

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.4.29>

**Євгеній ЧИЧИКАЛО**

аспірант кафедри інформаційних технологій,  
Сумський державний університет, [y.chychykalo@itp.sumdu.edu.ua](mailto:y.chychykalo@itp.sumdu.edu.ua)  
ORCID: 0009-0009-5368-4657

**Віра ШЕНДРИК**

кандидат технічних наук, доцент,  
професор кафедри інформаційних технологій,  
Сумський державний університет, [v.shendryk@cs.sumdu.edu.ua](mailto:v.shendryk@cs.sumdu.edu.ua)  
ORCID: 0000-0001-8325-3115

**ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ МОНІТОРИНГУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ  
ДЛЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА**

**Анотація.** Метою роботи є розробка програмного модуля виміру ємності акумуляторних батарей з моніторингом через локальний інтерфейс та хмарний сервіс для подальшої інтеграції у проактивну систему з цифровим двійником для керування розподілом енергії у мережах з альтернативними джерелами енергії.

**Методологія.** Було проведено аналіз сучасних тенденцій у сфері енергетики, актуальних технологій для віддаленого доступу до пристроїв завдяки огляду наукової літератури по суміжній тематиці, доступних програмних продуктів зі схожими функціональними можливостями. На їх основі були сформувані вимоги для розробки програмного модуля у вигляді UML діаграм варіантів використання та послідовності. Аналіз доступних апаратних засобів для реалізації системи моніторингу дозволив обрати необхідну модель датчику для вимірів і мікроконтролера, які задовольняють потреби обчислювальної потужності для периферійних обчислень та необхідних інтерфейсів підключення. Ітераційна модель розробки використовувалася у ході програмної реалізації та надавала доповнення функціональних можливостей на кожному етапі. А сама програмна частина базується на функціонально-орієнтованому підході до програмування з використанням архітектури із розмежуванням відповідальності, адже програмний модуль поєднує у собі три частини, що відповідають за збір та обробку даних, локальний веб-інтерфейс, хмарну інтеграцію з IoT сервісом Blynk.

**Результати.** Проведено огляд сучасних підходів розроблення систем моніторингу та їх інтеграції у IoT-інфраструктуру. Зроблено моделювання варіантів використання програмного модуля та моделювання доступних дій акторів шляхом розробки UML діаграм. Програмний модуль написаний мовою програмування C та сумісний з ESP32 та іншими подібними мікроконтролерами на базі Arduino. Реалізовано алгоритми обчислення, та мінімізації помилок для розрахунків основних показників системи. Спроектовано дизайн локальної веб-сторінки та шаблон інтерфейсу у IoT додатку Blynk. Кожен з цих екранів відображає актуальні показники стану акумулятора, хмарна інтеграція з Blynk реалізує архівування значень та їх перегляд у вигляді графіків. Протестовано роботу програмного модуля з системою резервного живлення для приватного будинку протягом двох місяців.

**Наукова новизна** роботи полягає у тому, що розроблений програмний модуль у своїй основі використовує такі архітектурні рішення, які надають гнучкість налаштування для інтеграції в системи прийняття рішень з цифровим двійником у якості джерела даних використання, чи накопичення енергії у акумуляторних батареях.

**Висновок.** У роботі показано розробку програмного модуля для локального та віддаленого моніторингу користувачем стану акумуляторної батареї, що дозволить забезпечити систему підтримки прийняття рішень даними для аналізу стану подібної системи та прийняття автоматичних дій на їх основі.

**Ключові слова:** програмний модуль, гібридна енергетична мікромережа, моніторинг, периферійне обчислення, відновлювальні джерела енергії.

**Yevhenii CHYCHUKALO, Vira SHENDRYK. SOFTWARE MODULE FOR BATTERY MONITORING FOR A DECISION-SUPPORT SYSTEM USING A DIGITAL TWIN**

**Abstract.** The purpose of this work is the development of a software module for measuring battery capacity with monitoring via a local interface and a cloud service, for further integration into a proactive digital twin system for managing energy distribution in networks with renewable energy sources.

