

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції для електрозабезпечення перепелиної ферми ФГ «Джмелик» Роменського району Сумської області»

Виконав

(підпис)

Павло ЧЕРНОБУК

Група

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

Рецензент:

Олена ДОВЖИК

Суми – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу

Павлу ЧЕРНОБУКУ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції для електрозабезпечення перепелиної ферми ФГ «Джмелик» Роменського району Сумської області»
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, к.т.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналітичний огляд стану проблеми; 2. Оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції; 3. Охорона праці; 4. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Павло ЧЕРНОБУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналітичний огляд стану проблеми»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
9.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
10.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
11.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
12.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Павло ЧЕРНОБУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Чернобук П. О. Оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції для електрозабезпечення перепелятника ФГ «Джмелик» Роменського району.

Кваліфікаційна робота на здобуття магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції (ГСЕС), розробленої для електропостачання перепелятника фермерського господарства «Джмелик» Роменського району Сумської області. Робота містить аналітичні, технічні, енергетичні та економічні дослідження, що дозволили комплексно оцінити потенціал використання гібридних систем у аграрному секторі України.

У першому розділі проведено детальний аналіз сучасного стану розвитку гібридних систем електропостачання, принципів їх дії та нормативно-правових вимог до проектування й експлуатації. Встановлено, що поєднання фотоелектричних модулів, систем накопичення енергії та резервних джерел забезпечує стабільне електропостачання споживачів навіть за відсутності напруги в мережі. Особливу увагу приділено технологіям акумулювання енергії, зокрема літій-іонним батареям, які характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії, тривалим терміном служби та стабільністю роботи. Проведений аналіз нормативної бази України (Кодекс систем розподілу, ДСТУ EN 50549, ДСТУ EN 62446-1, серія ДСТУ HD 60364) підтвердив, що впровадження гібридних систем у фермерських господарствах цілком відповідає сучасним вимогам безпеки та енергетичної політики держави.

У другому розділі здійснено оцінку ефективності функціонування гібридної СЕС у реальних умовах. Встановлено, що кліматичні параметри

Роменського району є сприятливими для сонячної генерації: середньорічна глобальна радіація становить 1150–1300 кВт·год/м². Станція демонструє стабільну роботу впродовж усього року, особливо у весняно-літній період, коли сонячна активність збігається з підвищенням електроспоживанням перепелятника. За період спостережень (10 місяців) сукупний виробіток СЕС становив 30 726 кВт·год при загальному споживанні 94 381 кВт·год. Рівень прямого самоспоживання досяг 94,36 %, а загальна енергонезалежність господарства – 32,5 %. Ефективність акумуляторного циклу становить 98,96 %, що свідчить про мінімальні втрати під час зберігання та передачі енергії.

Розраховано, що питомий виробіток становить 614,5 кВт·год/кВт_р за десятимісячний період, що еквівалентно приблизно 737 кВт·год/кВт_р·рік. Отримані результати підтверджують технічну ефективність системи та її здатність суттєво зменшити споживання енергії з централізованої мережі.

У третьому розділі проаналізовано стан охорони праці під час експлуатації гібридних сонячних систем. Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, зокрема можливість ураження електричним струмом, перегріву обладнання, займання та травмування персоналу. Розроблено комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці.

Четвертий розділ присвячено економічному обґрунтуванню впровадження ГСЕС. Власна генерація дозволяє покривати близько третини потреб об'єкта в електроенергії, зменшуючи річні витрати на понад 440 тис. грн. Отриманий рівень енергоефективності та короткий термін окупності свідчать про економічну доцільність інвестицій у гібридні системи для малих аграрних підприємств.

Ключові слова: гібридна сонячна електростанція, фотоелектрична система, відновлювані джерела енергії, енергоефективність, енергетична автономність, фермерське господарство, акумуляторна батарея, енергетичний баланс, SOLARMAN Smart.

ABSTRACT

Chernobuk P. O. Evaluation of the Efficiency of a Hybrid Solar Power Plant for Power Supply of the Quail Farm “Dzhmelyk” in the Romny District.

Qualification work for a master's degree in the educational programme “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics” in the speciality 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics”. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The master's thesis is devoted to studying the efficiency of a hybrid solar power plant (HSPP) developed to supply electricity to the quail house of the “Dzhmelyk” farming enterprise in the Romny District of Sumy Region. The research includes analytical, technical, energy, and economic assessments that comprehensively evaluate the potential of using hybrid systems in the agricultural sector of Ukraine.

The first chapter presents a detailed analysis of the current state of hybrid power supply systems, their operating principles, and regulatory requirements for design and operation. It has been established that combining photovoltaic modules, energy storage systems, and backup sources ensures stable power supply to consumers even in the absence of grid voltage. Special attention is given to energy storage technologies, particularly lithium-ion batteries, which are characterized by high efficiency, long service life, and operational stability. The analysis of Ukraine's regulatory framework (Distribution System Code, DSTU EN 50549, DSTU EN 62446-1, and DSTU HD 60364 series) confirmed that the implementation of hybrid systems in farming enterprises fully complies with modern safety and energy policy requirements.

The second chapter evaluates the performance of the hybrid solar power plant under real operating conditions. It was found that the climatic parameters of the Romny District are favorable for solar generation, with an annual global radiation level of 1150–1300 kWh/m². The station demonstrates stable performance throughout the year, especially in the spring and summer, when solar activity coincides with the quail farm's increased power consumption. During the 10-month observation period,

the total generation of the solar plant amounted to 30,726 kWh, with overall consumption of 94,381 kWh. The level of direct self-consumption reached 94.36%, while the overall energy independence of the facility was 32.5%. The efficiency of the battery cycle reached 98.96%, indicating minimal energy losses during storage and conversion.

The specific generation was calculated as 614.5 kWh/kWp for the ten-month period, equivalent to approximately 737 kWh/kWp per year. These results confirm the technical efficiency of the system and its capability to significantly reduce energy consumption from the centralized grid.

The third chapter analyzes occupational safety during the operation of hybrid solar systems. The main hazardous and harmful factors were identified, including electric shock risk, equipment overheating, fire hazard, and personnel injury. A set of organizational and technical measures was developed to ensure safe working conditions.

The fourth chapter presents the economic justification for the implementation of the hybrid solar power system. The own generation covers about one-third of the facility's electricity demand, reducing annual electricity costs by more than 440,000 UAH. The achieved level of energy efficiency and short payback period prove the economic feasibility of investing in hybrid systems for small agricultural enterprises.

Keywords: hybrid solar power plant, photovoltaic system, renewable energy sources, energy efficiency, energy autonomy, farming enterprise, battery storage, energy balance, SOLARMAN Smart.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	13
1.1. Аналіз сучасних тенденцій розвитку гібридних систем електропостачання	13
1.2. Класифікація та принцип дії гібридних сонячних електростанцій	15
1.3. Аналіз технологій зберігання енергії та використання резервних джерел у гібридних системах	17
1.4. Огляд нормативно-правової бази та вимог до проектування гібридних СЕС в Україні	20
1.6. Характеристика фермерського господарства «Джмелик» та його системи електропостачання	22
1.7. Висновки до розділу 1	23
2. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	25
2.1. Вихідні дані для розрахунків	25
2.1.1. Кліматичні умови регіону	25
2.1.2. Технологічні особливості об'єкта	26
2.1.3. Аналіз добових графіків навантаження перепелятника	26
2.1.4. Аналіз сезонної нерівномірності споживання електроенергії	30
2.2. Загальна характеристика встановленої СЕС	31
2.3. Дослідження функціональної схеми СЕС	32
2.4. Дослідження обладнання гібридної СЕС	35
2.5. Аналіз енергетичних потоків системи за даними SOLARMAN Smart ..	39
2.5.1. Аналіз добового графіку енергетичних потоків	39

	9
2.5.2. Аналіз помісячного графіку енергетичних потоків.....	41
2.5.3. Аналіз загальної структури потоків енергії.....	43
2.5.4. Аналіз ключових показників ефективності	44
2.6. Висновки до розділу 2.....	46
3. ОХОРОНА ПРАЦІ	48
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	53
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

1. Актуальність теми. Сучасний розвиток енергетичної галузі характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Зростання вартості традиційних енергоносіїв, обмеження централізованого електропостачання в окремих регіонах, а також потреба підвищення енергетичної безпеки країни зумовлюють необхідність створення автономних і гібридних систем енергозабезпечення. Впровадження таких систем сприяє підвищенню енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат і зменшенню шкідливих викидів в атмосферу [1; 2].

Особливо актуальним це питання є для сільського господарства, де спостерігаються нерівномірні графіки навантаження і часті перебої електропостачання. Відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні електростанції, забезпечують можливість створення енергонезалежних об'єктів навіть у віддалених районах [3]. Фермерське господарство «Джмелик» Роменського району потребує стабільного електропостачання для роботи перепелятника, систем вентиляції, освітлення, опалення та підтримання мікроклімату. Використання гібридної сонячної електростанції дозволяє забезпечити безперервність електропостачання, зменшити споживання традиційної енергії та підвищити економічну ефективність виробництва. Вивчення ефективності функціонування такої системи є важливим для визначення оптимальних параметрів обладнання, обґрунтування вибору компонентів та розробки рекомендацій щодо підвищення енергоефективності гібридних систем у сільському секторі. Отримані результати можуть бути використані для підвищення енергетичної самостійності фермерських господарств, що відповідає стратегічним напрямкам розвитку енергетики України, передбаченим державними документами [1–3]. Таким чином, тема дипломної роботи є актуальною, оскільки спрямована на вирішення прикладних завдань енергоефективності, енергетичної незалежності та сталого розвитку аграрного виробництва.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Розвиток відновлюваної енергетики є одним із ключових напрямів сучасної науково-технічної політики України. Зростання цін на традиційні енергоносії, екологічні виклики та потреба підвищення енергетичної незалежності стимулюють пошук ефективних і екологічно безпечних рішень, серед яких особливе місце посідають гібридні системи енергозабезпечення [4; 5]. Наукові дослідження зосереджені на вивченні принципів побудови, керування та оптимізації таких систем. Доведено, що поєднання сонячних панелей, акумуляторних батарей і резервних генераторів забезпечує стабільне електропостачання навіть за змінних погодних умов [6; 7]. Ефективність гібридних установок визначається оптимальним підбором потужності фотоелектричних модулів і ємності акумуляторів. Оптимізаційні підходи до проектування таких систем наведено у працях [8; 9], де запропоновано методи моделювання енергетичних балансів із використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Останні дослідження [10; 11] підтверджують доцільність застосування гібридних електростанцій у сільському господарстві, де автономність і надійність електропостачання є критичними для сталого функціонування підприємств. Водночас прикладні аспекти впровадження таких систем для конкретних об'єктів, як-от перепелятники чи фермерські тваринницькі комплекси, залишаються недостатньо опрацьованими, що зумовлює наукову новизну теми даної роботи.

3. Мета дослідження. Метою дослідження є оцінка ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції, призначеної для електрозабезпечення перепелятника фермерського господарства «Джмелик» Роменського району, з урахуванням технічних, енергетичних, економічних та екологічних показників.

4. Об'єкт дослідження –гібридна сонячна електростанція, призначена для електропостачання технологічних споживачів перепелятника фермерського господарства «Джмелик» Роменського району.

5. Предмет дослідження – процеси формування, розподілу та використання електроенергії в гібридній сонячній електростанції, а також методи оцінки її технічної, енергетичної та економічної ефективності при електрозабезпеченні перепелятника фермерського господарства «Джмелик».

6. Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналітичний огляд сучасного стану розвитку гібридних сонячних електростанцій, їх класифікації, принципів дії та особливостей застосування у сільському господарстві;

– оцінити ефективність гібридної сонячної електростанції для електрозабезпечення перепелятника ФГ «Джмелик» Роменського району;

– розробити заходи з охорони праці та безпеки експлуатації під час монтажу та роботи гібридної сонячної електростанції;

– виконати економічне обґрунтування доцільності впровадження гібридної сонячної електростанції у фермерському господарстві та визначити очікуваний економічний ефект.

