

**ЛАБОРАТОРНИЙ ЗРАЗОК ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ІСНУЮЧИХ УСТАНОВОК З
АКУМУЛЯТОРНИМИ БАТАРЕЯМИ, ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ ТА
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СОНЯЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

А. В. Петренко, кандидат технічних наук, доцент

Г. В. Кругляк, старший викладач

В. В. Ликтей, кандидат технічних наук

А. В. Іванченко, асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: petrenko@nubip.edu.ua

Анотація. У статті розглядається актуальність розробки лабораторного зразка для експериментального дослідження режимних параметрів установок з акумуляторними батареями, інверторами напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами. Описано матеріали та методи дослідження, включаючи використання сучасних технологій, таких як мікроконтролери з WiFi, аналого-цифрові перетворювачі та хмарні середовища для зберігання та аналізу даних. Представлено результати експериментальних досліджень, які демонструють, що правильне налаштування режимних параметрів може значно зменшити навантаження на акумуляторні батареї та інвертори напруги, підвищуючи їх довговічність та знижуючи витрати на обслуговування. Практичне застосування результатів дослідження сприятиме покращенню ефективності та надійності роботи гібридних сонячних систем електроживлення, що використовують відновлювані джерела енергії.

Ключові слова: лабораторний зразок, експериментальне дослідження, акумуляторна батарея, інвертор напруги, фотоелектричні сонячні перетворювачі.

Актуальність. З появою різноманіття акумуляторних батарей, фотоелектричних сонячних перетворювачів та інверторів напруги, зростає і відмінність між електричними параметрами обладнання. Типові схеми з'єднань установок з акумуляторними батареями в залежності від функціонального призначення залишаються незмінними, при цьому електрообладнання може мати вбудовані засоби вимірювання і інтерфейс для їх відображення, проте залишається

питання програмного вибіркового обмеження вимірних параметрів та їх узгодження між різними виробниками. Все це створює складність перевірки фактичних параметрів вбудованими засобами інтерфейсу. Тоді безпосереднє вимірювання електричних параметрів незалежно від вбудованого виробниками програмного забезпечення в обладнанні з передаванням, записом та відображенням режимних параметрів для подальшого аналізу і застосування стає актуальним завданням. Розробка відповідного лабораторного зразка здатного функціонувати із існуючими установками з акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами забезпечуватиме можливість проведення дослідження їх режимних параметрів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наш час приділяється увага ефективності роботи існуючих установок з акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами. Дослідження, що проводяться з використанням математичного моделювання [1] дають можливість обрати оптимальні рішення систем при їх проектуванні. У випадку необхідності отримання точних та надійних даних проводять експериментальні дослідження, для прикладу [2], та експериментальне дослідження з математичним описом фотоелектричного модуля гібридної сонячної електростанції [3], результати яких можна використовувати для подальшого аналізу. Проведення експериментальних досліджень з сонячними фотоелектричними перетворювачами є також важливою частиною науково-навчальної складової в процесі навчання [4].

Мета дослідження – розробка лабораторного зразка для експериментального дослідження режимних параметрів існуючих установок зберігання енергії та пристроїв живлення, що використовують енергію відновлюваних джерел.

Матеріали та методи дослідження. З основних матеріалів, що використовуються у розробці лабораторного зразка можна виділити фотоелектричні сонячні перетворювачі, гібридний інвертор напруги, акумуляторна батарея, вимірювальні прилади, давачі та електронні компоненти. Використані методи планування експерименту, статистичного аналізу, обробки аналогових та цифрових сигналів.

Результати досліджень та їх обговорення. За основу, в якості узагальненої існуючої установки із акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами, взято гібридну сонячну систему електроживлення. Гібридні інвертори напруги цієї системи окрім генерування електроенергії в мережу та передавання електроенергії із мережі споживачам, також можуть працювати при відсутності електромережі в якості автономної сонячної електростанції.