**Methodology.** An analysis of current trends in the energy sector and relevant technologies for remote device access was conducted through a review of scientific literature on related topics and available software products with similar functionalities. Based on this analysis, requirements for the development of the software module were formulated in the form of UML use case and sequence diagrams. The analysis of available hardware for implementing the monitoring system allowed the selection of the appropriate sensor model and microcontroller, which meet the computational power requirements for edge computing and the necessary connection interfaces. An iterative development model was used during the software implementation, providing

© Є. Чичикало, В. Шендрік, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

incremental enhancements of functional capabilities at each stage. The software part itself is based on a functionally oriented programming approach with a responsibility-separated architecture, as the software module combines three components responsible for data collection and processing, the local web interface, and cloud integration with the Blynk IoT service.

**The results.** A review of modern approaches to the development of monitoring systems and their integration into IoT infrastructure was conducted. Use case modeling of the software module and modeling of actors' possible actions was performed through the development of UML diagrams. The software module is written in the C programming language and is compatible with ESP32 and other similar Arduino-based microcontrollers. Algorithms for calculation and error minimization of the system's main indicators were implemented. The design of a local web page and an interface template in the Blynk IoT application was developed. Each of these screens displays the current battery status, and cloud integration with Blynk enables archiving of values and viewing them as charts. The software module was tested with a backup power system for a private house over a period of two months. The scientific novelty of the work is that the developed software module fundamentally uses architectural solutions that provide flexibility for integration into decision-support systems with a digital twin, as a data source for usage monitoring for energy stored in batteries.

**Conclusion.** The work demonstrates the development of a software module for local and remote user monitoring of battery status, which will provide a decision-support system with data for analyzing the condition of a similar system and for taking automated actions based on this data.

**Key words:** software module, hybrid energy microgrid, monitoring, edge computing, renewable energy sources.

**Вступ.** В останні роки екологічно чисті джерела енергії стають дедалі популярнішою темою для обговорення. Це пов'язано з тим, що потреби в енергії у світі постійно зростають, а це, в свою чергу, призводить до вичерпання доступних джерел енергії та завдає шкоди навколишньому середовищу. Більшість джерел енергії виробляють побічні продукти, такі як вуглекислий газ, діоксид сірки та оксиди азоту, які забруднюють певну частину навколишнього середовища, включаючи ґрунт, воду та повітря [4]. Деякі промислові процеси можна вдосконалити, щоб використовувати втрачену теплову енергію для виробництва електроенергії або опалення житлових районів [10]. Інший підхід включає використання вітрових турбін та сонячних фотоелектричних систем. Ці методи виробництва енергії можна застосовувати як у великих, так і в малих масштабах. Це також дозволяє створювати подібні системи для побутового використання.

Такі тенденції дозволяють розвивати децентралізовані системи виробництва енергії. Розподілені енергетичні системи взаємодіють з кількома джерелами енергії та називаються мультиенергетичними системами. Цей підхід має низку переваг щодо стабільності енергопостачання та уникання масштабних наслідків від несправностей [3]. З іншого боку, мультиенергетична система вимагає складного моделювання, яке вирішує проблеми поєднання різних джерел енергії з унікальними характеристиками. Це дуже важливо, оскільки слід потрібно підтримувати стабільний електричний баланс у короткі проміжки часу, та запобігати чи згладжувати можливі коливання напруги. Тому, якщо постачання деяких джерел енергії важко або неможливо передбачити, це може призвести до ситуації, коли попит на енергію перевищує пропозицію, що спричиняє дефіцит енергії [2].