7. Методи дослідження. У роботі застосовано аналітичний метод для вивчення літературних джерел і нормативних документів з питань побудови гібридних сонячних електростанцій, а також розрахункові методи для визначення потужності фотоелектричних модулів, ємності акумуляторів та енергетичних балансів системи. Для аналізу фактичної роботи гібридної сонячної електростанції використано спеціалізоване програмне середовище SOLARMAN Smart, що забезпечує обробку та візуалізацію даних моніторингу. Елементи економічного аналізу застосовано для оцінки доцільності впровадження системи у виробничих умовах фермерського господарства.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки машинописного тексту, містить 20 рисунків, 2 таблиці, 2 додатки та 37 найменувань джерел у списку літератури.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Аналіз сучасних тенденцій розвитку гібридних систем електропостачання

Гібридні системи електропостачання (Hybrid Renewable Energy Systems, HRES) поєднують сонячні панелі, системи накопичення енергії та резервні джерела, забезпечуючи надійне та безперервне живлення споживачів у будь-яких умовах (рис. 1.1). Їх розвиток зумовлений зростанням частки відновлюваних джерел у світовому енергобалансі, зниженням вартості сонячних технологій і підвищенням попиту на енергетичну автономність [12; 13].

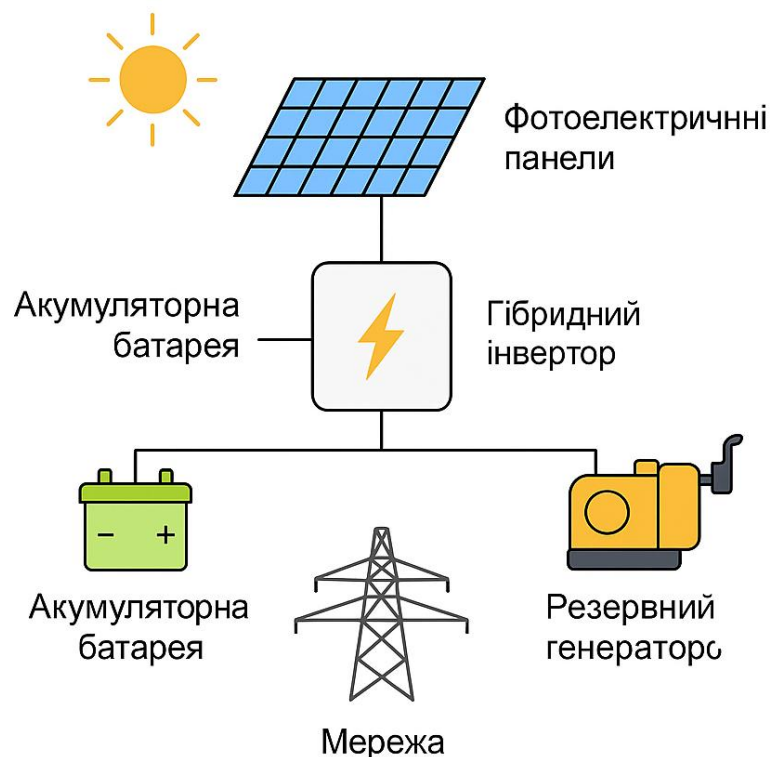


Рис. 1.1. Структурна схема типової гібридної системи електропостачання

За даними IRENA, у 2024 році глобальна встановлена потужність сонячної генерації перевищила 1,6 ТВт, а середня вартість виробництва електроенергії з фотоелектричних систем знизилася на понад 80 % за останнє десятиріччя [13]. Це зробило можливим масове впровадження автономних і

гібридних систем у промисловості, житловому секторі та сільському господарстві.

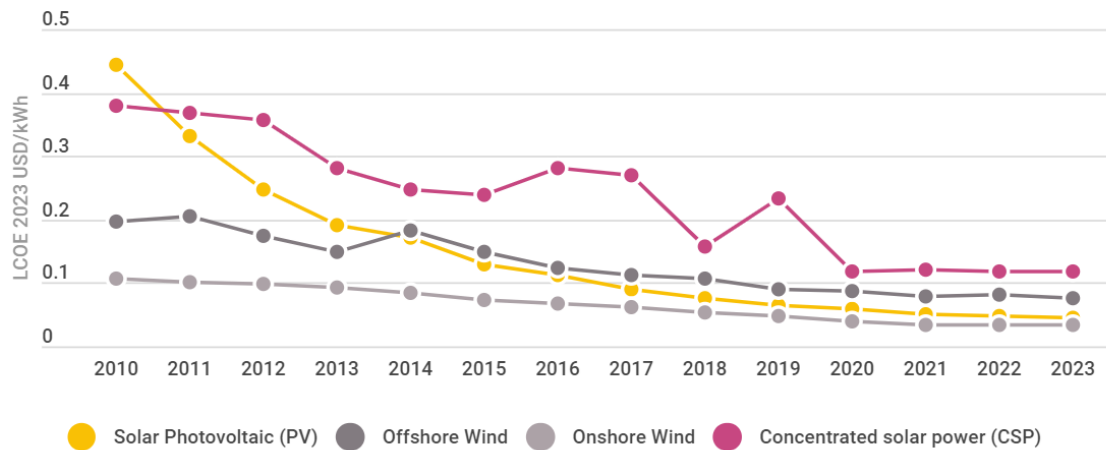


Рис. 1.2. Динаміка зниження собівартості сонячної електроенергії у 2010–2024 рр.

Джерело: IRENA, Renewable Power Generation Costs 2024

Суттєвим чинником розвитку HRES є прогрес у технологіях зберігання енергії. Згідно з оцінками NREL, вартість літій-іонних акумуляторних систем до 2030 р. може знизитися ще на 40 %, що зробить комбінацію PV + Battery економічно конкурентною навіть для малих споживачів [14].

У наукових дослідженнях [15; 16] підкреслюється важливість оптимізації співвідношення потужностей між генераторами, накопичувачами та навантаженням. Застосування програмного забезпечення HOMER і PVsyst дозволяє моделювати енергетичні процеси, прогнозувати виробіток електроенергії та оцінювати економічну доцільність систем.

В українському контексті гібридні установки набувають особливого значення як засіб підвищення енергетичної безпеки та стійкості сільських територій. Урядові програми до 2030 р. передбачають активне впровадження відновлюваних і автономних систем, зокрема у фермерських господарствах, що відповідає європейському курсу на децентралізацію енергопостачання [17].

Отже, сучасні тенденції розвитку гібридних систем електропостачання характеризуються поєднанням технологічного прогресу, економічної доцільності та стратегічної ролі у забезпеченні стійкої енергетики для віддалених і сільськогосподарських споживачів..

1.2. Класифікація та принцип дії гібридних сонячних електростанцій

Гібридна сонячна електростанція – це енергетична система, у якій сонячні фотоелектричні модулі поєднані з іншими джерелами генерації (дизель- або вітровими установками) та системами накопичення енергії. Така комбінація забезпечує стабільне електропостачання за будь-яких погодних або навантажувальних умов, підвищуючи надійність і енергоефективність системи [18].

Принцип роботи гібридної електростанції полягає у тому, що основне електроживлення здійснюється від сонячних панелей, які перетворюють сонячну енергію на постійний струм. Отримана енергія через контролер заряду подається до акумуляторних батарей, де накопичується, та до гібридного інвертора, який перетворює постійний струм у змінний для живлення споживачів. У разі дефіциту сонячної генерації або розряду акумуляторів система автоматично підключає резервний генератор або зовнішню електромережу [19].

За принципом побудови та підключення до мережі гібридні сонячні електростанції поділяють на три основні типи [20; 21]:

- Автономні (off-grid) – повністю незалежні від централізованої мережі, працюють у замкнутому циклі з накопиченням енергії в акумуляторах;
- Мережеві з резервним джерелом (grid-tied with backup) – працюють паралельно з електромережею, забезпечуючи живлення споживачів від сонячних панелей і акумуляторів, а в разі потреби – від мережі або генератора;

- Гібридні з пріоритетом ВДЕ (smart-hybrid) – системи з інтелектуальним керуванням, які автоматично регулюють джерела живлення залежно від часу доби, навантаження та рівня заряду батарей.

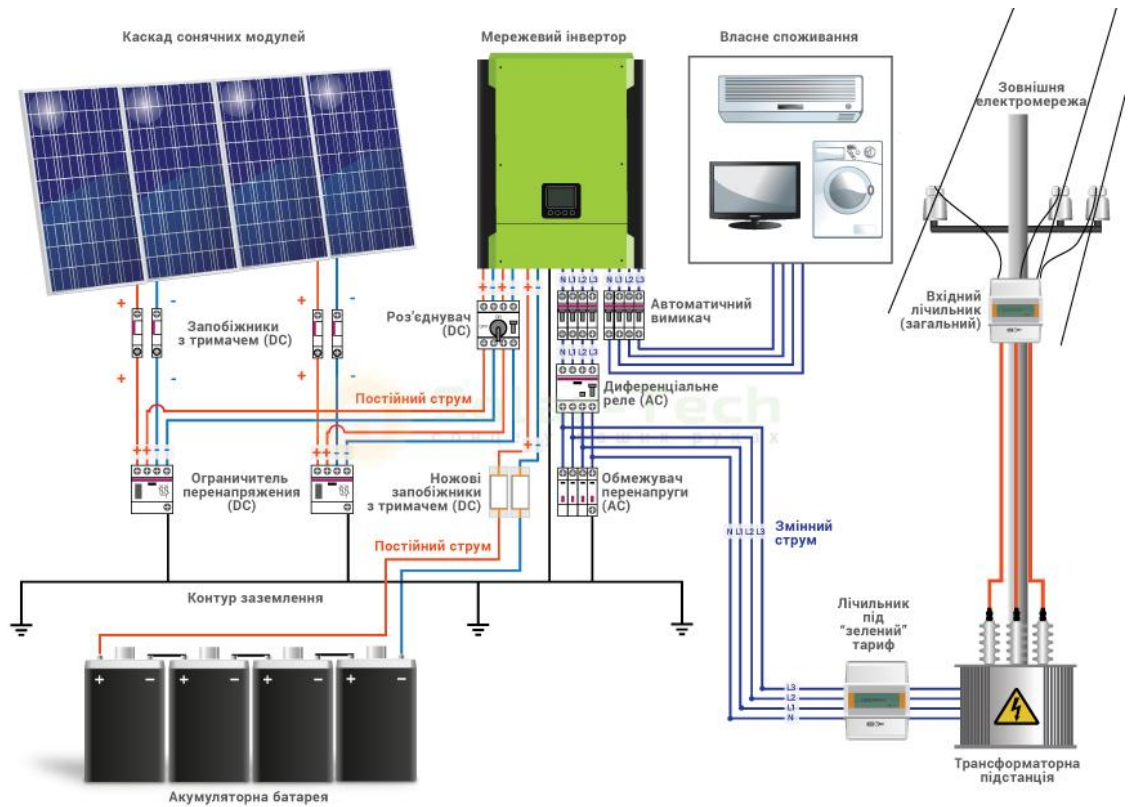


Рис 1.3. Схема роботи гібридної СЕС

Основними перевагами гібридних систем є висока надійність, стабільність напруги, можливість зниження споживання енергії з централізованої мережі та екологічна безпечність.

Серед недоліків – більша початкова вартість через наявність аккумуляторного блоку та складніша система керування.

Загалом гібридні сонячні електростанції є оптимальним рішенням для аграрного сектору, де важливо забезпечити безперебійне живлення об'єктів, таких як пташники, перепелятники та склади з мікрокліматичними установками [22].

1.3. Аналіз технологій зберігання енергії та використання резервних джерел у гібридних системах

Ефективність роботи гібридних сонячних електростанцій значною мірою визначається якістю та типом системи накопичення енергії, а також надійністю резервного джерела. Сучасні гібридні комплекси поєднують сонячну генерацію, акумуляторні батареї та допоміжні генератори для забезпечення стабільного електропостачання за будь-яких погодних чи експлуатаційних умов. Основне завдання системи накопичення – згладити коливання між виробництвом та споживанням електроенергії, що особливо важливо для об'єктів із постійним добовим навантаженням, таких як перепелятники чи птахоферми [23].