Акумуляторні батареї в існуючих гібридних сонячних системах електроживлення є частиною обладнання, що потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення надійної роботи. Це включає перевірку рівня заряду, стану акумуляторних батарей та їхню заміну при необхідності. Неправильне налаштування режимних параметрів може призвести до неефективного використання енергії та швидшого зносу акумуляторів. Натомість правильне налаштування режимних параметрів гібридної сонячної електроустановки може зменшити навантаження на акумуляторні батареї та інвертор напруги, що в цілому сприяє їх довговічності та знижує витрати на обслуговування.

Лабораторний зразок для експериментального дослідження режимних параметрів пропонується розробити із застосуванням гібридного інвертора, акумуляторної батареї, фотоелектричних сонячних перетворювачів, як основного обладнання. А також допоміжного обладнання, у складі мікроконтролера з WiFi, аналого-цифрового перетворювача, гальванічно розв'язаними вимірювачами постійної напруги, резистивними подільниками напруги, датчиками струму, монітором енергії та рідкокристалічним індикатором (див. рис. 1). До складу розробленого лабораторного зразка входять такі елементи: HSI1 - гібридний сонячний інвертор Solis RHI-5K-48ES-5G; BAT1 - акумуляторна батарея (АКБ) PylonTech US2000C; MCU1 - мікроконтролер MCU-ESP8266 Node MCU V3, до вхідних і вихідних контактів мікроконтролера (MCU) під'єднані зовнішні периферійні пристрої; LCD1 - рідкокристалічний 4-х строковий 20-знаковий дисплей, під'єднаний до MCU з використанням протоколу I²C; U1 - блок живлення AC230V/DC5V для живлення всіх складових низьковольтної частини системи

моніторингу; U2 - блок живлення AC230V/DC5V для живлення високовольтної частини модуля гальванічної розв'язки HCNR201 для вимірювання постійної напруги PV; U3 - блок живлення AC230V/DC5V для живлення високовольтної частини модуля гальванічної розв'язки HCNR201 для вимірювання постійної напруги АКБ; U4 - 4-входовий 16-бітний модуль АЦП ADS1115, під'єднаний до MCU з використанням протоколу I²C; АЦП вимірює напругу і струм АКБ і фотоелектричних панелей; U5 - модуль гальванічної розв'язки HCNR201 (DC5V/DC5V) для вимірювання постійної напруги PV, високовольтний вхід під'єднаний через подільник напруги R1-R2 до клем PV, низьковольтний вихід – до входу АЦП; U6 – модуль гальванічної розв'язки HCNR201 (DC5V/DC5V) для вимірювання постійної напруги АКБ, високовольтний вхід під'єднаний через подільник напруги R3-R4 до клем АКБ, низьковольтний вихід - до входу АЦП; U7 - модуль гальванічно розв'язаного вимірювача постійного струму PV на ефекті Холла ACS712-5A, струмовий вхід під'єднаний послідовно до клем +PV, аналоговий вихід - до входу АЦП; U8 - модуль гальванічно розв'язаного двонаправленого вимірювача постійного струму АКБ на ефекті Холла ACS758B-100A, струмовий вхід під'єднаний послідовно до клем +АКБ, аналоговий вихід - до входу АЦП; U9 - модуль гальванічно розв'язаного вимірювача параметрів змінного струму PZEM-004T v3, виходи якого під'єднані до MCU з використанням протоколу UART, входи вимірювання напруги під'єднані до мережевого виходу інвертора, до струмового входу модуля під'єднаний трансформатор струму СТ1; U10 - модуль гальванічно розв'язаного вимірювача параметрів змінного струму PZEM-004T v3, виходи якого під'єднані до MCU з використанням протоколу UART, входи вимірювання напруги під'єднані до мережевого входу інвертора, до струмового входу модуля під'єднаний трансформатор струму СТ2; U11 - однофазний лічильник енергії ACR10R-D16TE для сонячних інверторів, під'єднаний до інвертора через інтерфейс зв'язку RS485 з протоколом MODBUS-RTU, входи вимірювання напруги під'єднані до мережевого входу інвертора, до струмового входу модуля під'єднаний трансформатор струму СТ3.

