 10в, де застосовувався метод адаптивного управління навантаженням, візуально видно, що зелена крива рідше виходить за межі червоної, що свідчить про зменшення споживання енергії з мережі та зниження витрат у періоди зниженої генерації сонячної енергії. Це підкреслює переваги запропонованого методу, який дозволяє не лише зменшити витрати, а й покращити ефективність використання сонячної енергії.

Висновки. У роботі досліджено систему моніторингу та управління SmartESS, яка використовується в гібридних сонячних електростанціях. Визначено її функціональні можливості та сформовано рекомендації для ефективного управління.

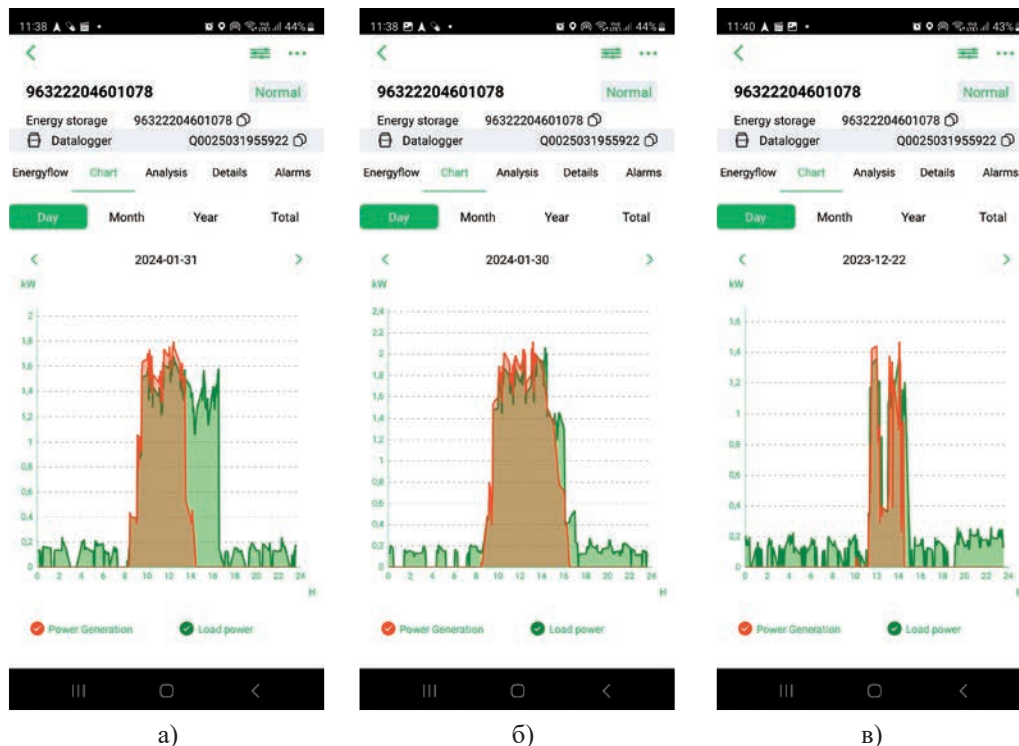


Рис. 10. Оцінка ефективності розробленого методу адаптивного управління навантаженням в гібридних електромережах

Виявлено недоліки існуючих систем віддаленого моніторингу та управління, які обмежують їх адаптацію до погодних умов та інтеграцію з системами «розумного будинку» для автоматичного керування навантаженням побутових пристроїв. У роботі використано систему управління розумним будинком Smart Life як рішення для покращення енергоменеджменту. Розроблено і реалізовано метод адаптивного управління навантаженням, який базується на застосуванні

IoT-технологій для оптимізації використання сонячної енергії в гібридних електромережах. Завдяки використанню сенсорів освітленості, система здатна динамічно регулювати навантаження, автоматично управляючи розумними пристроями в залежності від поточних умов світла та енергетичних потреб. Такий підхід дозволяє системам ефективно використовувати сонячну енергію в умовах змінної освітленості, зменшуючи залежність від електромережі.