Системи зберігання енергії поділяються за принципом дії на електрохімічні, механічні, термальні та електричні (рис. 1.3).

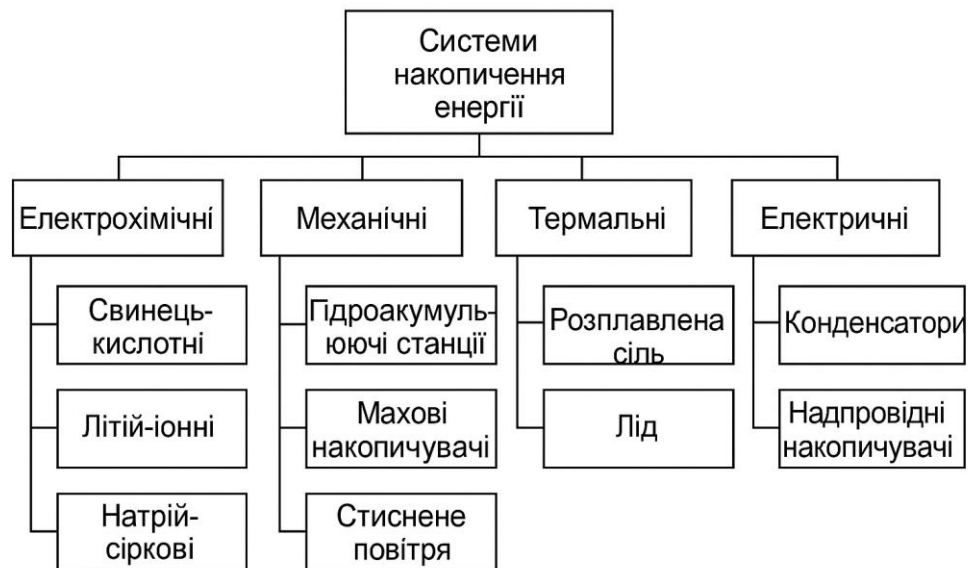


Рис. 1.4 – Класифікація сучасних систем накопичення енергії

Джерело: Fraunhofer ISE, Energy Storage Overview, 2023.

Для малих і середніх гібридних сонячних електростанцій найбільш поширеними є електрохімічні акумулятори через їхню ефективність, простоту інтеграції та високий коефіцієнт корисної дії [24]. У практиці енергетики

застосовуються свинцево-кислотні, літій-іонні, літій-залізо-фосфатні та натрій-іонні системи. Серед них найбільш перспективними для автономних і гібридних установок є літій-іонні батареї, які мають ККД до 95 %, довговічність понад 6000 циклів і стійкість до температурних коливань. Такі системи активно впроваджуються в енергетичних проєктах України, зокрема компанією ДТЕК, а також у сільському господарстві, де забезпечують надійну роботу вентиляційних і кліматичних установок [25; 26].

Окрім електрохімічних систем, у світовій практиці застосовуються механічні накопичувачі енергії – гідроакumuлюючі станції, махові системи та сховища стислого повітря. Вони використовуються переважно у великих енергетичних об'єктах, тоді як для невеликих гібридних систем такі рішення є економічно недоцільними. Тому для сільськогосподарських споживачів оптимальним вибором залишаються акумуляторні батареї з автоматизованим керуванням зарядом і розрядом.

Резервні джерела енергії відіграють важливу роль у забезпеченні безперервної роботи системи в умовах відсутності сонячного випромінювання або повного розряду акумуляторів. Найчастіше для цього використовуються дизельні або бензинові генератори, які автоматично запускаються через систему керування інвертором. У сучасних схемах реалізовано функцію автоматичного запуску генератора (AGS), що дозволяє економно витратити паливо і продовжувати роботу установки у разі аварійного відключення мережі (рис. 1.5).

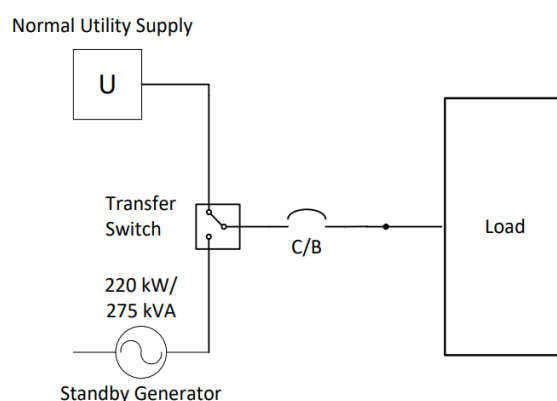


Рисунок 1.5 – Типова схема резервного живлення у гібридній системі

Джерело: NREL, Microgrid Design Handbook, 2023.

Ключовим елементом у структурі гібридної системи є контролер енергоменеджменту (Energy Management System, EMS), який координує потоки енергії між сонячними модулями, акумуляторними батареями, резервним джерелом та споживачами. Контролер працює за алгоритмом пріоритетного використання енергії з відновлюваних джерел і підтримує стабільну роботу системи навіть у разі зміни погодних умов або навантаження.

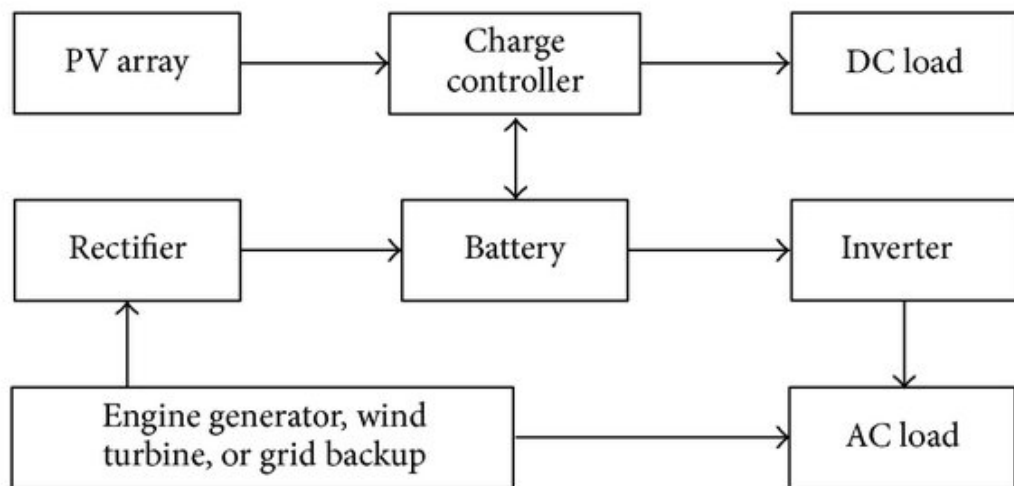


Рисунок 1.7 – Принцип енергетичного керування у гібридній сонячній електростанції

Джерело: IEA PVPS, Technical Report T15-09: Hybrid PV Systems, 2023.

Моніторинг і аналіз параметрів системи здійснюється за допомогою спеціалізованих програмних платформ. У даній роботі використовується програмне середовище SOLARMAN Smart, яке дозволяє відстежувати виробіток, споживання, стан зарядження акумуляторів і роботу резервного генератора у реальному часі. Застосування таких інструментів підвищує ефективність експлуатації системи та дає змогу проводити її енергетичний аудит без додаткових вимірювань.

Таким чином, гібридні системи з акумуляторними батареями та резервними джерелами забезпечують високу стабільність і надійність

енергопостачання. Використання літій-іонних накопичувачів у поєднанні з дизельними генераторами дозволяє оптимізувати витрати енергії, зменшити споживання палива та забезпечити безперебійну роботу енергоустановки фермерського господарства незалежно від погодних умов.

1.4. Огляд нормативно-правової бази та вимог до проєктування гібридних СЕС в Україні

Проєктування, підключення та експлуатація гібридних сонячних електростанцій в Україні регулюються поєднанням національних кодексів ринку електроенергії, правил підключення до мереж, вимог до комерційного обліку, а також гармонізованих з ІЕС/EN стандартів на фотоелектричні системи та електроустановки будівель. Базовими документами для стадій «проєктування – приєднання – облік – експлуатація» виступають Кодекс систем розподілу (КСР), який визначає технічні умови та процеси приєднання генерувальних установок до мереж ОСР, включно з вимогами до паралельної роботи, захистів та параметрів якості електроенергії [30], Правила роздрібного ринку електричної енергії (ПРРЕЕ) – для взаємовідносин із постачальником та ОСР, договірних процедур і приєднання побутових/непобутових установок [31], а також Кодекс комерційного обліку електричної енергії (ККОЕЕ) – для вимог до вузлів обліку, класів точності, каналів передачі даних та реєстрації генерації/споживання у розрахунках ринку [32]. КСР та ПРРЕЕ регулярно оновлюються НКРЕКП; зміни 2023–2025 років, серед іншого, деталізували процедури приєднання розподіленої генерації та технологічні вимоги до джерел, що працюють паралельно з мережею [35; 10].

Технічне підґрунтя для безпосереднього проєктування PV-частини задають гармонізовані національні стандарти. ДСТУ EN 62446-1:2022 (ІЕС 62446-1) встановлює вимоги до документації, пусконаладжувальних випробувань і перевірок мережевих фотоелектричних систем, включно з протоколами вимірювань (ізоляційний опір, безперервність, характеристика

I–V, вимоги до табличок/маркування тощо) – це основний стандарт для введення СЕС в експлуатацію та формування «паспорта» установки [28]. Вимоги до вибору та встановлення електрообладнання у будівлях, систем захисту, заземлення, маркування і т. ін. містяться у серії ДСТУ HD 60364, зокрема у частині 5-51 щодо загальних правил вибору та монтажу обладнання, яка застосовується до низьковольтних електроустановок, у т. ч. до інверторних та акумуляторних підсистем гібридних СЕС [29].

Окремо для паралельної роботи з розподільчими мережами застосовуються європейські вимоги, гармонізовані в Україні: ДСТУ EN 50549-1:2022 (для під'єднання до мереж НН до типу установки В включно) і ДСТУ EN 50549-2:2022 (для мереж СН), які регламентують функції захисту й операційні можливості генерувальних установок – вимкнення при аномаліях напруги/частоти, вимоги до fault-ride-through, первинного регулювання, реактивної потужності, антиострівного захисту, випробувань і сертифікації [33; 34]. На практиці саме пакети EN 50549 разом із КСР визначають, яким чином гібридна СЕС (PV+АКБ+генератор) може працювати синхронно з мережею ОСР і в яких режимах допускається її автономна робота із застосуванням АВР/мікромережевих сценаріїв.

З огляду на експлуатаційну та електробезпекову складові, діють Правила безпечної експлуатації електроустановок (НПАОП 40.1-1.01-97) і Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98), що визначають організаційні та технічні заходи безпеки під час монтажу, налагодження, технічного обслуговування та експлуатації електроустановок – у т. ч. фотоелектричних, інверторних та акумуляторних підсистем гібридних СЕС [36; 37]. Для вузлів обліку й схем вимірювання/реєстрації генерації та відпуску застосовуються норми ККОЕЕ [32], а вимоги до взаємодії з ОСР – за КСР і ПРРЕЕ [30; 31].

Підсумовуючи, нормативна рамка для гібридних СЕС складається з ринково-регуляторних кодексів НКРЕКП (КСР, ПРРЕЕ, ККОЕЕ) та гармонізованих технічних стандартів (EN 62446-1, HD 60364, EN 50549-1/-2),

які разом визначають обов'язкові вимоги до безпеки, документування, випробувань, підключення, обліку та експлуатації. Дотримання цієї бази на етапах проектування і введення в експлуатацію є критичним для правомірної та надійної роботи гібридної сонячної електростанції фермерського господарства.

1.6. Характеристика фермерського господарства «Джмелик» та його системи електропостачання

Фермерське господарство «Джмелик» розташоване в Роменському районі Сумської області. Основним напрямом діяльності підприємства є вирощування та утримання перепелів для отримання м'яса та яєць, а також реалізація готової продукції місцевим торговельним мережам. Господарство функціонує як комплекс, що включає перепелятник, інкубаційне відділення, кормоцех, холодильну камеру, склад кормів та адміністративно-побутові приміщення.