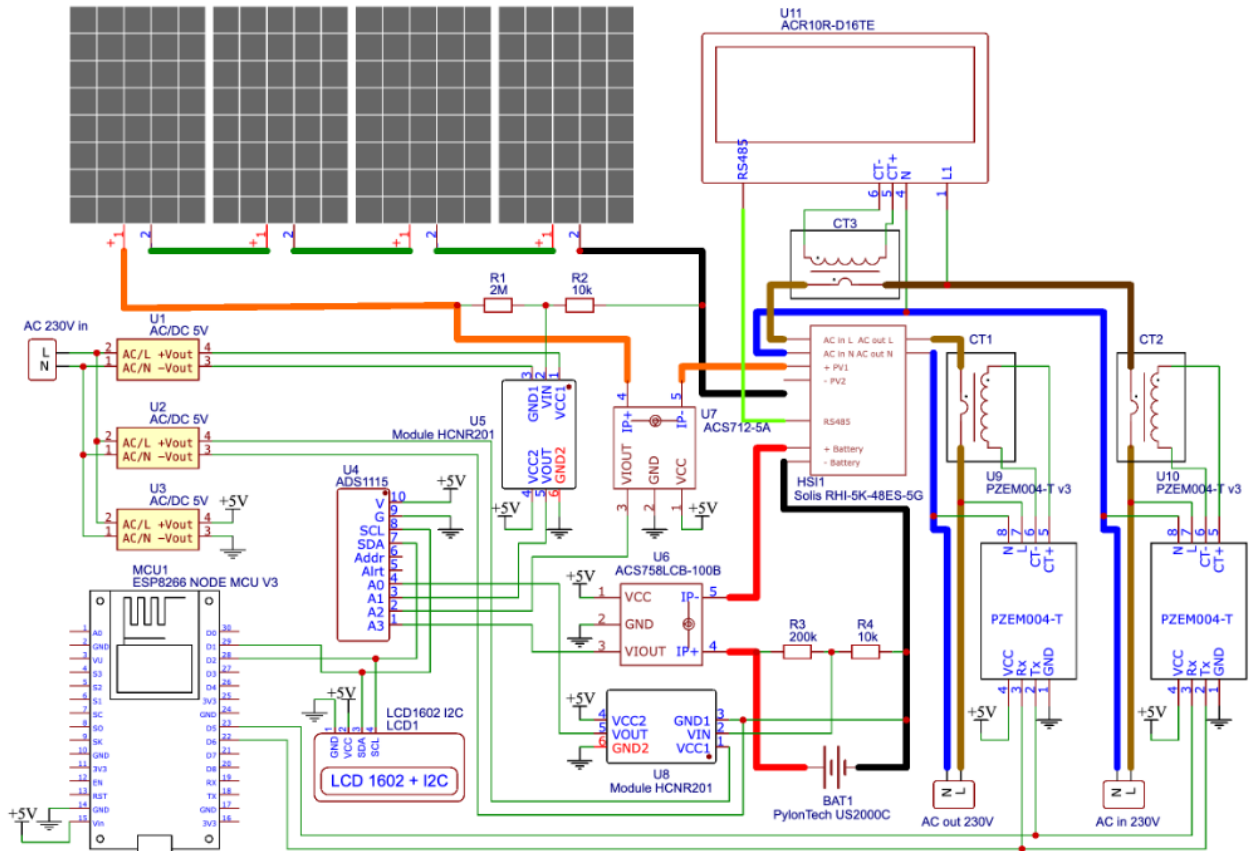


Рис. 1. Електрична схема лабораторного зразка для експериментального дослідження режимних параметрів існуючих установок з акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами

Для розробки алгоритму керування на апаратному забезпеченні з відкритим кодом використовується мікроконтролер з WiFi NodeMCU ESP8266. Для точного вимірювання параметрів потужності використовується дискретний аналого-цифровий перетворювач ADS1115, до якого під'єднані вимірювачі постійних напруг і струмів. Для вимірювання параметрів змінного струму використовується модуль PZEM-004T 100A, що призначений для вимірювання напруги, споживаного навантаженням струму і розрахунку миттєвої споживаної потужності. Для зберігання значного обсягу даних, обробки та їх аналізу використовується хмарне середовище ThingSpeak, що дозволяє візуалізувати та аналізувати в часі потоки даних у хмарі [5].

