

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОФІСНОЇ БУДІВЛІ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Маринчук В.В.* – гр. ЕЕЕ-24001(М), магістр, [eee24-v.marynchuk@nubip.edu.ua](mailto:eee24-v.marynchuk@nubip.edu.ua)

*Макаревич С.С.* – к.т.н., доцент, [birma0125@gmail.com](mailto:birma0125@gmail.com)

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Метою роботи** є розробка технічних рішень комбінованої системи електропостачання офісної будівлі на основі інтеграції відновлювальних джерел енергії, систем акумулювання та централізованої мережі для підвищення енергоефективності та надійності електропостачання.

**Актуальність дослідження.** Офісні будівлі складають значну частку енергетичного балансу міст, їх інтенсивність енергоспоживання становить 150-250 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік [1]. Інтеграція відновлювальних джерел енергії у системи електропостачання будівель дозволяє знизити залежність від централізованої мережі, зменшити викиди CO<sub>2</sub> та забезпечити економію коштів [2]. Комбіновані системи, що поєднують фотоелектричні панелі (PV), системи акумулювання енергії (BESS) та підключення до мережі, демонструють оптимальне співвідношення надійності, економічності та екологічності [3].

**Аналіз енергоспоживання.** Характерний профіль навантаження офісної будівлі має виражену добову та тижневу нерівномірність із піковими значеннями у робочі години (9:00-18:00) та мінімальним споживанням у нічний час і вихідні дні. Основні споживачі електроенергії: системи HVAC (40-50%), освітлення (20-25%), офісне обладнання (15-20%), вертикальний транспорт (5-8%) [1].

Структура комбінованої системи (рис. 1) включає наступні компоненти:

- Фотоелектрична станція – сонячні панелі встановлюються на даху та фасадах будівлі. Для типової офісної будівлі площею 5000 м<sup>2</sup> з споживанням 750 МВт·год/рік рекомендована потужність PV становить 300 кВт.
- Система акумулювання енергії (BESS) – забезпечує згладжування нерівномірності генерації PV, зберігання надлишкової енергії та резервне живлення критичних навантажень. Оптимальна ємність літій-іонних батарей – 450 кВт·год.
- Підключення до централізованої мережі – забезпечує надійність електропостачання та можливість продажу надлишкової генерації.

Двосторонній облік електроенергії дозволяє оптимізувати режими роботи системи.

- Система керування енергією (EMS) – координує роботу всіх компонентів на основі прогнозування генерації PV, профілю навантаження та цінових сигналів від мережі. Алгоритми на основі машинного навчання (LSTM) забезпечують точність прогнозування з  $MAPE < 15\%$ .

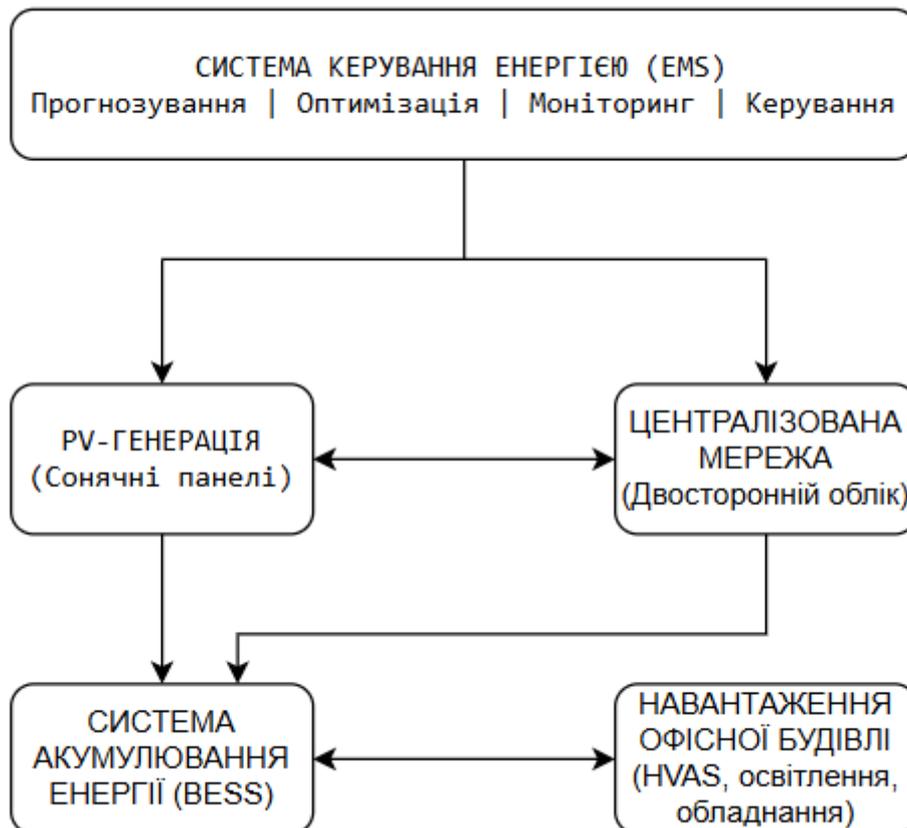


Рисунок 1 – Структура комбінованої системи електропостачання

**Методологія оптимізації.** Для визначення оптимальної конфігурації застосовано багатокритеріальну оптимізацію з використанням генетичного алгоритму в середовищі HOMER Pro. Цільові функції: (1) мінімізація приведених витрат (NPC), (2) мінімізація приведеної вартості енергії (LCOE), (3) мінімізація викидів CO<sub>2</sub>. Обмеження: надійність електропостачання (LSP < 3%), доступні площі для PV, технічні параметри обладнання [4].

