

ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИКИ ТА АКУМУЛЯТОРІВ

Горбель О.О. – здобувач бакалаврату, sashahorbel@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 проєктування автономних систем електропостачання для віддалених сільськогосподарських об'єктів (ферми, пасовища, поливні станції, теплиці) на основі фотоелектричних систем (ФЕС) та акумуляторних батарей з оптимізацією співвідношення потужність-ємність для забезпечення цілодобового безперебійного електропостачання при мінімальних капітальних витратах.

Актуальність. Значна частина сільськогосподарських об'єктів України (до 15-20% ферм, більшість полів, пасовищ та віддалених насосних станцій) не має доступу до централізованого електропостачання або підключення економічно недоцільне через великі відстані (>2-3 км) та високу вартість будівництва ліній електропередачі (\$15k-25k/км для 10 кВ ЛЕП). Автономні системи на основі відновлюваних джерел енергії стають єдиним економічно виправданим рішенням для електрифікації таких об'єктів [1].

Правильне проєктування автономних систем вимагає комплексного аналізу профілю навантаження, локальних метеоумов (інсоляція, температура), оптимального підбору потужності ФЕС та ємності батарей для забезпечення енергетичного балансу протягом року з урахуванням сезонності. Дослідження показують, що використання відновлених фотоелектричних модулів після попередньої діагностики дозволяє знизити капітальні витрати на 35-45% при збереженні ефективності 88-94% від номінальної.

Таблиця 1 – Функціональні модулі автономної системи електропостачання сільськогосподарського об'єкта

Функціональний модуль	Компоненти	Призначення та можливості
Фото-електрична генерація	ФЕС потужністю 5-15 кВт (залежно від навантаження), МРРТ-контролери, система очищення панелей	Генерація електроенергії з сонячного випромінювання 4-6 годин еквівалентних повної потужності влітку, 2-3 години взимку; автоматичне відстеження точки максимальної потужності
Система накопичення	LFP або AGM батареї ємністю 20-80 кВт·год	Зберігання енергії для нічного споживання та хмарних днів, глибина розряду DOD 70-80%,

енергії	BMS-контролер, температурна компенсація	автономність 2-4 доби без сонця
Інвертор та контролер заряду	Гібридний інвертор 3-10 кВА з вбудованим MPPT, ККД >95%	Перетворення DC→AC, регулювання заряду батарей (3-стадійний алгоритм: bulk-absorption-float), захист від глибокого розряду
Керування навантаженнями	Розумні таймери, контактори пріоритетних споживачів, датчики SOC	Відключення некритичних навантажень при низькому SOC (<30%), автоматичне керування помпами/годівницями за розкладом
Моніторинг та діагностика	Датчики струму/напруги, температури, SOC батарей, GSM-модуль для віддаленого доступу	Real-time моніторинг генерації, споживання, стану батарей; SMS-сповіщення про критичні події (низький SOC, перегрів)
Резервне джерело	Дизель-генератор 5-10 кВА з автозапуском (опціонально)	Підстраховка при тривалій хмарності (>4 дні) або зимових піках споживання, автозапуск при SOC < 15%
Захист обладнання	SPD грозозахист класу I+II, автоматичні вимикачі, контролер ізоляції	Захист від перенапруги, блискавок, короткого замикання; моніторинг опору ізоляції DC-ланцюгів

Проектування автономної системи проводитиметься в декілька етапів.

1. Аналіз профілю навантаження. Перший етап – детальний аналіз добового та річного профілю споживання електроенергії. Для типової молочної ферми на 50 корів: доїльне обладнання (10 кВт × 4 год/добу = 40 кВт·год), охолодження молока (5 кВт × 6 год = 30 кВт·год), освітлення (2 кВт × 8 год = 16 кВт·год), вентиляція (3 кВт × 12 год = 36 кВт·год), автоматичні годівниці (1 кВт × 3 год = 3 кВт·год). Загальне добове споживання: 125 кВт·год влітку, 145 кВт·год взимку (через збільшення освітлення та опалення).