Для проведення досліджень за розробленою схемою складено лабораторний зразок для експериментального дослідження режимних параметрів існуючих

установок з акумуляторними батареями, інвертором напруги та фотоелектричними сонячними перетворювачами (див. рис. 2).

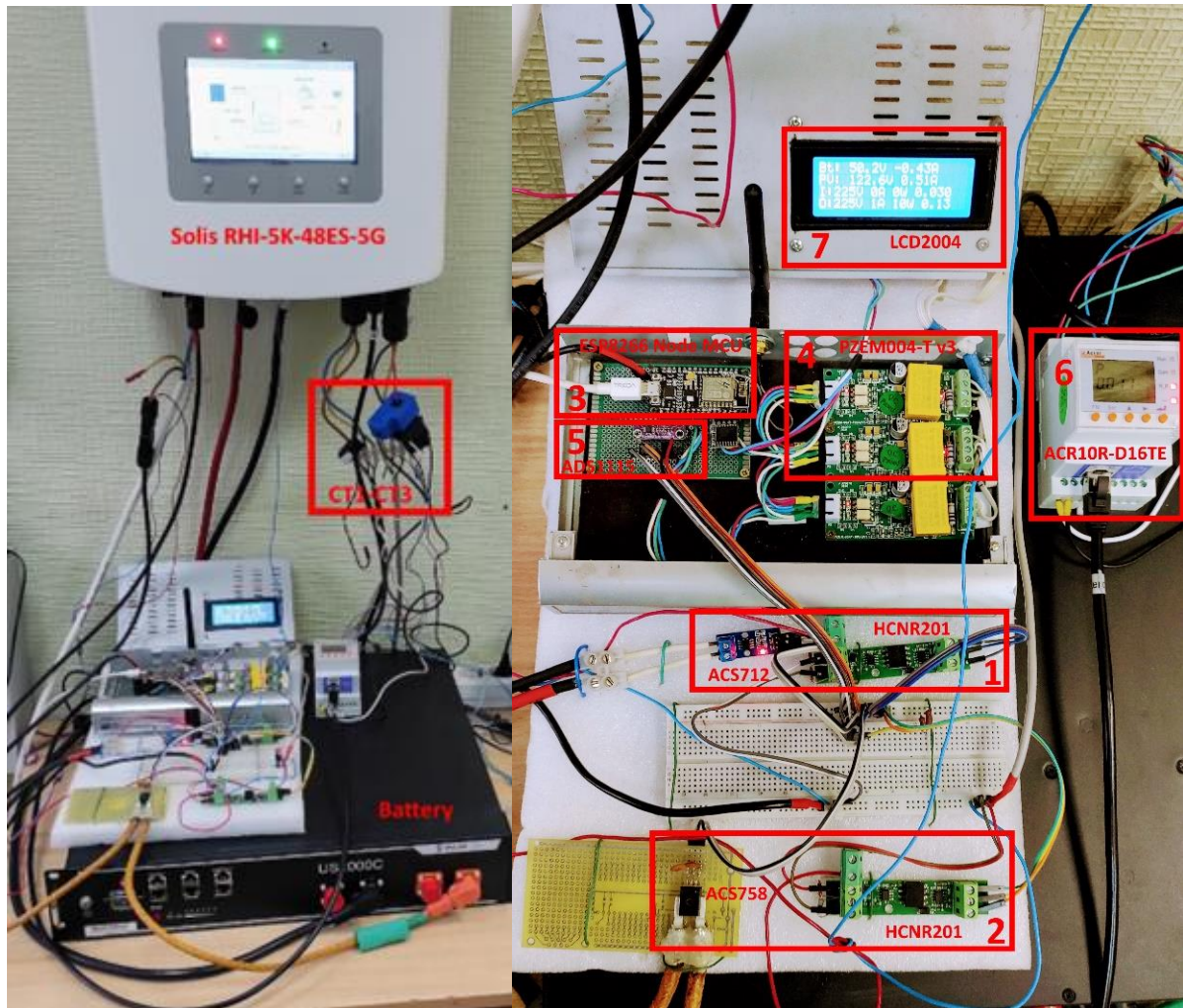


Рис. 2. Лабораторний зразок для експериментального дослідження режимних параметрів