З такими ж проблемами можна зіткнутися в системах виробництва альтернативної енергії побутового масштабу для активних споживачів. Такі споживачі генерують, зберігають та використовують власну енергію. Але якщо їх резервне сховище енергії повністю заряджене, надлишок енергії спрямовується до загальної електромережі. Це дозволяє їм повною мірою використовувати альтернативні джерела енергії та заощаджувати кошти на рахунках за електроенергію. І тут виникає завдання балансування локальної енергетичної системи. Вітрові турбіни або фотоелектричні установки повністю залежать від погодних умов, географічного розташування та пори року [9]. Щоб забезпечити безперебійне енергопостачання, потрібно мати можливість прогнозувати такі швидкозмінні змінні та контролювати розподіл енергії на основі цих прогнозів. У цьому випадку необхідно використовувати проактивні алгоритми керування з ймовірнісними моделями з інтеграцією цифрового двійника [6].

Проактивні алгоритми керування забезпечують стратегії керування, які здатні діяти заздалегідь до майбутньої ситуації, а не лише реагувати на поточні умови системи. Це означає, що розподіл енергії буде здійснюватися на основі прогнозу майбутнього стану системи. У випадку виробництва сонячної та вітрової енергії це буде прогноз погоди, який враховує сонячну активність та швидкість вітру. На даному етапі увага буде сфокусована на частині моніторингу, яка буде забезпечувати надходження даних до цифрового двійника для подальшого аналізу та прийняття рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для отримання розуміння важливості та варіантів використання засобів моніторингу у системах прийняття рішень та цифрових двійниках було проведено аналітичний огляд наукової літератури.

Трансформаційний потенціал технології цифрових двійників для вирішення проблем, пов'язаних з відновлюваними джерелами енергії, включаючи застосування сонячної енергії, представлено в роботі [5]. У цьому дослідженні показано, як технологія цифрових двійників може вирішувати критичні проблеми, включаючи оптимальне управління, невизначеність та непередбачуваність, вимоги до

обслуговування, проблеми безпеки та оптимізацію енергоефективності. Цифрові двійники дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу, перевірку стану та аналіз даних для оптимізації роботи системи відновлюваної енергії шляхом інтеграції IoT, штучного інтелекту та передових обчислювальних методів. Показано ключові застосування цифрових двійників систем з використанням відновлюваних джерел енергії та сонячної енергії, включаючи можливості прогнозування, аналіз надійності, підвищення безпеки та стійкості системи. Результати дослідження [5] показують, що технології цифрових двійників пропонують значні перспективи для забезпечення гнучкого та сталого управління енергією завдяки комплексному розумінню ресурсів у режимі реального часу та проактивному системному контролю.

У роботі [8] представлена модель прогнозування для точного короткострокового прогнозування навантаження в інтелектуальних мережах на основі сонячної енергії шляхом використання технології цифрових двійників для підвищення надійності даних. Представлено ймовірнісний підхід до кількісної оцінки невизначеності для максимізації моделювання інтервалів прогнозування в середовищах відновлюваної енергії. Ця методологія реалізує інноваційний метод оцінки нижньої верхньої межі, який навчається з використанням даних інтелектуальної мережі в режимі реального часу, зібраних за допомогою систем цифрових двійників, що усуває потенційні несправності інтелектуальних вимірювальних приладів в інфраструктурі мережі. Реалізація цифрового двійника дозволяє прогнозувати навантаження завдяки застосуванню алгоритмів машинного навчання для аналізу даних інтелектуальної мережі, створенню комплексних системних моделей, які прогнозують зміни навантаження на основі факторів навколишнього середовища, таких як погодні умови, періоди доби та сезонні зміни. [8].

Стаття [11] про проактивну оптимізацію енергії в житлових будинках з прогнозами погоди та ринку заглиблюється в системи управління енергією домогосподарств, які використовують як погодні, так і ринкові дані для планування роботи приладів, управління акумуляторами та контролю виробництва сонячної енергії. Завдяки застосуванню передових прогностичних моделей та алгоритмів оцінки, цей підхід покращує комфорт домогосподарств та економію енергії, одночасно зменшує обчислювальні вимоги. Ця стаття [11] також підкреслює важливість постійного покращення точності прогнозування та обчислювальної ефективності для роботи в режимі реального часу [11].