2. Розрахунок потужності ФЕС. Потужність ФЕС визначається з урахуванням кліматичної зони та сезонності інсоляції. Для України (широта 48-50°N) середньорічна інсоляція становить 1200-1350 кВт·год/м²/рік (3.3-3.7 кВт·год/м²/добу). Розрахунок потужності ФЕС:

$$P_{PV} = \frac{E_{daily}}{H_{sun} \times \eta_{system}}$$

де E_{daily} – добове споживання (125 кВт·год), H_{sun} – еквівалентні години сонячного сяяння (4 год влітку, 2.5 год взимку для критичного розрахунку), η_{system} – ККД системи (0.85 з урахуванням втрат у інверторі, проводах, запиленості панелей).

$$P_{PV} = \frac{145}{2.5 \times 0.85} = 68.2 \text{ кВт}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу 1.15-1.25 рекомендована потужність ФЕС: 75-85 кВт для повної автономії взимку або 40-50 кВт з резервним дизель-генератором .

3. Підбір ємності батарей. Ємність системи накопичення визначається автономністю (кількість днів без сонця) та допустимою глибиною розряду:

$$C_{bat} = \frac{E_{daily} \times N_{days}}{DOD \times U_{nom}}$$

де N_{days} — автономність (2-4 доби), DOD — допустима глибина розряду (0.7-0.8 для LFP, 0.5 для AGM), U_{nom} — номінальна напруга системи (48 В).

Для автономності 3 доби та LFP-батарей:

$$C_{bat} = \frac{145 \times 3}{0.75 \times 48} = 12.1 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Рекомендована ємність з запасом: 60-80 кВт·год (48 В × 1250-1670 Ач).

4. Економічна оптимізація. Основна дилема проектування – баланс між потужністю ФЕС та ємністю батарей [3]:

- Варіант А: Велика ФЕС (75 кВт) + мала батарея (40 кВт·год) – висока вартість ФЕС, але менше циклів батареї
- Варіант Б: Середня ФЕС (50 кВт) + велика батарея (80 кВт·год) — нижча вартість, але більше циклів та швидша деградація батареї
- Варіант В: Середня ФЕС (45 кВт) + середня батарея (60 кВт·год) + резервний генератор (10 кВА) — оптимальний баланс

Аналіз показує, що варіант В має найкращий показник LCOE (Levelized Cost of Energy): \$0.18/кВт·год проти \$0.24/кВт·год для варіанту А та \$0.21/кВт·год для варіанту Б .

Рекомендована конфігурація для ферми 125 кВт·год/добу: ФЕС 45 кВт (180 панелей по 250 Вт), встановлених на даху приміщень під кутом 40° з орієнтацією на південь . Використання трекерів (систем орієнтації за сонцем) недоцільне через високу вартість та складність обслуговування у сільських умовах.

LFP-батареї 60 кВт·год (48 В × 1250 Ач) забезпечують 6000+ циклів при DOD 80%, що відповідає 16-20 рокам експлуатації . Розміщення батарей у утепленому приміщенні з температурою +15°C...+25°C подовжує термін служби на 25-30%.

Гібридний інвертор 8 кВА з вбудованим MPPT-контролером 150 А забезпечує ККД перетворення 96.5% та підтримує паралельну роботу з резервним генератором.

Висновок. Розроблена методологія проектування автономних систем електропостачання сільськогосподарських об'єктів на основі комплексного аналізу профілю навантаження, оптимізації співвідношення ФЕС/батареї та економічних розрахунків LCOE дозволяє забезпечити цілодобове безперебійне електропостачання при капітальних витратах \$35k-55k та терміні окупності 6-9 років. Використання відновлених фотоелектричних модулів знижує інвестиції на 35-40% при збереженні ефективності >90% .

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. Shavelkin A.A., Kruhliak H.V., Gerlici J., Kravchenko K. Management of power consumption in a photovoltaic system with a storage battery connected to the network with multi-zone electricity pricing to supply the local facility own needs. Electrical Engineering & Electromechanics. 2021. №2. P. 36-42.
4. 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