До складу лабораторного зразка входять: гібридний сонячний інвертор напруги – Solis; акумуляторна батарея – Pylontech; блоки вимірювань параметрів постійного струму – № 1 і № 2; плата розробника ESP8266 Node MCU v.3 – № 3; багатофункціональні вимірювачі споживаної електроенергії PZEM-004T V3 – № 4; модуль 16-розрядного 4-х каналного АЦП на мікросхемі ADS1115 – № 5; однофазний лічильник енергії ACR10R-D16TE для сонячних інверторів – № 6; рідкокристалічний символічний дисплей 20x4 LCD 2004 I2C – № 7.

Розроблена система керування режимами роботи акумуляторної батареї з напругою 48 В і ємністю 50 А·год. Розроблений програмний код завантажений у

мікроконтроллер NodeMCU ESP8266 і працює в циклічному режимі. До складу програмного коду системи керування входять такі файли: 1. ESP8266_Battery_Monitor_v04.ino - головний файл; 2. ConstVars.h - файл констант і змінних; 3. secrets.h - файл з паролями; 3. Lib.h - файл бібліотек; 4. WiFi.ino - файл мережових налаштувань; 5. ACDC.ino - файл вимірювань; 6. LCD.ino - файл індикації; 7. TS.ino - файл хмарного середовища.

Згідно методики керування спочатку виконується налаштування програмних бібліотек, необхідних для функціонування системи вимірювання постійного струму (Adafruit_ADS1X15.h), системи вимірювання змінного струму (SoftwareSerial.h і PZEM004Tv30.h), під'єднання до локальної мережі (ESP8266WiFi.h) і завантаження даних в хмарне середовище (ThingSpeak.h), та виводу поточних даних на рідкокристалічний дисплей (LiquidCrystal_I2C.h).

Після під'єднання системи керування до локальної мережі (кожні 10 секунд перевіряється з'єднання і при обриві виконується операція повторного під'єднання), розпочинається процес поточних вимірювань енергетичних параметрів, що поділяється на такі етапи. Кожні 2 секунди виконуються: вимірювання величини постійної напруги в колі фотоелектричних модулів (модуль HCNR201 (200 В)); вимірювання величини постійного струму в колі фотоелектричних модулів (модуль ACS712-5A); вимірювання величини постійної напруги в колі акумуляторної батареї (модуль HCNR201 (60 В)); вимірювання величини постійного струму в колі акумуляторної батареї (модуль ACS758B-100A); вимірювання величини змінної напруги, струму, потужності і коефіцієнта потужності в колі навантаження гібридного інвертора (монітор енергії PZEM004T v3). Кожні 30 секунд виконується усереднення отриманих даних вимірювання режимних параметрів та завантаження даних в зареєстрований канал хмарного сховища ThingSpeak.

Розглянемо один із варіантів випробування режимів роботи гібридної сонячної станції з використанням лабораторного зразка для дослідження режимних параметрів установки, див. рис. 3. Зміна режимів роботи виконувалася кожні 10 хв.

1. Спочатку акумулятор (P_{bat}) не підключено до гібридної сонячної станції, і навантаження (P_s) ще не ввімкнено. Потужність, що генерується фотоелектричними

модулями (P_{PV}), є майже постійною при номінальній потужності 720 Вт за допомогою керування МРРТ і передається в електромережу (P_g).

