

ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОБУТОВИХ ОБ'ЄКТІВ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ВДЕ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Чекотун Я.О. – здобувач бакалаврату, cekotuna@gmail.com

Павленко В.М. – к.т.н., доцент, v.pavlenko@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є розробка методології проектування комбінованої системи живлення побутового об'єкта, що інтегрує централізовану мережу, фотоелектричну систему та модульні акумуляторні батареї з оптимізацією конфігурації, підбором обладнання та техніко-економічним обґрунтуванням для забезпечення надійного та економічного електропостачання в умовах нестабільної роботи мережі.

Актуальність. Комбіновані системи живлення, що поєднують централізовану мережу, відновлювані джерела енергії та системи накопичення, забезпечують багаторівневу надійність електропостачання та економічну ефективність через оптимізацію балансу між генерацією, споживанням та зарядом батарей. Підвищення ефективності гібридних фотоелектричних систем з акумуляторними батареями дозволяє збільшити частку самоспоживання сонячної енергії до 70-85% та забезпечити автономність 8-12 годин при аваріях мережі .[1]

Управління споживанням енергії у комбінованих системах з багатозонним тарифікуванням потребує інтелектуальних алгоритмів оптимізації для мінімізації витрат через заряд батарей у години низьких тарифів та розряд у пікові години . Динамічні системи управління енергією з real-time контролем дозволяють підвищити ефективність локальних систем на 25-35% через оптимальний dispatch генерації та накопичувачів.

Таблиця 1 – Етапи проектування комбінованої системи живлення

Етап	Методи та інструменти	Результат
1. Енергоаудит об'єкта	Аналіз профілю навантаження 24/7, виділення критичних/некритичних споживачів	Добове/місячне споживання (кВт·год), пікова потужність (кВт), класифікація навантажень за пріоритетами
2. Оцінка ресурсів ВДЕ	PVGIS/NASA SSE для сонячної інсоляції, аналіз затінення даху	Потенціал генерації ФЕС (кВт·год/добу), оптимальна орієнтація панелей (азимут/нахил)

3. Вибір архітектури системи	Порівняльний аналіз: on-grid з backup, hybrid, off-grid	Топологія: grid-tie + батареї з функцією backup та peak shaving
4. Розрахунок ФЕС	Метод найгіршого місяця, покриття споживання 60-80%	Потужність ФЕС (кВт), кількість панелей, річна генерація (кВт·год/рік)
5. Підбір батарейних модулів	Розрахунок автономності, аналіз циклів заряду/розряду, вибір хімії (LFP/NMC)	Ємність батарей (кВт·год), напруга системи (48/96/192 В), конфігурація модулів
6. Вибір інвертора та BMS	Специфікації потужності, ККД, функціональності (backup, peak shaving)	Гібридний інвертор (кВА), BMS для балансування та захисту
7. Техніко-економічне обґрунтування	NPV, IRR, простий/дисконтований термін окупності, аналіз чутливості	Капітальні витрати, річна економія, термін окупності (роки)

Розрахунок параметрів системи для приватного будинку виглядає наступним чином: приватний будинок площею 120 м², 4 мешканці, добове споживання 18 кВт·год, пікова потужність 6 кВт, регіон — Київська область (інсоляція 3.2 кВт·год/м²/день середньорічна).

Для покриття 70% споживання влітку необхідна потужність:

$$P_{PV} = \frac{E_{daily} \times 0.7}{H_{avg} \times \eta_{system}} = \frac{18 \times 0.7}{3.2 \times 0.75} = 5.25 \text{ кВт}$$

Обираємо ФЕС 6 кВт (24 панелі по 250 Вт) з очікуваною річною генерацією 6500 кВт·год.

Для забезпечення автономності 10 годин критичних навантажень (холодильник 0.5 кВт, освітлення 0.3 кВт, роутер 0.05 кВт, насос 0.8 кВт) = 1.65 кВт:

$$C_{battery} = \frac{P_{critical} \times t_{autonomy}}{DOD \times \eta_{inv}} = \frac{1.65 \times 10}{0.8 \times 0.95} = 21.7 \text{ кВт·год}$$

Для оптимізації за багатозонним тарифом (peak shaving + заряд у нічні години) обираємо модульні LFP-батареї 15 кВт·год (3 модулі по 5 кВт·год, масштабованість).

Гібридний інвертор повинен забезпечувати: потужність заряду/розряду батарей 5 кВт, пікову потужність навантаження 6 кВт × 1.3 (запас) = 7.8 кВА, функції backup з перемиканням < 20 мс, peak shaving, підтримку багатозонних тарифів. Обираємо Victron MultiPlus II 8000 VA (8 кВА, ККД 96%, функціональність ESS для оптимізації тарифів).

Таблиця 2 – Режими роботи системи та пріоритети потоків енергії

Режим	Умови	Пріоритети енергопотоків
Сонячний день (надлишок ФЕС)	Генерація ФЕС > Навантаження, SOC < 90%	ФЕС → Навантаження → Заряд батарей → Експорт до мережі (зелений тариф)
Вечірній пік (високий тариф)	Час 17:00-22:00, тариф \$0.18/кВт·год	Батареї → Навантаження (розряд до SOC 30%), мінімізація імпорту з мережі
Нічний тариф (низький)	Час 23:00-7:00, тариф \$0.06/кВт·год	Мережа → Заряд батарей до SOC 85%, підготовка до ранкового піку
Аварія мережі (island)	Напруга мережі < 180 В або частота < 49.5 Гц	Батареї + ФЕС → Критичні навантаження, відключення некритичних споживачів
Хмарна погода взимку	Генерація ФЕС < 20% потенціалу, SOC < 50%	Мережа → Навантаження + Заряд батарей, мінімальне використання батарей

Використання модульних акумуляторних блоків по 5 кВт·год дозволяє масштабувати систему залежно від потреб та бюджету. Кожен модуль містить 16 LFP-комірок ($3.2 \text{ В} \times 16 = 51.2 \text{ В}$), інтегрований BMS для балансування та захисту, можливість паралельного з'єднання до 6 модулів (30 кВт·год) без зміни інвертора.

Переваги LFP над NMC: термін служби 6000+ циклів (проти 3000-4000 для NMC), термостабільність (-20°C до +60°C без деградації), безпека (відсутність термічного розгону), менша деградація при глибоких розрядах.

Висновок. Розроблена методологія проектування комбінованої системи живлення включає 7 послідовних етапів від енергоаудиту до техніко-економічного обґрунтування. Для типового приватного будинку (18 кВт·год/добу) оптимальна конфігурація: ФЕС 6 кВт, модульні LFP-батареї 15 кВт·год, гібридний інвертор 8 кВА з терміном окупності 7-10 років залежно від державної підтримки.

Список використаних джерел:

1. Pavlenko, V., Ponomarenko, I., Morhulets, O., Ponomarenko, D., Danylchenko, D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management. In: Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1480. Springer, Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95191-6_18
2. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97, №11.
3. Shvedchykova, I., Trykhlieb, A., Trykhlieb, S., Demishonkova, S., Pavlenko, V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6, №8 (132). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317829