Виробничі процеси на підприємстві характеризуються безперервним циклом, оскільки утримання птиці вимагає постійного підтримання мікроклімату – температури, вологості, вентиляції та освітлення. Електроенергія використовується для живлення систем опалення, вентиляційних агрегатів, освітлювальних приладів, автоматизованих годівниць, насосного обладнання та систем контролю температури. Основні споживачі належать до категорії перемінного навантаження з добовими піками у ранковий (6:00–9:00) та вечірній (17:00–22:00) періоди.

На території ферми діє власна трансформаторна підстанція типу КТП-400/10/0,4 кВ, що забезпечує зниження напруги з мережі середньої напруги до побутового рівня 0,4 кВ. Підключення здійснено до мереж АТ «Сумиобленерго» через трифазну лінію довжиною близько 400 м. Система внутрішнього електропостачання побудована за радіальною схемою з окремими групами споживачів: технологічне обладнання, освітлення,

вентиляція та резервні лінії. Розподіл навантаження виконується через головний розподільчий щит (ГРЩ) та групові щити у приміщеннях.

Загальне середньодобове споживання електроенергії в залежності від пори року становить близько 250–700 кВт·год. У структурі споживання близько 40 % припадає на системи вентиляції, 25 % – на освітлення, 20 % – на опалювальні прилади (у холодний період), решта – на допоміжне обладнання та адміністративні потреби.

На сьогоднішній день електропостачання господарства здійснюється виключно з централізованої мережі. У разі аварійних відключень використовують переносний дизель-генератор потужністю 10 кВт, який забезпечує лише мінімальні технологічні потреби. Це створює ризики для життєдіяльності поголів'я у разі тривалих перебоїв з живленням, особливо взимку. Крім того, значна частина споживання припадає на години пікового навантаження, що підвищує тарифне навантаження та експлуатаційні витрати.

Таким чином, впровадження гібридної сонячної електростанції на базі фермерського господарства «Джмелик» є технічно та економічно доцільним рішенням. Це дозволить забезпечити стабільне електропостачання перепелятника, зменшити залежність від мережі, оптимізувати витрати на електроенергію та підвищити енергетичну автономність підприємства.

1.7. Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасного стану розвитку гібридних систем електропостачання, принципів їх дії, нормативно-правових вимог і особливостей застосування у фермерських господарствах. Проаналізовано основні тенденції світового та національного розвитку відновлюваної енергетики, що свідчать про стрімке зростання встановлених потужностей сонячних електростанцій і поширення технологій накопичення енергії. На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки.

1. Визначено, що гібридні сонячні електростанції є одним із найефективніших рішень для забезпечення стабільного електропостачання об'єктів аграрного сектору. Поєднання фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей та резервних джерел дозволяє оптимізувати енергобаланси, підвищити надійність живлення і зменшити споживання електроенергії з мережі.

2. Досліджено сучасні технології зберігання енергії, серед яких найбільш придатними для використання у малих автономних системах визнано літій-іонні акумулятори завдяки високому коефіцієнту корисної дії, тривалому ресурсу та надійності. Розглянуто принципи роботи резервних джерел, автоматизованих систем керування та моніторингу, зокрема використання програмного середовища SOLARMAN Smart для аналізу фактичної роботи СЕС.

3. Окрему увагу приділено огляду нормативно-правової бази України, що регламентує проектування, підключення та експлуатацію гібридних систем. Визначено, що основними документами є Кодекс систем розподілу, ДСТУ EN 50549, ДСТУ EN 62446-1, серія ДСТУ HD 60364 та правила безпечної експлуатації електроустановок. Дотримання цих вимог є обов'язковою умовою для введення об'єктів у експлуатацію.

4. Проведено характеристику фермерського господарства «Джмелик», визначено його основні електричні навантаження, структуру електропостачання та середньодобове споживання електроенергії. Встановлено, що існуюча система живлення повністю залежить від мережі, а використання резервного генератора має обмежені можливості. Це обґрунтовує необхідність розроблення гібридної сонячної електростанції, яка забезпечить енергетичну автономність і зниження витрат на електроенергію.

2. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1. Вихідні дані для розрахунків

Для оцінки ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції (ГСЕС), призначеної для електропостачання перепелятника фермерського господарства «Джмелик», використано кліматичні, енергетичні та технологічні характеристики, що відображають реальні умови експлуатації об'єкта в Роменському районі Сумської області.

2.1.1. Кліматичні умови регіону

Роменський район характеризується помірно континентальним кліматом із теплим літом і відносно м'якою зимою. Середньорічна температура повітря становить $+8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура липня – $+19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, січня – $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За даними IRENA Global Solar Atlas (рис. 2.1), середньорічна кількість сонячних годин становить 1850–1950 год/рік, а глобальна сонячна радіація – 1150–1200 кВт·год/м²·рік на горизонтальну поверхню.

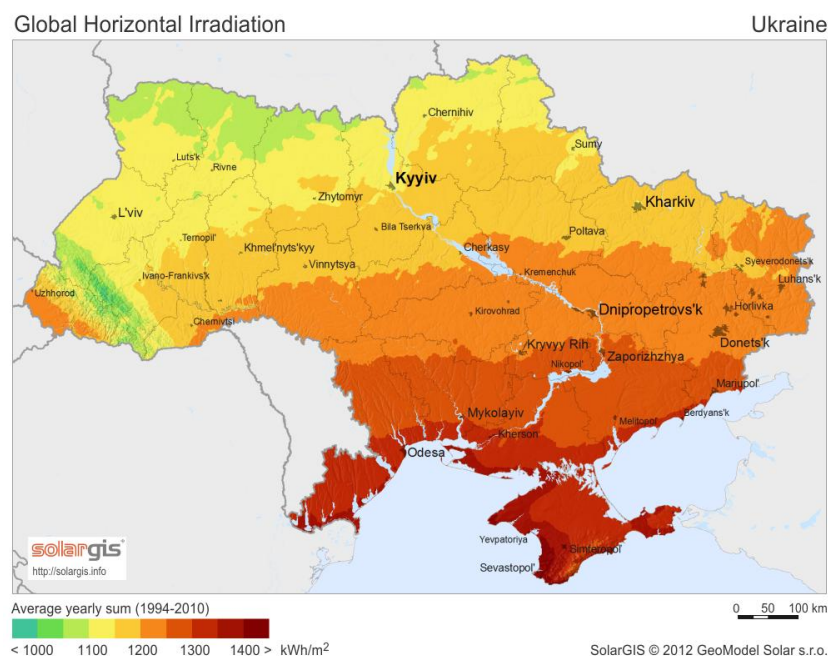


Рисунок 2.1 – Розподіл сонячної радіації на території України

Для панелей, встановлених під оптимальним кутом $35\text{--}37^\circ$ з орієнтацією на південь, цей показник збільшується до ≈ 1300 кВт·год/м²·рік, що забезпечує сприятливі умови для генерації електроенергії протягом усього року [38].

Найбільший рівень інсоляції спостерігається з квітня по вересень, коли кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню, становить понад 150 кВт·год/м² на місяць. В осінньо-зимовий період генерація знижується приблизно на 40–50 %.

2.1.2. Технологічні особливості об'єкта

Виробничий процес перепелятника базується на підтриманні стабільних параметрів мікроклімату, необхідних для вирощування птиці. Робота систем вентиляції, освітлення та опалення відбувається цілодобово. Температура всередині приміщення має підтримуватись у межах $+20\dots+25$ °С, а відносна вологість – 55–65 %.

Енергозабезпечення здійснюється від трифазної мережі 0,4 кВ, підключеної до КТП 400/10/0,4 кВ. Існуюча система електропостачання не має автоматичного резервування; при аварійних відключеннях застосовується дизель-генератор потужністю 10 кВт, якого недостатньо для забезпечення всіх технологічних потреб.

З огляду на це, для фермерського господарства доцільно впровадити гібридну систему «сонячні панелі + акумуляторна батарея + мережа», яка дозволить забезпечити безперебійне живлення технологічного обладнання, зменшити споживання енергії з мережі та стабілізувати витрати на електроенергію протягом року.

2.1.3. Аналіз добових графіків навантаження перепелятника

Перепелятник фермерського господарства «Джмелик» функціонує в безперервному режимі, тому потреба в електроенергії має сезонний характер.

За результатами енергетичного обстеження встановлено, що середньодобове споживання становить від 250 до 700 кВт·год, залежно від пори року. Типовий графік навантаження для літнього та зимового періоду показаний на рис. 2.1.



а



б

Рисунок 2.2 – Типовий добовий графік електроспоживання перепелятника ФГ «Джмелик»: *а* – зима (16.01.2025); *б* – літо (17.08.2025)

Перепелятник ФГ «Джмелик» функціонує в цілодобовому режимі, тому навантаження має сталий характер, проте споживання електроенергії суттєво залежить від пори року. За результатами енергетичного обстеження встановлено, що взимку середньодобове споживання становить близько 250 кВт·год, тоді як у літній період воно зростає до 700 кВт·год/добу (рис. 2.1).

Підвищене літнє споживання зумовлене інтенсивною роботою систем вентиляції, охолодження повітря, освітлення та водопостачання. Узимку

енергоспоживання зменшується через меншу кількість вентиляційних циклів і нижче навантаження на системи кондиціонування, тоді як частку енергії споживає електроопалення.

Із графіку рис. 2.1,а видно, що середня потужність споживання становить 8–10 кВт, із коливаннями в межах від 5 до 20 кВт. Порівняно з літнім періодом, рівень споживання суттєво нижчий, що пояснюється зменшенням навантаження на системи вентиляції та охолодження, які влітку працюють практично безперервно.

У часовому інтервалі з 08:00 до 18:00 спостерігається помірне підвищення потужності – до 15–20 кВт, що збігається з активною фазою роботи допоміжного обладнання, освітлення та годівельних систем. Вночі (00:00–06:00) навантаження знижується до 5–8 кВт, однак споживання не припиняється повністю, адже постійно працюють системи підтримання температури та вологості в приміщенні.

Характер графіка рис. 2.1, а свідчить про відносну стабільність споживання без різких стрибків потужності, що властиво об'єктам із безперервним циклом утримання тварин. Добовий профіль є рівномірним, із невеликими піками, обумовленими вмиканням обігрівальних і освітлювальних приладів у ранкові та вечірні години.

Орієнтовне добове споживання електроенергії становить 240–260 кВт·год, що підтверджує сезонне зниження енергопотреби у зимовий період. Середній коефіцієнт нерівномірності навантаження не перевищує 1,5, тобто режим роботи обладнання є стабільним і прогнозованим.

У контексті проектування гібридної сонячної електростанції важливо відзначити, що зимовий профіль характеризується помірним споживанням при низькому рівні сонячної генерації. Це потребує збільшення частки енергії, що надходитиме з акумуляторних батарей і резервного генератора, для забезпечення безперервного живлення систем життєзабезпечення перепелятника.

Аналіз графіку навантаження в літній період (рис. 2.1, б) показує зміну миттєвої потужності споживання протягом доби. Середня потужність знаходиться в межах 25–30 кВт, із характерними коливаннями, що обумовлені циклічною роботою вентиляційного та холодильного обладнання.

У часовому інтервалі з 08:00 до 18:00 спостерігається найвищий рівень навантаження, який коливається в діапазоні 30–45 кВт, а короточасні піки сягають до 50 кВт. Саме цей період збігається з фазою максимальної сонячної генерації, що свідчить про ефективність використання фотоелектричних панелей для покриття активного денного споживання.

У нічний період (00:00–05:00) навантаження знижується до 18–22 кВт, але не падає до нуля, що підтверджує постійне енергоспоживання – роботу систем підтримання мікроклімату, інкубаційних камер і чергового освітлення. Після 21:00 відбувається поступове зниження потужності до 20–25 кВт, тобто споживання має плавний нічний мінімум без різких спадів.