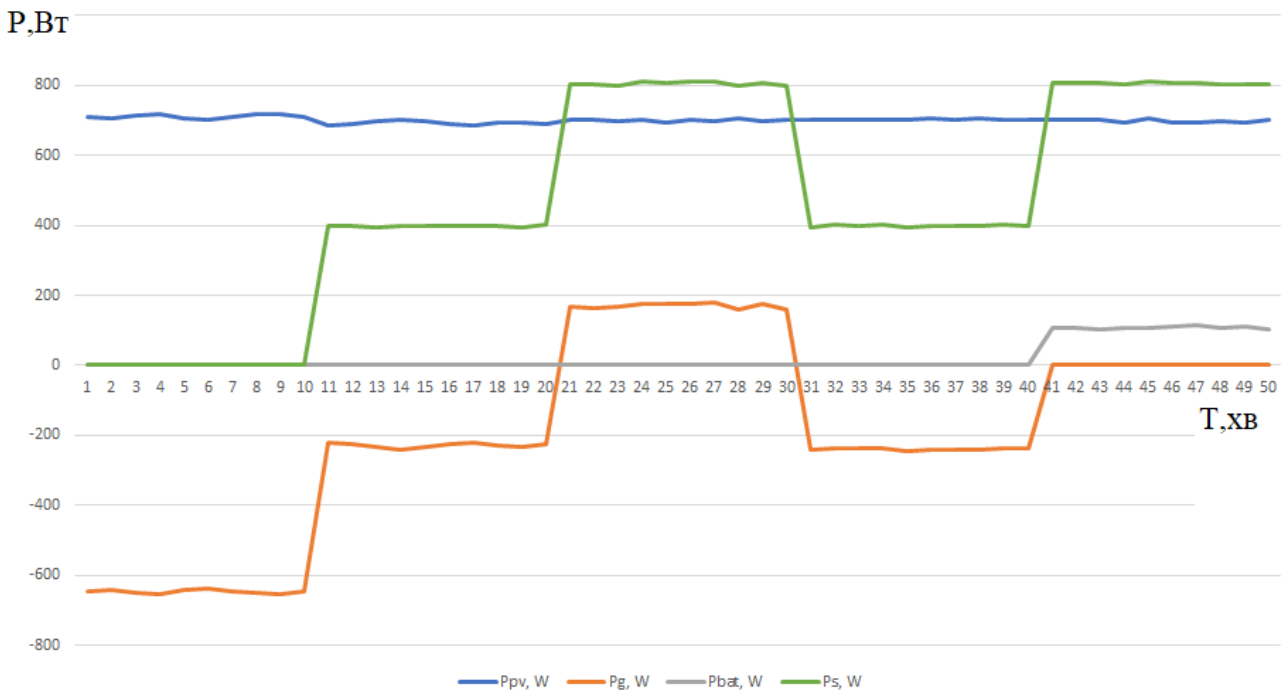


Рис. 3. Результати випробування режимів роботи гібридної сонячної станції з використанням лабораторного зразка для дослідження режимних параметрів установки.

2. Навантаження (P_s) 400 Вт увімкнене та споживає більше половини електроенергії, що вироблена фотоелектричними модулями (P_{PV}), а решта потужності передається до електромережі (P_g).

3. Потужність навантаження (P_s) зростає і вмикається на загальну спожиту потужність 800 Вт. Фотоелектричні модулі (P_{PV}) нездатні забезпечити достатньої потужності, тому додаткова потужність забезпечується мережею (P_g).

4. Потім навантаження (P_s) від'єднується, а акумуляторна батарея (P_{bat}) підключається до гібридної сонячної станції. Тоді навантаження (P_s) загальною спожитою потужністю 800 Вт знову підключається в тій самій послідовності, згідно пунктів 1-3.

Можна помітити, що тепер система керування гібридним сонячним інвертором від'єднує електромережу (P_g), оскільки поєднання генерованої потужності фотоелектричними модулями (P_{PV}) та потужності акумулятора (P_{bat}) достатньо для забезпечення загального навантаження (P_s).

Висновки та перспективи. Використання сучасних методів та технологій, таких як мікроконтролери, аналого-цифрові перетворювачі та хмарні середовища для зберігання та аналізу даних, дозволяє створити незалежну систему дослідження параметрів та режимів роботи установок з акумуляторними батареями, інверторами та фотоелектричними сонячними перетворювачами.

Експериментальні дослідження з використанням розробленого лабораторного зразка показали, що правильне налаштування режимних параметрів може значно зменшити навантаження на акумуляторні батареї та інвертор напруги, що в свою чергу сприяє їх довговічності та знижує витрати на обслуговування.