В іншому дослідженні [12] описано аналіз ефективності використання батарей у будинках, обладнаних сонячними панелями. Показано оцінку ефективності таких систем за різних тарифних умов на електроенергію, особливо в порівнянні фіксованої та часової політики використання. У дослідженні запропоновано дві унікальні стратегії керування зарядом батарей. Вони спрямовані на максимізацію ефективності та самозабезпечення [12].

В сільськогосподарському секторі дослідження [7] показує, як можна покращити продуктивність та стійкість сонячних теплиць за допомогою проактивних стратегій управління на основі відкритих метеорологічних даних та ідентифікації системи в режимі реального часу. Завдяки інтелектуальному керуванню вентиляцією та тепловим накопиченням система ефективно використовує сонячну енергію, мінімізує теплове навантаження на рослини та знижує споживання енергії під час холодів. Використовуючи генетичні алгоритми для оптимізації клімат-контролю, рішення пропонує вимірну економію енергії та розроблено для легкої інтеграції в масове сільськогосподарське використання через онлайн-платформу MACQU, використовуючи хмарні дані та підключення до IoT [7]. Ще одне дослідження [1] стосується зусиль щодо вирішення кліматичних проблем як однієї з найбільш вразливих, в якому розглядаються поточні фотоелектричні проекти, їхня здатність до самопідтримки та прогнози до 2030 року, з акцентом на систему підтримки рішень щодо оцінки виробництва сонячної енергії для сприяння стратегічному плануванню сектору [1].

Як можна побачити з огляду наукових публікацій кожна система прийняття рішень та цифрові двійники потребують моніторингу. У таких системах моніторинг є основним джерелом даних для аналізу та керування, тому розробка засобів для його реалізації є актуальною і потребує постійного вдосконалення точності й швидкості формування показників.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення програмного модулю для моніторингу ємності LiFePo<sub>4</sub> акумуляторної батареї як частини проактивної системи контролю розподілу енергії у системі з альтернативними джерелами енергії. Програмний модуль має розраховувати основні показники системи, мати веб-інтерфейс у локальній мережі користувача та передавати дані до IoT сервісу Blynk для візуального відображення стану системи з можливістю переглядати графіки основних показників за обраний відрізок часу. Програмний модуль має бути сумісним з ESP32 контролером для обробки даних та зв'язку з IoT сервісом.

**Виклад основного матеріалу.** Програмний модуль було розроблено мовою програмування C для сумісності з Arduino подібними мікроконтролерами, а саме ESP32, який має достатню продуктивність

та наявність необхідних інтерфейсів та протоколів підключення до мережі. Код додатку організовано у форматі функціонального програмування, де основні повторювані блоки логіки описані окремими функціями для уникнення нагромадження подібних частин алгоритму.

У ході підготовки до розробки додатку було виконано моделювання варіантів використання додатку з точки зору користувача сервісу Blynk. Діаграма варіантів використання показана на (рис. 1).