Список літератури:

1. Joseph A., Balachandra P. Smart Grid to Energy Internet: A Systematic Review of Transitioning Electricity Systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 215787–215805. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3041031>.
2. Kabeyi M. J. B., Olanrewaju O. A. Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: a review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 685–758. URL: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>
3. Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review / Z. Chen et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 4. P. 2118. URL: <https://doi.org/10.3390/s23042118>
4. Ali M. I. IoT based smart solar PV monitoring system; A Cost Effective and reliable solution. *Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 8–14. URL: <https://doi.org/10.30537/sjcms.v6i2.1160>
5. V. K. V and Sasikala G. Arduino based smart solar photovoltaic remote monitoring system. *Malaysian Journal of Science*. 2022. Vol. 41, no. 3. P. 58–62. URL: <https://doi.org/10.22452/mjs.vol41no3.8>
6. Solar PV systems design and monitoring / M. Aghaei et al. *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. 2020. P. 117–145. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819610-6.00005-3>
7. Minoli D., Sohrawy K., Occhiogrosso B. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 269–283. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2647881>

8. IoT-Enabled Smart Solar Energy Management System for Enhancing Smart Grid Power Quality and Reliability / M. T. Shahed et al. *SN Computer Science*. 2023. Vol. 4, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02298-8>
9. A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management / L. Yu et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, no. 15. P. 12046–12063. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3078462>
10. Elsaraiti M., Merabet A. Solar Power Forecasting Using Deep Learning Techniques. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 31692–31698. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3160484>
11. Energy Management and Analysis for Smart Homes Using IoT / S. Oswal et al. *2019 5th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*, Pune, India, 19–21 September 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iccubea47591.2019.9128496>
12. An IoT Based Application for Monitoring Smart Grid Assimilating Tracking System / F. T. Zohora Saima et al. *2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, Arad, Romania, 20–22 May 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/globconet53749.2022.9872330>

Beshley P.I. METHOD OF ADAPTIVE LOAD CONTROL USING IOT TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT USE OF SOLAR ENERGY IN HYBRID POWER GRIDS

The paper examines the existing SmartESS remote monitoring and control system used in standalone solar power stations. Limitations of the system were identified, including inefficient energy management due to manual intervention, limited adaptation to changing weather conditions, insufficient integration with smart home systems, and lack of dynamic response to fluctuations in solar energy production. One of the main shortcomings of all current solar energy monitoring systems is their inability to measure and record solar energy that is not used directly for powering devices or charging batteries, especially in the absence of a load. Due to this shortcoming, monitoring systems can underestimate the total amount of energy that solar panels can produce. This can affect the planning and efficiency of solar energy use. To address these shortcomings, a method of adaptive load management in hybrid electric grids using IoT technologies for efficient use of solar energy has been proposed and implemented. The method is based on the use of a light sensor near the solar panels, which allowed determining the correlation model between the level of illumination and the power generation of solar energy. In the Smart Life system, load management scenarios have been created that use the correlation model for automatic response to changes in light intensity and solar energy production. The system operates in such a way that when changes in light intensity occur, it automatically makes forecasts about future solar energy production. Based on these forecasts, various load management scenarios are developed. One of the key features of this system is the use of smart sockets to control electrical appliances. In particular, smart sockets determine the level of energy consumption of the devices connected to them and can automatically turn on or off devices depending on the availability of solar energy for their power supply. For example, if a lot of solar energy is produced, the system can turn on some devices, and when there is little energy – turn them off automatically. In practical application, the developed method allowed to automatically and efficiently use solar energy for household needs, adapting to changes in weather conditions in real-time without the need for manual intervention.

Key words: *Internet of Things, hybrid power grids, smartESS system, smart life system, smart devices, solar energy.*