Загальний добовий профіль свідчить про переважно рівномірне навантаження із денними піками, що характерно для тваринницьких підприємств із безперервним циклом роботи. Такий режим створює сприятливі умови для застосування гібридної сонячної установки з акумуляторним накопиченням: денна генерація може покривати більшу частину активного споживання, а надлишок енергії акумулюватиметься для використання у вечірні та нічні години.

Орієнтовне добове споживання електроенергії за графіком становить 650–700 кВт·год, що узгоджується з фактичними вимірами у літній період. Середній коефіцієнт нерівномірності навантаження (відношення максимальної до середньої потужності) становить приблизно 1,7, що свідчить про відносно стабільний режим роботи обладнання.

Таким чином, графік демонструє, що літній режим роботи перепелятника є найбільш енергоємним, але водночас найсприятливішим для використання сонячної генерації, оскільки період максимального споживання збігається з піковими годинами інсоляції. Це забезпечує високий коефіцієнт використання

встановленої потужності фотоелектричної установки та мінімізує обсяг енергії, яку необхідно накопичувати в акумуляторах.

2.1.4. Аналіз сезонної нерівномірності споживання електроенергії

Графік споживання електроенергії перепелятником ФГ «Джмелик» по місяцям показано на рис. 2.2.

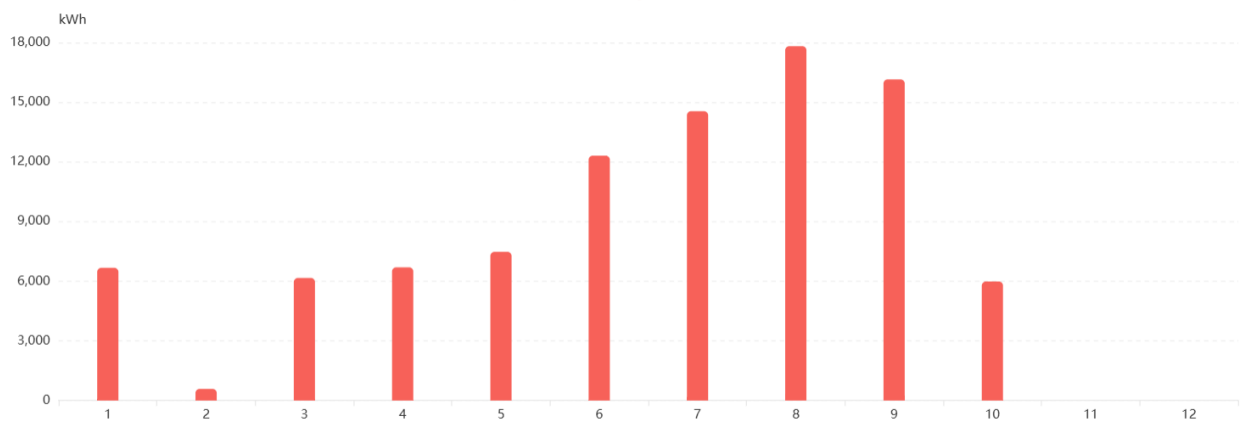


Рис. 2.2. Помісячне споживання електроенергії перепелятником (2025 рік)

Аналіз рис. 2.2. показує, що найменше навантаження спостерігається у лютому (2-й місяць), де споживання становить лише близько 1000 кВт·год. У цей період температура зовнішнього повітря є найнижчою, проте зменшується інтенсивність роботи вентиляційних і холодильних систем, що пояснює низький рівень енергопотреби.

Починаючи з березня–квітня, споживання поступово зростає, досягаючи 6 000–7 000 кВт·год на місяць. Це пов'язано зі збільшенням тривалості світлового дня, інтенсивнішою вентиляцією та активізацією виробничих процесів у перепелятнику.

Пікові значення споживання спостерігаються у червні–вересні (6–9 місяці), коли електроспоживання сягає 13000–18000 кВт·год на місяць. Це пояснюється підвищеними температурами навколишнього середовища, що потребують безперервної роботи систем охолодження, вентиляції та контролю

мікроклімату. У цей період навантаження на електричні мережі максимальне – споживання у 2,5–3 рази перевищує зимові показники.

Після вересня спостерігається різке зниження споживання: у жовтні воно становить близько 6 000 кВт·год, а в листопаді–грудні дані практично відсутні або мінімальні, що може бути пов'язано з неповним виробничим циклом чи простоем частини обладнання.

Таким чином, річний профіль споживання електроенергії має виражений літній максимум і зимовий мінімум. Середнє річне споживання можна оцінити в 110–120 тис. кВт·год/рік.

Цей розподіл підтверджує доцільність використання гібридної сонячної електростанції саме для компенсації високого літнього навантаження, коли генерація від фотоелектричних модулів досягає максимальних значень і збігається за фазою з найбільшими потребами перепелятника. У зимовий період, коли генерація знижується, основну функцію забезпечення живлення виконуватимуть акумуляторна система та мережа.

2.2. Загальна характеристика встановленої СЕС

На фермерському господарстві «Джмелик» уже встановлена мережева фотоелектрична установка сумарною потужністю 50 кВт. Її цільове призначення – зменшення витрат на електроенергію за рахунок власного виробітку у світлий час доби та часткове покриття пікових режимів споживання (згладжування денних піків навантаження), а не повне автономне енергозабезпечення об'єкта.

З урахуванням добових профілів споживання, у літній період (коли навантаження максимальне, а інсоляція найвища) СЕС покриває значну частину денного споживання, зменшуючи обсяги покупки електроенергії з мережі та піковий імпорт потужності. У зимовий період роль СЕС зводиться переважно до часткового денного підживлення базового навантаження, тоді як

критичні та нічні споживачі забезпечуються з мережі (та/або резервного джерела).

Таким чином, наявна СЕС 50 кВт виконує функції:

- економії шляхом підвищення частки самоспоживання у денні години та скорочення закупівлі енергії з мережі;
- піковідсікання (peak-shaving) у періоди найбільших денних навантажень, що знижує витрати, пов'язані з піковою потужністю;
- покращення енергобалансу влітку, коли часовий профіль генерації найбільш узгоджений із профілем споживання перепелятника.

Проект не передбачає повної енергетичної автономності: основним джерелом безперервного живлення залишаються розподільчі мережі (за потреби – з резервним генератором/UPS для критичних ліній).

Подальша оцінка ефективності в розділі 2 виконуватиметься за фактичними даними SOLARMAN Smart (Production/Consumption, Feed-in/Purchasing, Charging/Discharging, SoC) з розрахунком показників самоспоживання та енергонезалежності, ефекту піковідсікання і річної економії.

2.3. Дослідження функціональної схеми СЕС

На території фермерського господарства «Джмелик» функціонує мережева гібридна сонячна електростанція (СЕС) потужністю 50 кВт, інтегрована до системи електропостачання перепелятника. Станція спроектована для зменшення споживання електроенергії з мережі та покриття пікових денних навантажень у період інтенсивної роботи вентиляційного та холодильного обладнання.

СЕС побудована за гібридною схемою типу «PV + АКБ + мережа», що забезпечує можливість паралельної роботи фотоелектричних модулів і акумуляторної батареї, а також автоматичне перемикання режимів заряд–розряд під контролем інвертора.

Функціональна схема роботи гібридної сонячної (рис. 2.3) електростанції передбачає послідовне перетворення енергії від фотоелектричних модулів до внутрішньої мережі споживача з можливістю накопичення надлишків у батареї. При недостатній сонячній генерації система автоматично залучає енергію з акумуляторів або мережі, забезпечуючи стабільність живлення технологічного обладнання перепелятника. Така архітектура дозволяє оптимізувати баланс генерації й споживання, зменшити обсяг енергії, придбаной в мережі, та підвищити ефективність енергопостачання підприємства.

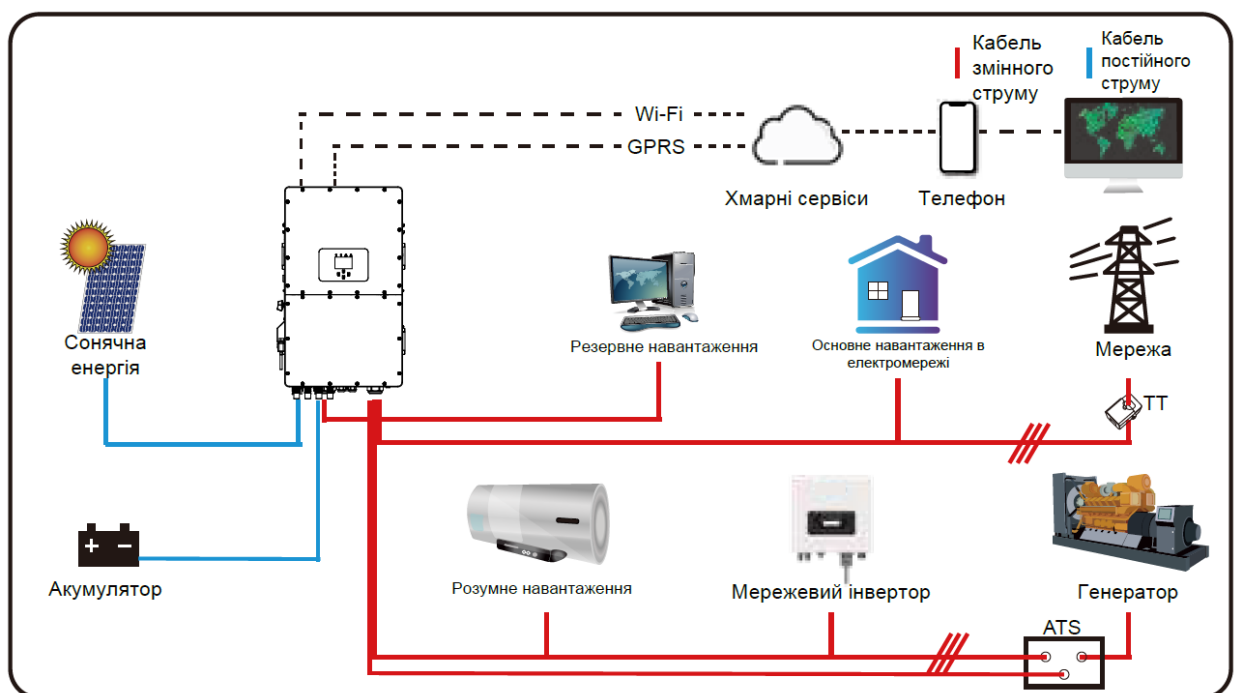


Рис. 2.3. Базова архітектура системи енергозабезпечення перепелятника від сонячної електростанції

Принципова електрична схема вмикання обладнання СЕС в мережу перепелятника та приєднання до зовнішньої мережі показана на рис. 2.4.

Трифазний інвертор 230/400 В із чистою синусоїдою забезпечує стабільне електропостачання споживачів у системах із комбінованими джерелами енергії. Він призначений для роботи як у мережевому, так і в автономному режимах, підтримуючи самостійне споживання енергії з подальшою

можливістю подачі надлишків у загальну електромережу. Пристрій оснащений функцією автоматичного перезапуску після відновлення змінного струму, що гарантує безперервність живлення навіть після збоїв у системі.