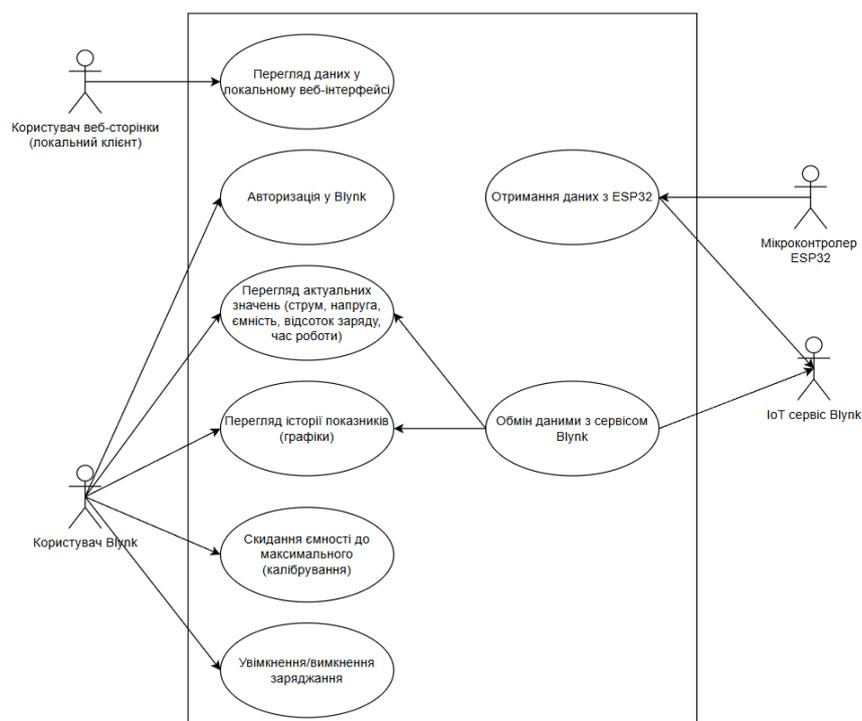


Рис. 1. Діаграма варіантів використання додатку

До акторів відносяться користувачі, які зареєстровані в сервісі Blynk та додані до організації, яка пов'язана з пристроєм-джерелом даних. Такий користувач має повний доступ до перегляду даних, графіків та має можливість керувати калібруванням та процесом заряджання акумуляторної батареї.

Варіанти використання:

- Авторизація – відповідає за реєстрацію та контроль доступу для користувачів;
- Отримання актуальних значень напруги, струму, часу автономної роботи системи чи процесу заряджання, відсоток заряду та ємність акумулятора – відповідає за відображення користувачу актуальних значень основних показників системи;
- Отримання історії показників напруги, струму у системі та ємності акумулятора – дозволяє користувачу детально переглядати стан системи у певних проміжках часу у вигляді графіків;
- Скидання значення ємності до максимальної – надає користувачу можливість провести калібрування системи розрахунку ємності акумулятора;
- Перемикач активації заряджання акумулятора зовнішнім пристроєм від мережі – дозволяє користувачу при необхідності вручну запустити процес заряджання акумулятора від мережі;

Діаграму послідовності дій користувача при роботі з програмним модулем показано на (рис. 2).

Для доступу до інтерфейсу відображення показників стану системи користувач має авторизуватися з використанням облікового запису сервісу Blynk. Далі необхідно обрати доданий до сервісу пристрій для відображення сторінки з детальними показниками, у вікні вибори пристрою відображаються три значення для зручності, а саме відсоток заряду акумулятора, напруга та струм.

У ході розробки додаток вмістив у собі три основні функціональні можливості:

- зв'язок з датчиком струму INA228 та обчислення значень струму, напруги та ємності.
- шаблон веб-сторінки локального інтерфейсу та реалізація веб-сокетів для підключення пристроїв у локальній мережі.
- реалізація авторизації та обміну даних з IoT сервісом Blynk.