Використання лабораторного зразка для аналізу фактичних параметрів дозволяє удосконалити методи дослідження та отримати надійні результати, що в подальшому сприятиме більш широкому впровадженню гібридних систем з акумуляторними батареями.

Список використаних джерел

1. Tambura T., Adefarati T., Bansal R., Naidoo R. Modelling and Simulation of PV-Battery Grid-Connected Power System. *10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021)*. 2021. DOI: 10.1049/icp.2021.2324.
2. Sudarsono, Waluyo J., Herawati N. Experimental Study an Effect of Photovoltaic (PV) Arrangement on Performance of 150 wp Solar Power Plant. *Engineering And Technology Journal*. 2024. Т. 9, № 5. С. 4061–4064. DOI: <https://doi.org/10.47191/etj/v9i05.23>.
3. Галько С. В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень*. 2020. Т. 1. С. 83–90. Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/553645748.pdf>.
4. Петренко А. В., Скрипник А. М., Абрамчук Р. І., Горбачевський С. І. Лабораторний стенд дослідження ефективності перетворення оптичного випромінювання в електроенергію. *Енергетика і автоматика*. 2014. № 2(20). С. 35–41. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2014_2_7.pdf.
5. ThingSpeak for IoT Projects. ThingSpeak: електрон. ресурс. 2024. URL: <https://thingspeak.com> (дата звернення: 16.12.2024).

References

1. Tambura, T., Adefarati, T., Bansal, R. C., Naidoo, R. (2021). Modelling and simulation of PV-battery grid-connected power system. The 10th Renewable Power Generation Conference, Online Conference, 938–943. <https://doi.org/10.1049/icp.2021.2324>.

2. Sudarsono, Waluyo, J., Herawati, N. (2024). Experimental Study an Effect of Photovoltaic (PV) Arrangement on Performance of 150 wp Solar Power Plant. *Engineering And Technology Journal*, 9(5), 4061–4064. <https://doi.org/10.47191/etj/v9i05.23>

3. Galko, S. V. (2020). Eksperymentalne doslidzhennia i vyznachennia parametriv koheneratsiinoho fotoelektrychnoho modulia dlia hybrydnykh soniachnykh elektrostantsii [Experimental study and determination of parameters of a cogeneration photovoltaic module for hybrid solar power plants]. *Tradytsiini ta innovatsiini pidkhody do naukovykh doslidzhen*. Tom 1, 83–90. Rezhym dostupu <https://core.ac.uk/download/pdf/553645748.pdf>

4. Petrenko, A. V., Skrypnyk, A. M., Abramchuk, R. I., & Horbachevskyi, S. I. (2014). Laboratornyi stend doslidzhennia efektyvnosti peretvorennia optychnoho vyprominiuvannia v elektroenerhiiu [Laboratory stand for research into the efficiency of converting optical radiation into electrical energy]. *Enerhetyka i avtomatyka*, 2(20), 35–41. Rezhym dostupu http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2014_2_7.pdf

5. ThingSpeak for IoT Projects. Available at: <https://thingspeak.com>

LABORATORY MODEL FOR EXPERIMENTAL STUDY OF OPERATING PARAMETERS OF EXISTING INSTALLATIONS WITH BATTERIES, VOLTAGE INVERTER AND PHOTOVOLTAIC SOLAR CONVERTERS

A. Petrenko, H. Kruhliak, V. Lyktei, A. Ivanchenko

Abstract. *The article discusses the relevance of developing a laboratory model for the experimental study of the operating parameters of installations with batteries, voltage inverters, and photovoltaic solar converters. Materials and research methods are described, including the use of modern technologies such as microcontrollers with WiFi, analog-to-digital converters, and cloud environments for data storage and analysis. The results of experimental studies are presented, which demonstrate that the correct setting of operating parameters can significantly reduce the load on batteries and voltage inverters, increasing their durability and reducing maintenance costs. The practical application of the research results will help improve the efficiency and reliability of hybrid solar power systems using renewable energy sources.*

Key words: *laboratory model, experimental study, rechargeable battery, voltage inverter, photovoltaic solar converters*