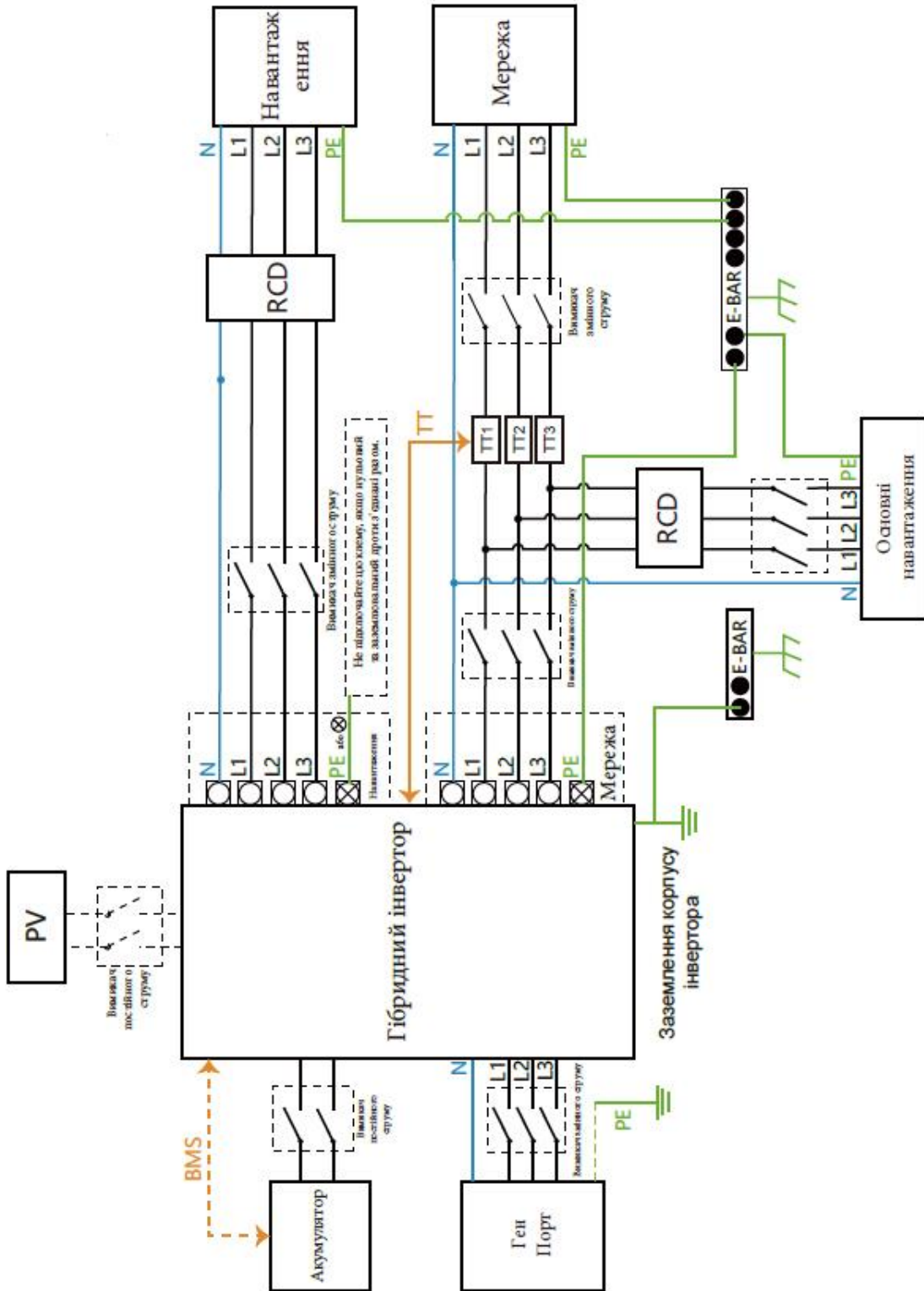


Рис. 2.4. Принципова електрична схема вмикання обладнання СЕС в мережу перепелятника

Інвертор дозволяє програмувати пріоритети живлення між акумулятором, мережею, сонячними панелями або генератором, а також вибирати один із кількох режимів роботи: від мережі, без мережі чи у режимі джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Через вбудований РК-дисплей користувач може задавати параметри струму та напруги заряду акумулятора залежно від типу батареї та умов експлуатації, а також налаштовувати послідовність заряджання від різних джерел енергії.

Конструкція інвертора передбачає використання вбудованого MPPT-контролера з розумною тріступеневою системою заряджання, що забезпечує оптимальну продуктивність та довговічність акумуляторів. Завдяки функції обмеження надлишкової генерації пристрій запобігає надмірному надходженню енергії в мережу, а також підтримує можливість моніторингу через Wi-Fi. Наявність двох вхідних ланцюгів для одного або двох MPPT-трекерів дозволяє підключати декілька рядів сонячних модулів для підвищення ефективності роботи системи.

Інвертор характеризується високим рівнем захисту від перевантаження, перегріву та короткого замикання, сумісний із мережею змінного струму та автономними генераторами. Завдяки функціям часу використання та розумного навантаження система здатна оптимізувати споживання енергії відповідно до тарифів і поточного балансу потужності. Таким чином, інвертор є ключовим елементом сучасної гібридної енергетичної системи, що забезпечує ефективне, безпечне та гнучке енергопостачання споживачів.

2.4. Дослідження обладнання гібридної СЕС

Основним перетворювальним пристроєм є інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-VM4 (рис. 2.5), який забезпечує роботу системи у паралельному режимі з мережею, а також можливість зарядження та розрядження батареї в автоматичному режимі. Інвертор підтримує режими «On-grid», «Off-grid» та «Hybrid», має чотири незалежні MPPT-треки, максимальний ККД 98,6 %, і

підключений до мережі 0,4 кВ через головний розподільчий щит підприємства.

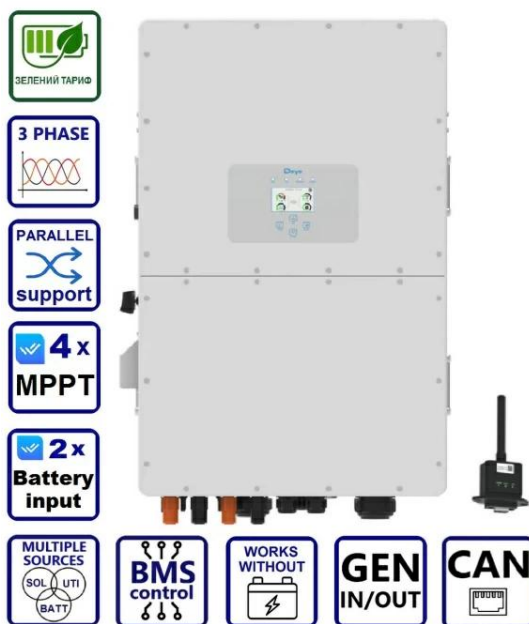


Рис. 2.5. Інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4

Контроль за роботою здійснюється через систему моніторингу SOLARMAN Smart, що фіксує дані генерації, споживання, обміну з мережею та стану батареї.

Акумуляторна система складається з шести літій-іонних модулів BOS-GM5.1 (рис. 2.6.), кожен з яких має ємність 5,12 кВт·год. Сумарна енергоемність становить близько 30,7 кВт·год при робочій напрузі 700 В.



Рис. 2.6. Літій-іонний модуль BOS-GM5.1

Заряд і розряд акумуляторів контролюються блоком керування HVB750V/100A-EU (рис. 2.7), який виконує функції системи BMS,

забезпечуючи балансування комірок, захист від перенапруги та комунікацію з інвертором. Така конфігурація дозволяє згладжувати короточасні піки навантаження та частково резервувати живлення для критичних споживачів у разі зниження напруги в мережі.



Рис. 2.7. Блок керування HVV750V/100A-EU

Сонячний масив сформовано з 110 фотоелектричних модулів Canadian Solar CS6W-455MS (рис. 2.8) номінальною потужністю 455 Вт кожен, що забезпечує загальну встановлену потужність близько 50 кВт.



Рис. 2.8. Фотоелектричний модуль Canadian Solar CS6W-455MS

Панелі встановлені під кутом 35° і зорієнтовані на південь, що оптимізує надходження сонячної енергії протягом року. Вироблений постійний струм надходить на MPPT-входи інвертора, де відбувається перетворення у змінний струм з подальшим поданням у внутрішню мережу ферми. У разі надлишкової генерації енергія спрямовується на зарядження акумуляторних батарей, а при перевищенні споживання над виробітком – на розряд батарей або отримання потужності з мережі.

Захисно-комутаційна частина системи включає автоматичні вимикачі на постійній і змінній стороні, запобіжники, пристрої захисту від перенапруг, а також контур заземлення, виконаний відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 60364-5-54. Така схема забезпечує безпечну експлуатацію електроустановки та відповідність чинним нормам електробезпеки.

На рисунку 2.9 представлено змонтовану систему обладнання сонячної електростанції перепелятника (без фотомодулів) у повністю зібраному стані.



Рис. 2.9. Змонтована система обладнання сонячної електростанції перепелятника

2.5. Аналіз енергетичних потоків системи за даними SOLARMAN Smart

Для оцінки ефективності роботи гібридної сонячної електростанції використано дані, отримані з аналітичної платформи SOLARMAN Smart, яка забезпечує моніторинг усіх енергетичних процесів у реальному часі. У системі автоматично фіксуються параметри генерації, споживання, обміну енергії з мережею, стану заряду акумуляторних батарей, а також потоки потужності між окремими компонентами системи.

Моніторинг проводився протягом серпня 2025 року, коли спостерігається максимальний рівень сонячної активності та найбільше навантаження на перепелятник. Такий період обрано для аналізу, оскільки він дозволяє найповніше оцінити взаємодію всіх компонентів системи під час роботи в умовах пікових денних температур і підвищеного енергоспоживання.

Для аналізу енергетичних потоків використано добові та помісячні графіки параметрів:

- Production Power – потужність генерації сонячних панелей;
- Consumption Power – споживання електроенергії фермерським господарством;
- Feed-in Power – потужність, що передається в мережу;
- Purchasing Power – потужність, що надходить із мережі;
- Charging Power / Discharging Power – потужність зарядження та розрядження акумуляторів;
- SoC (State of Charge) – рівень заряду акумуляторної батареї, %;
- Grid Power – сумарний потік потужності через мережевий інтерфейс інвертора (баланс імпорту/експорту).

2.5.1. Аналіз добового графіку енергетичних потоків

На основі цих даних побудовано добовий графік енергетичних потоків (рис. 2.10) для характерного дня, який показує взаємодію основних елементів

системи протягом доби. На графіку показано зміну потужності генерації, споживання, зарядження та розрядження акумуляторної батареї, а також динаміку рівня заряду (SoC) упродовж доби 10 серпня 2025 року.

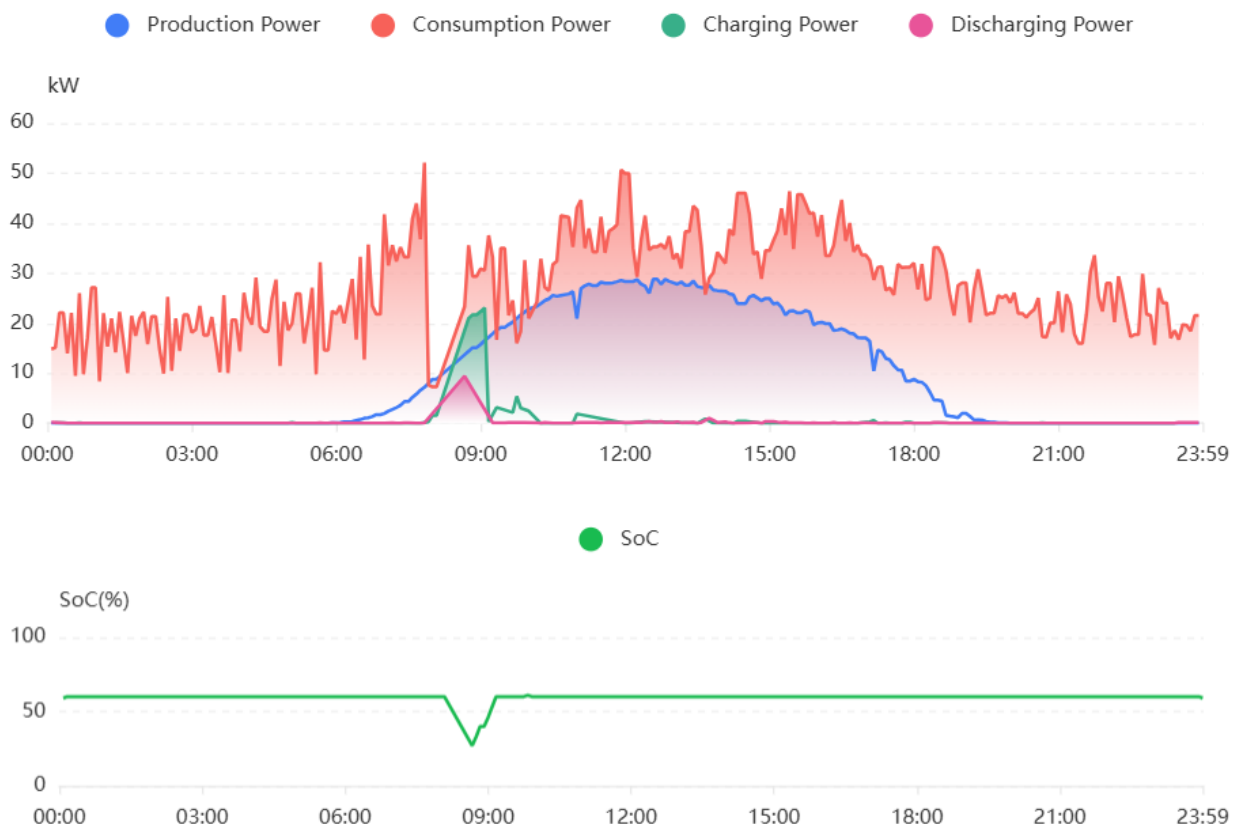


Рис. 2.10. Добові енергетичні потоки гібридної СЕС ФГ «Джмелик» за 10.08.2025 р. (дані SOLARMAN Smart)

Аналіз даних рис. 2.10 показує, що у нічний час (00:00–06:00) споживання залишається стабільним на рівні 18–22 кВт, генерація відсутня, а система працює виключно від мережі. Після 07:00 починається зростання потужності Production Power, що досягає максимуму близько 30 кВт о 13:00–14:00. Цей період збігається з піковими навантаженнями перепелятника (30–45 кВт), завдяки чому більша частина виробленої енергії використовується безпосередньо споживачем.