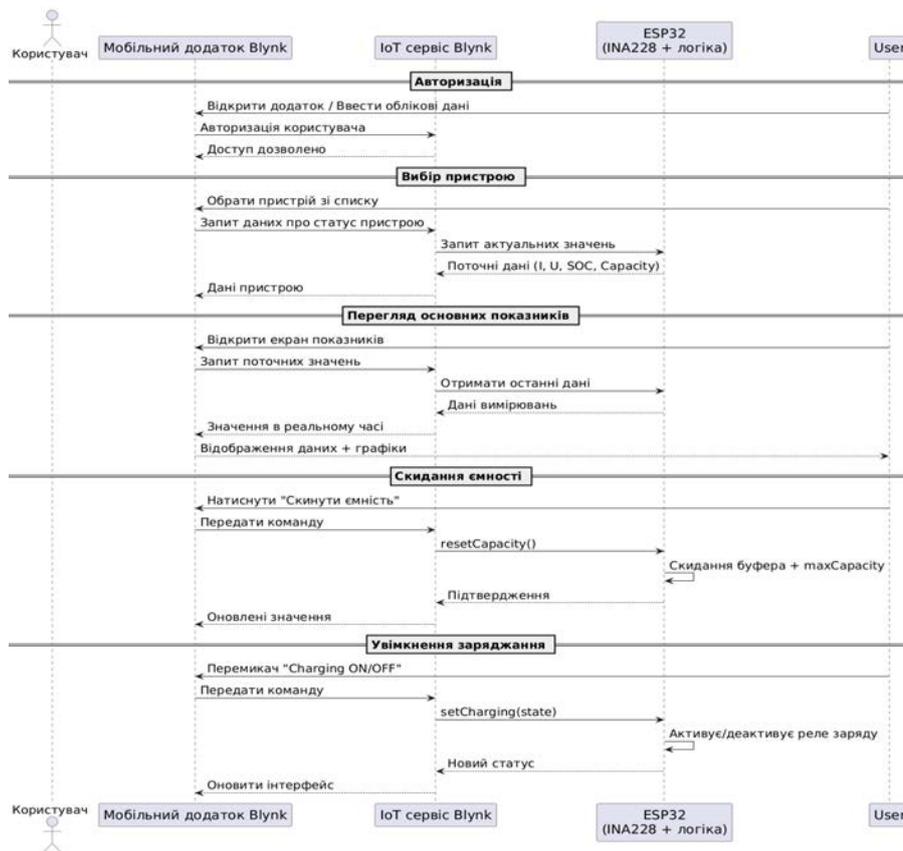


Рис. 2. Діаграма послідовності

Дані для відображення беруться з вимірювального модуля INA228 з використанням бібліотек Adafruit\_INA228 та Wire, який надає можливість виміру струму до 200A через шунт, вимірювання напруги шини, вбудовані функції фільтрації необроблених даних. Даний модуль має високу точність за рахунок 20-бітного аналогово-цифрового перетворювача.

Алгоритм обробки даних зчитує струм у mA і конвертує у амperi. Для зменшення шуму показників відхилення в 0,01A не враховуються. Напруга в свою чергу конвертується у вольти, а потужність обчислюється за стандартною формулою  $P=U \cdot I$ .

Розрахунок фактичної ємності батареї ( $A_g$ ) виконується з використанням динамічного чисельного інтегрування струму за часом (кулонівський підрахунок). Кожна ітерація циклу роботи контролера визначає часовий інтервал зміни часу у годинах:

$$\text{deltaT} = (\text{currentMillis} - \text{previousMillis}) / 3600000.0$$

Для підвищення точності розрахунків та уникнення відхилення використовується буфер накопичення дрібних змін значень і обчислення додавання чи віднімання значення ємності виконується лише при досягненні значення буфера більше ніж 0,001A<sub>g</sub>.

В свою чергу максимальна ємність при розрахунках не перевищує задану ємність акумулятора, що в свою чергу відіграє роль автоматичного калібрування при повному заряді акумулятора.

Перевагами описаного алгоритму обчислення ємності акумулятора є компенсація нестабільних вимірювань, мінімізація помилок при кулонівських підрахунках (які ведуться на проміжках десятків мілісекунд в залежності від поточного навантаження на мікроконтролер), можливість точного оцінювання заряду/розряду навіть при малих значеннях струму.