**Результати оптимізації.** Порівняльний аналіз варіантів системи (табл. 1) показав переваги комбінованої конфігурації.

Таблиця 1 – Порівняльні техніко-економічні показники

Варіант системи	NPC, тис. \$	LCOE, \$/кВт·год	Викиди CO <sub>2</sub> , т/рік	Частка ВДЕ, %
Лише мережа	850	0,12	450	0
PV-мережа	720	0,095	180	55
PV-BESS-мережа	680	0,088	120	68
PV-паливні елементи	920	0,115	95	72

Оптимальна конфігурація: PV-система 300 кВт, літій-іонні батареї 450 кВт·год, гібридний інвертор 250 кВт. Частка покриття від ВДЕ – 68%, зниження викидів CO<sub>2</sub> – 73%.

**Економічне обґрунтування.** Капітальні витрати на впровадження комбінованої системи – 680 тис. \$, з яких: PV-система – 60%, BESS – 30%, інвертори та контролери – 7%, монтаж – 3%. Економія на електроенергії: 95 тис. \$/рік. Додатковий дохід від продажу надлишкової генерації за "зеленим" тарифом: 12-15 тис. \$/рік. Простий термін окупності – 6,8 років, дисконтований (при ставці 5%) – 8,2 роки.

Система керування енергією реалізує три режими роботи:

- Режим самоспоживання – максимізація використання власної PV-генерації, зарядка BESS надлишковою енергією.
- Режим peak shaving – розвантаження мережі в години пікового попиту за рахунок розрядки BESS та оптимізації керованих навантажень (HVAC, освітлення).
- Режим demand response – зміщення споживання відповідно до цінових сигналів, зниження вартості електроенергії на 15-20%.

Прогнозуюча система на основі LSTM забезпечує добове прогнозування PV-генерації з точністю MAPE = 8,5% та навантаження з MAPE = 12,3%. Алгоритм враховує прогноз погоди, стан заряду батарей (SOC), тарифну зону та технічні обмеження [5].

**Підвищення надійності.** Комбінована система забезпечує категорію надійності II для критичних навантажень через автоматичне перемикання на автономний режим при відключенні мережі. BESS забезпечує безперебійне живлення протягом 3-4 годин.

**Перспективи розвитку.** Інтеграція системи з концепцією "розумної будівлі" (Smart Building) дозволяє реалізувати додаткові функції: динамічне керування освітленням та HVAC на основі присутності персоналу, участь у

віртуальних електростанціях (VPP), надання допоміжних послуг мережі. Застосування цифрових двійників для моделювання енергетичних потоків підвищує ефективність системи на 10-15%.

**Висновки.** Розроблені технічні рішення комбінованої системи електропостачання офісної будівлі на основі інтеграції PV-генерації (300 кВт), систем акумулювання (450 кВт·год) та підключення до мережі забезпечують зниження витрат на електроенергію на 40-45%, зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 73% та підвищення надійності (LPSP <1,2%). Багатокритеріальна оптимізація дозволила визначити раціональну конфігурацію з терміном окупності 6,8-8,2 роки. Впровадження інтелектуальної системи керування на основі прогнозуючих алгоритмів машинного навчання забезпечує оптимальну координацію компонентів та участь в ринкових програмах керування попитом, що дозволяє знизити вартість електроенергії на 15-20%.

#### Список використаних джерел:

1. Detailed Office Building Energy Information Based on In Situ Measurements / J. Kim et al. // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 12. – P. 3050. DOI: 10.3390/en13123050
2. Optimising Electrical Power Supply Sustainability Using a Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System / A. Hassan et al. // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 21. – P. 7084. DOI: 10.3390/en14217084
3. Trends in Hybrid Renewable Energy System (HRES) Applications: A Review / C. Martinez et al. // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 11. – P. 2578. DOI: 10.3390/en17112578
4. Optimal Design of Hybrid Renewable Systems, Including Grid, PV, Bio Generator, Diesel Generator, and Battery / A. Alturki et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 3297. DOI: 10.3390/su15043297
5. Office Building Energy Consumption Forecast: Adaptive Long Short Term Memory Networks Driven by Improved Beluga Whale Optimization Algorithm / Y. Li et al. // *Energy Reports*. – 2024. – Vol. 11. – P. 4623–4635. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.04.028