Між 09:00 та 11:00 спостерігається короткий інтервал зарядження батареї (Charging Power до 10 кВт), після чого рівень SoC підвищується до 55 %.

Подальший розряд (Discharging Power) практично відсутній, що свідчить про незначну роль акумулятора в цей день – система працює переважно у мережевому режимі.

Після 18:00 генерація поступово спадає до нуля, а навантаження знову забезпечується мережею. Крива SoC залишається стабільною у межах 50–55 %, тобто акумуляторна батарея не залучається активно для нічного живлення.

З аналізу видно, що в ясний літній день більшість виробленої енергії використовується безпосередньо у момент генерації, а надлишки не накопичуються. Це свідчить про ефективне співпадіння піків споживання і виробітку, однак також про невелике використання акумулятора через достатність потужності СЕС і стабільність навантаження.

Таким чином, система працює переважно у мережевому (on-grid) режимі із високим коефіцієнтом самоспоживання та мінімальним залученням накопичувача. Це підтверджує правильність вибору стратегії роботи СЕС для економії енергії без орієнтації на автономність.

2.5.2. Аналіз помісячного графіку енергетичних потоків

Для відображення сезонної динаміки побудовано також помісячний графік енергетичних потоків за період січень–жовтень 2025 року (рис. 2.11), який відображає зміну обсягів виробленої, спожитої, зарядженої та розрядженої енергії.

Із графіка рис. 2.11 видно чітко виражену сезонну залежність генерації сонячної електростанції. Починаючи з березня спостерігається зростання виробітку, який досягає максимальних значень у період із червня по вересень, коли середньомісячна генерація становить від 4900 до 5800 кВт·год. У ці місяці вироблена енергія частково забезпечує власні потреби підприємства, зменшуючи обсяги купівлі електроенергії з мережі. Найвищий рівень середньомісячного споживання фіксується в липні та серпні на рівні 12000-

17000 кВт·год, що відповідає періоду максимальних температур, коли в перепелятнику інтенсивно працюють системи вентиляції та охолодження.

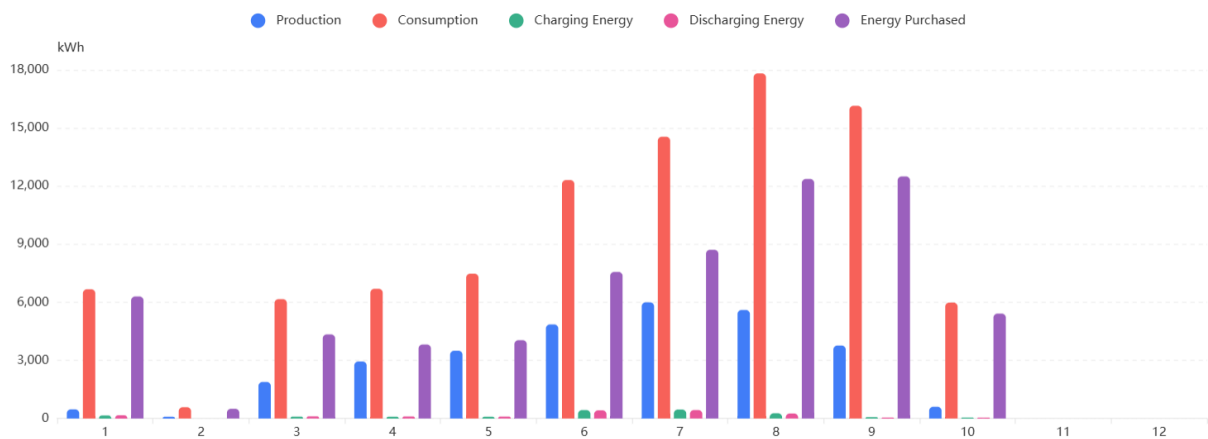


Рис. 2.11. Помісячний баланс енергії гібридної СЕС
ФГ «Джмелик» за 2025 рік

У зимовий період (січень–березень) виробіток СЕС істотно знижується до 500–1900 кВт·год на місяць, унаслідок чого підприємство майже повністю залежить від енергії, придбаної з мережі. Навіть за низької генерації система продовжує виконувати роль часткового піковідсікання, що видно з наявності невеликих значень зарядження й розрядження батареї (Charging/Discharging Energy).

Порівняння стовпців Production і Energy Purchased показує, що в середньому протягом року частка покриття власних потреб за рахунок сонячної генерації становить близько 32 %, а в літні місяці перевищує 43 %. Акумуляторна батарея відіграє допоміжну роль: її участь у загальному енергобалансі становить не більше 3–5 %, що відповідає концепції використання системи для енергетичної оптимізації, а не повного автономного живлення.

Отже, сезонна динаміка енергетичних потоків підтверджує ефективність гібридної сонячної системи для зниження споживання електроенергії з мережі у літній період, а також забезпечення часткової стабілізації навантаження у проміжні місяці. У зимовий період СЕС працює з мінімальною потужністю,

що обумовлено скороченням тривалості світлового дня та низькою інсоляцією.

2.5.3. Аналіз загальної структури потоків енергії

Для аналізу загальної структури потоків енергії було побудовано діаграму Sankey, яка наведена на рис. 2.12. Sankey-діаграма є наочним інструментом для аналізу енергетичного балансу гібридної сонячної електростанції, оскільки дозволяє візуально відобразити розподіл і напрямки потоків енергії між основними елементами системи – сонячними панелями, акумуляторною батареєю, електромережею та споживачем. Товщина стрічок на діаграмі пропорційна кількості енергії, що проходить через кожен елемент, що забезпечує швидке розуміння співвідношення між виробітком, споживанням, втратами та накопиченням. Такий підхід полегшує оцінку ефективності роботи системи, дозволяє виявити напрямки оптимізації енергопотоків і наочно демонструє баланс між власним виробництвом та енергією, отриманою з мережі.

На діаграмі рис. 2.12 зображено розподіл потоків енергії між основними елементами гібридної системи: сонячною електростанцією, акумуляторною батареєю, мережею та навантаженням перепелятника.



Рисунок 2.12 – Енергетичний баланс гібридної сонячної електростанції ФГ «Джмелик» за січень–жовтень 2025 року

Загальний виробіток електроенергії від сонячних панелей за аналізований період становив 30726 кВт·год, із яких 28992 кВт·год було безпосередньо спожито на потреби фермерського господарства, а 1734 кВт·год спрямовано на заряд акумуляторної батареї. У свою чергу, акумулятори віддали у мережу споживача 1716 кВт·год під час вечірніх і нічних годин, що забезпечило часткове покриття нічного навантаження.

Основне енергопостачання у періоди відсутності сонячної генерації здійснювалось із мережі: 63673 кВт·год електроенергії було отримано з розподільної системи. Сумарне річне споживання перепелятника становило 94381 кВт·год, з яких понад 32,5 % покрито за рахунок власного виробітку від СЕС.

Як видно з діаграми, найбільшу частку в структурі споживання займає безпосереднє самоспоживання енергії, тоді як частка акумуляованої енергії залишається незначною – близько 5 %. Це пояснюється мережеорієнтованим режимом роботи системи, коли генерація й споживання відбуваються переважно одночасно.

Таким чином, побудований енергетичний баланс свідчить про раціональну конфігурацію гібридної системи, що забезпечує зменшення обсягів купівлі електроенергії з мережі та підвищення енергетичної ефективності роботи перепелятника у літній період.

2.5.4. Аналіз ключових показників ефективності

Пряме самоспоживання виробітку:

$$PV_{self} = Production - Charging; \quad (2.1)$$

$$PV_{self} = 30726 - 1734 = 28992 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Закупівля з мережі:

$$E_{grid} = Consumption - (PV_{self} + Discharging); \quad (2.2)$$

$$E_{grid} = 94381 - (28992 + 1716) = 63674 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Коефіцієнт самоспоживання (SCR) – частка виробітку СЕС, використана безпосередньо на фермі:

$$SCR = \frac{PV_{self}}{Production}; \quad (2.3)$$

$$SCR = \frac{28992}{30726} = 94,36\%.$$

Рівень енергонезалежності (SSR) – частка споживання, покрита СЕС+АКБ:

$$SSR = \frac{PV_{self} + Discharging}{Consumption}; \quad (2.4)$$

$$SSR = \frac{28992 + 1716}{94381} = 32,5\%.$$

Отже, частка енергії з мережі за період – 67,5 %.

ККД акумуляторного циклу (round-trip efficiency):

$$\eta_{rt} = \frac{Discharging}{Charging}; \quad (2.5)$$

$$\eta_{rt} = \frac{1716}{1734} = 98,96\%.$$

Значення близьке до 99 % відображає невеликі втрати та те, що АКБ у цьому періоді залучалась помірно.

Питомий виробіток (*specific yield*) за період:

$$Y_f = \frac{Production}{P_{STC}}; \quad (2.6)$$

$$Y_f = \frac{30726}{50} = 614,5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кВт}_p.$$

Оскільки досліджуваний період охоплює 10 місяців, умовно-річний еквівалент (пропорційно часу) становитиме близько 737 кВт·год/кВт_p·рік.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз підтвердив доцільність і результативність застосування гібридної СЕС у фермерському господарстві «Джмелик». Кліматичні умови Роменського району зі середньорічною глобальною радіацією 1150–1200 кВт·год/м² на горизонт і близько 1300 кВт·год/м² при оптимальному нахилі панелей створюють сприятливі передумови для стабільної генерації протягом року. Енергоспоживання перепелятника має рівномірний добовий профіль із помірною нерівномірністю (приблизно 1,5–1,7) і вираженою сезонністю: літній максимум досягає 13–18 тис. кВт·год на місяць, тоді як узимку споживання зменшується до близько 1 тис. кВт·год на місяць. Така структура навантаження добре узгоджується з літнім піком інсоляції, що підвищує корисність денного виробітку СЕС.

2. За період спостереження сукупний виробіток СЕС становив 30726 кВт·год, споживання – 94381 кВт·год. Із виробленої енергії 1734 кВт·год було спрямовано на заряд акумуляторної батареї, а 1716 кВт·год

віддано в мережу споживача під час розряду. Пряме самоспоживання фотоелектричної генерації склало 28992 кВт·год, що відповідає $SCR=94,36\%$.

3. Рівень енергонезалежності системи визначається сумою прямого самоспоживання та розряду АКБ і становить $SSR=32,5\%$. Обсяг закупівлі електроенергії з мережі за період склав 63774 кВт·год.