Локальний веб-інтерфейс реалізований з використанням бібліотек ESPAsyncWebServer та AsyncTCP. З її допомогою ESP32 запускає веб-сервер, який містить адаптивну HTML/CSS сторінку, сучасний інтерфейс та автоматичне підключення до WebSocket. WebSocket-комунікація виконується завдяки формуванню контролером JSON-паketу у задані проміжки часу (залежить від бажаної частоти оновлення значень). Завдяки цьому клієнти миттєво оновлюють DOM-елементи, що забезпечує процес онлайн-моніторингу без перезавантаження веб-сторінки, а механізм автоматичного перепідключення відповідає за очистку розірваних сесій і відкриття нових.

Хмарна інтеграція реалізується з використанням IoT сервісу Blynk та відповідної бібліотеки BlynkSimpleEsp32 і WiFi для підключення до мережі Інтернет. Для контролера ESP32 проводиться налаштування підключення до WI-FI мережі та авторизаційні дані для сервісу Blynk. З використанням функцій бібліотеки BlynkSimpleEsp32 реалізується авторизація пристрою, зв'язування його з шаблоном інтерфейсу в Blynk та налаштовується періодична передача даних. А основні елементи інтерфейсу та прив'язка полів, графіків до значень з контролера відбувається безпосередньо за допомогою інструментів Android додатку Blynk.

Інтерфейс додатку можна розділити на хмарний та локальний. Локальний інтерфейс є веб-сторінкою, яка відображає дані для клієнта (рисунок 3).



Рис. 3. Локальна веб-сторінка

Інтерфейс у додатку Blynk після проходження авторизації користувача має наступні елементи:

- Екран вибору пристрою, що містить кілька основних показників системи та статус наявності зв'язку з пристроєм;
- Екран з основними показниками системи, кнопкою скидання ємності акумулятора до максимального значення для калібрування та інтерактивні графіки які дозволяють виконувати переміщення часових періодів та обирати детальність відображення даних на графіку;

Екран вибору пристрою є блочним відображенням наявних пристроїв. Для кожного з них відображається назва, статус підключення та обрані основні показники для швидкого доступу на першому екрані додатку (рисунок 4).

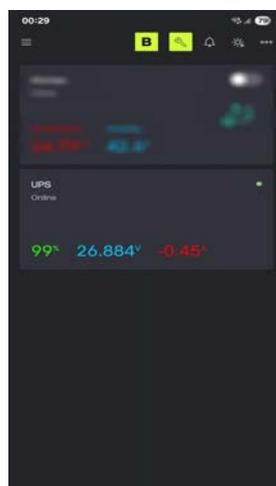


Рис. 4. Екран вибору пристрою

На головному екрані користувач отримує можливість візуального та числового відображення показників струму, напруги, відсотку заряду та ємності акумулятора, кнопку скидання ємності та розрахунковий час автономної роботи системи чи заряджання. В додаток до цього наявні графіки з записом історії показників для трьох основних параметрів системи. Графіки мають можливість перемотувати часові проміжки та автоматично підлаштовують масштаб значень в залежності від мінімального та максимального значення у видимій зоні інтерфейсу (рисунок 5).



Рис. 5. Головний екран

Програмний модуль було протестовано у системі резервного живлення приватного будинку протягом двох місяців. Основними компонентами були джерело безперебійного живлення та LiFePo4 акумулятор ємністю 400Ah. Реалізовані алгоритми моніторингу показали точне обчислення ємності акумулятора, кожна ітерація якого відбувається протягом 10–18 мілісекунд, що достатньо для врахування малих значень струму і уникнення накопичення похибки обчислень. Під час тестування локальна веб-сторінка була налаштована на оновлення даних раз за секунду (3600 запитів/годину) для перевірки стабільності роботи мікроконтролера при підвищеному навантаженні. Для хмарного IoT сервісу Blynk був налаштований мінімальний дозволений період передачі даних, а саме 1200 запитів за годину. Такі налаштування дозволяють переглядати актуальний стан системи живлення та максимальну детальність накопичених значень.

**Висновки.** Розроблено програмний модуль для моніторингу ємності акумуляторів та основних показників системи з їх використанням. У ході розробки були використані сучасні тенденції створення програмних модулів з інтеграцією хмарних технологій та веб-інтерфейсу, а у ході реалізації було обрано апаратні компоненти системи та бібліотеки для програмної реалізації функціоналу та алгоритмів обчислення. У ході програмної реалізації було використано мову програмування C, бібліотеки Adafruit\_INA228, Wire для зв'язку та зчитування даних з датчика INA228, ESPAsyncWebServer і AsyncTCP для реалізації локальної веб-сторінки з підключенням через WebSocket, BlynkSimpleEsp32 і WiFi для підключення до сервісу Blynk і мережі Інтернет. Даний програмний комплекс був протестований і готовий для використання користувачами у системах з акумуляторами для моніторингу їх стану та поточних показників. Його використання має пряме відношення до системи підтримки прийняття рішень у ролі джерела даних стану системи. Подальший розвиток полягає у інтеграції даної системи моніторингу до проактивної системи керування розподілу енергії з цифровим двійником для енергетичних мереж користувачів з альтернативними джерелами енергії.

#### Список використаних джерел:

1. Abdesslem W. Ben, Jayari I., Karaa S. Climate Change: The Challenge of Tunisia and Previsions for Renewable Energy Production. 2023. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22456-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22456-0_6).
2. Afkar M., Gavagsaz-Ghoachani R., Phattanasak M., Pierfederici S. Decentralized Passivity-based Control of Two Distributed Generation Units in DC Microgrids. 2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). Babol, Iran, 2023. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTEM56862.2023.10084246>.

3. Belaid M., Chandra A., Rezkallah M., Ibrahim H. Performance Study of a Decentralized Control Strategy for Hybrid Standalone Power Generation System. IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Toronto, Canada, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589265>.
4. Ghahfarrokhi M., Khademvatani A. Investigating the Impact of Fossil Fuel Prices on CO<sub>2</sub> Emissions in Iran and China. 2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). Behshar, Mazandaran, Iran, 2024. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTEM60690.2024.10631921>.
5. Kavousi-Fard A., Dabbaghjamesh M., Jafari M., Fotuhi-Firuzabad M., Dong Z. Y., Jin T. Digital Twin for mitigating solar energy resources challenges: A Perspective Review. *Solar Energy*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112561>.
6. Lasemi M. A., Arabkoohsar A., Hajizadeh A. Optimal Design of Green Energy Hub Considering Multi-Generation Energy Storage System. 2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/POWERCON53406.2022.9929923>.
7. Li L., Li J., Wang H., Georgieva T., Ferentinos K., Arvanitis K., Sigrimis N. Sustainable energy management of solar greenhouses using open weather data on MACQU platform. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. 11(1). DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2713>.
8. Meng F., Wang X. Digital twin for intelligent probabilistic short-term load forecasting in solar based smart grids using shark algorithm. *Solar Energy*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111870>.
9. Prajapati D. K., Joshi R. A Comparison of Machine Learning Methods for Forecasting Solar Energy Production. 2024 International Conference on Advances in Computing Research on Science Engineering and Technology (ACROSET). Indore, India, 2024. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACROSET62108.2024.10743318>.
10. Savov K.-K., Stoilov D., Hadzhiyska K. Model for energy flow optimization and planning. 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF). Varna, Bulgaria, 2022. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/BulEF56479.2022.10021158>.
11. Simmons C., Arment J., Powell K., Hedengren J. Proactive energy optimization in residential buildings with weather and market forecasts. *Processes*. 2019. 7(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7120929>.
12. Wang Z., Luther M., Horan P., Matthews J., Liu C. Technical and economic analyses of PV battery systems considering two different tariff policies. *Solar Energy*. 2024. (267). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112189>.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025