4. Ефективність акумуляторного циклу перебуває на рівні $\eta_{\text{т}} = 98,96\%$, що свідчить про невеликі втрати на перетворення та кабельні лінії за умов помірного залучення батареї.

5. Питомий виробіток за період становить 614,5 кВт·год/кВт_р; за умови, що спостереження охоплюють десять місяців (січень–жовтень), умовно-річний еквівалент становить близько 737 кВт·год/кВт_р·рік.

6. Встановлено, що ібридна СЕС забезпечує відчутне зниження закупівлі електроенергії з мережі, ефективно покриття денних піків навантаження у період найвищої інсоляції та підвищення надійності живлення технологічного обладнання перепелятника. Економічний ефект у літній період посилюється завдяки фазовому збігу максимумів генерації і споживання, а мережевоорієнтована стратегія експлуатації з мінімально необхідним залученням АКБ виявилася оптимальною для поточного виробничого режиму господарства. Така конфігурація підтверджує техніко-економічну доцільність впровадження гібридних сонячних систем на аграрних об'єктах із безперервним циклом роботи та демонструє потенціал подальшої оптимізації за рахунок тонкого налаштування алгоритмів керування і тарифного планування.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці при роботі з гібридною СЕС. Організація охорони праці при експлуатації гібридної сонячної електростанції (ГСЕС) на фермерському господарстві «Джмелик» Роменського району Сумської області здійснюється відповідно до вимог законодавства України, зокрема Закону «Про охорону праці» та галузевих нормативних актів. Основна мета полягає у створенні безпечних і здорових умов праці для персоналу, що обслуговує електроенергетичне обладнання, шляхом планування, фінансування та системного контролю за дотриманням правил безпеки.

Планування заходів з охорони праці здійснюється на основі аналізу небезпечних і шкідливих факторів, характерних для робіт з фотоелектричними модулями, акумуляторними батареями, інверторами та іншими компонентами системи. За результатами аналізу розробляються річні плани заходів з охорони праці, які включають проведення інструктажів, перевірку технічного стану обладнання, профілактичні огляди, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту та медичні огляди.

Фінансування заходів з охорони праці на підприємстві здійснюється за рахунок власних коштів господарства. У кошторисі передбачаються видатки на придбання спецодягу, засобів індивідуального захисту, навчальні матеріали, проведення інструктажів та атестацію робочих місць за умовами праці. Витрати на охорону праці становлять не менше 0,5 % від фонду оплати праці, як того вимагають нормативи.

У колективному договорі фермерського господарства визначені зобов'язання роботодавця щодо створення безпечних умов праці, організації профілактичних заходів та компенсацій за роботу у шкідливих умовах. Передбачено порядок надання працівникам перерв для відпочинку, забезпечення санітарно-побутовими приміщеннями, душовими кабінами та кімнатами відпочинку.

Навчання з питань охорони праці проводиться відповідно до затверджених програм, які охоплюють загальні вимоги безпеки, специфіку роботи з електроустановками, правила надання першої допомоги та дії у разі аварійних ситуацій. На підприємстві ведуться журнали реєстрації вступних, первинних, повторних і цільових інструктажів. Після проходження навчання працівники складають іспити, результати яких фіксуються у протоколах атестації.

Персонал, який безпосередньо працює з гібридною СЕС, забезпечується спецодягом і засобами індивідуального захисту – діелектричними рукавичками, взуттям, окулярами, захисними касками, інструментом із ізольованими ручками. Працівникам також гарантується санітарно-побутове забезпечення, включаючи доступ до чистої води, побутових приміщень і аптечки першої допомоги.

Відповідальність за організацію охорони праці покладається на керівника фермерського господарства, який забезпечує створення належних умов для безпечної експлуатації СЕС, проводить інструктажі та контролює виконання вимог безпеки. Безпосередній контроль за дотриманням правил техніки безпеки здійснює уповноважена особа з охорони праці, а кожен працівник несе персональну відповідальність за власну безпеку та безпеку колег під час виконання робіт..

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі гібридною СЕС. У процесі експлуатації гібридної ГСЕС фермерського господарства «Джмелик» персонал може піддаватися дії ряду небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Їх виявлення, оцінка ступеня ризику та впровадження відповідних заходів захисту є обов'язковими складовими системи управління охороною праці.

Основними небезпеками є дія електричного струму, можливість термічних уражень, хімічних опіків від електроліту акумуляторних батарей, травмування під час монтажних робіт і вплив несприятливих метеорологічних умов. Також важливим є врахування потенційних ризиків під час виконання

технічного обслуговування, зокрема при заміні модулів, акумуляторів або роботі з інвертором.

Аналіз проведено за кожним етапом технологічного процесу – від монтажу до експлуатації. У таблиці 3.1 наведено логічну схему виробничих небезпек.

Таблиця 3.1. Логічна схема виробничих небезпек на ГСЕС

Етап технологічного процесу	Джерело небезпеки	Вид небезпечного/шкідливого фактору	Можливі наслідки впливу	Заходи захисту та профілактики
Монтаж фотоелектричних модулів	Робота на висоті, падіння предметів	Механічна дія, падіння з висоти	Травми, забиття, переломи	Використання страхувальних систем, касок, огорожень, дотримання інструкцій
Електромонтажні роботи	Електричний струм, іскріння	Електричне ураження, опіки	Ураження струмом, опіки, летальний випадок	Знеструмлення обладнання, діелектричні рукавички, взуття, ізольований інструмент
Підключення інвертора	Висока напруга, перегрів	Електротравма, пожежа	Опіки, загорання, пошкодження обладнання	Технічне обслуговування, заземлення, перевірка контактів
Обслуговування АКБ	Пари електроліту, коротке замикання	Хімічна дія, вибухонебезпека	Опіки, отруєння, травми	Вентиляція, захисні окуляри, гумові рукавички, контроль стану батарей
Технічне обслуговування системи	Вплив електромагнітного поля, шуму	Фізіологічне перевантаження, хронічні захворювання	Погіршення самопочуття, стомлюваність	Регламентовані перерви, чергування робіт, контроль стану здоров'я
Робота з ручним інструментом	Вібрація, несправність обладнання	Травми рук, мікротравми	Порізи, удари	Використання справного інструменту, рукавиці, навчання персоналу
Зварювальні роботи (каркас, опори)	УФ-випромінювання, іскри	Опіки, ураження очей	Кон'юнктивіт, опіки шкіри	Захисний щиток, спецодяг, вогнегасники
Очищення панелей від пилу або снігу	Ковзання, падіння з висоти	Механічні травми	Переломи, забиття	Протиковзне взуття, двоє осіб на роботі, очищення при вимкненій системі

Робота на відкритому повітрі	Сонячне випромінювання, спека	Теплове перевантаження, зневоднення	Тепловий удар, запаморочення	Робота у ранкові години, головні убори, питний режим
Аварійна ситуація (коротке замикання, пожежа)	Електричні дуги, займання	Опіки, отруєння димом, паніка	Пожежа, травми	Наявність плану евакуації, навчання персоналу діям у НС, протипожежне обладнання

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з гібридною СЕС. Для забезпечення безпечних умов праці на гібридній сонячній електростанції фермерського господарства «Джмелик» необхідно впровадити комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на усунення або мінімізацію впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Організаційні заходи. Першочерговим завданням є створення системи управління охороною праці, яка включає призначення відповідальних осіб, розробку положення про охорону праці та інструкцій з безпеки для всіх видів робіт. Працівники, що обслуговують ГСЕС, повинні проходити вступний, первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі. Обов'язковим є ведення журналів реєстрації інструктажів і протоколів перевірки знань з охорони праці.

Необхідно проводити регулярні навчання та тренування персоналу з надання першої допомоги та дій у разі виникнення аварійних ситуацій, пожежі або ураження електричним струмом.

Технічні заходи безпеки. Всі елементи гібридної сонячної електростанції повинні відповідати вимогам електробезпеки. Обладнання підлягає періодичним оглядам, випробуванням і профілактичному обслуговуванню. Під час виконання монтажних і ремонтних робіт необхідно знеструмлювати установку, використовувати інструменти з ізольованими ручками та діелектричні засоби. Системи інверторів, контролерів і акумуляторних батарей мають бути оснащені автоматичними пристроями захисту від перевантаження, короткого замикання та зворотної полярності.

Засоби індивідуального захисту. Персонал повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт: діелектричними рукавичками, килимками, захисними окулярами, спецодягом, касками та протиковзним взуттям. Під час обслуговування акумуляторних батарей обов'язкове використання гумових фартухів і респіраторів. Усі ЗІЗ мають проходити періодичну перевірку та заміну згідно з установленими термінами.

Санітарно-побутові умови. Для забезпечення комфортних умов праці необхідно обладнати побутові приміщення – роздягальні, душові, санітарні вузли, місця для відпочинку та приймання їжі. На робочих місцях повинна бути аптечка з мінімальним набором медикаментів, а також засоби гасіння пожежі. Важливо забезпечити належну вентиляцію у приміщеннях, де розташовані акумуляторні батареї, щоб уникнути накопичення вибухонебезпечних газів.

Пожежна та електробезпека. На території СЕС необхідно встановити протипожежні щити, вогнегасники та систему сигналізації. Персонал повинен бути ознайомлений із планом евакуації і діями у разі займання чи аварії. Усі електроустановки слід захищати від атмосферних впливів, грозових перенапруг і пошкоджень ізоляції.

Висновки до розділу 3. Питання організації охорони праці у фермерському господарстві «Джмелик» під час експлуатації гібридної сонячної електростанції знаходяться на задовільному рівні. На підприємстві дотримуються основні вимоги законодавства з охорони праці, проводяться інструктажі, навчання та перевірка знань персоналу, забезпечується видача засобів індивідуального захисту і належне санітарно-побутове забезпечення. Разом із тим, подальше вдосконалення системи управління охороною праці та впровадження сучасних засобів контролю за безпечними умовами роботи сприятимуть підвищенню рівня безпеки працівників і безперебійному функціонуванню гібридної СЕС.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Для оцінки економічної ефективності гібридної сонячної електростанції, встановленої у фермерському господарстві «Джмелик» Роменського району Сумської області, використано фактичні дані моніторингу роботи системи за період січень–жовтень 2025 року.

Основні показники функціонування ГСЕС за період спостереження:

- сумарний виробіток електроенергії – 30726 кВт·год;
- споживання електроенергії об'єктом – 94381 кВт·год;
- заряд акумуляторної батареї (АКБ) – 1734 кВт·год;
- розряд АКБ – 1716 кВт·год;
- пряме самоспоживання електроенергії від СЕС – 28992 кВт·год;
- закупівля електроенергії з мережі – 63774 кВт·год;
- тариф на електроенергію для споживача – 12,00 грн/кВт·год.

Отже, фактична частка покриття потреб господарства власною генерацією становить близько 32,5 %, що відповідає рівню енергонезалежності системи (SSR). Враховуючи ефективність акумуляторного циклу ($\eta_{\text{п}} = 98 \%$), припускаємо, що вся вироблена енергія ГСЕС безпосередньо використовується або зберігається з мінімальними втратами.

Економія коштів за рахунок власного виробництва електроенергії визначається за формулою:

$$E_{\text{ек}} = W_{\text{PV}} \cdot T_e, \quad (4.1)$$

де $E_{\text{ек}}$ – економія коштів, грн;

W_{PV} – виробіток електроенергії СЕС, кВт·год;

T_e – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Економічний ефект розраховано для кожного місяця окремо, виходячи з фактичного виробітку електроенергії. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати розрахунків оцінки економічної ефективності застосування ГСЕС

Місяць	Виробіток, кВт·год	Економія, грн
Січень	572,4	6868,8
Лютий	91,6	1099,2
Березень	1987,0	23844,0
Квітень	2944,2	35330,4
Травень	3699,4	44392,8
Червень	4956,0	59472,0
Липень	5998,3	71979,6
Серпень	5802,9	69634,8
Вересень	3967,5	47610,0
Жовтень	706,7	8480,4
Разом за 10 міс.	30726,0	368712,0
Прогноз на рік (×1,2)	36871,2	442454,4

Таким чином, за 10 місяців експлуатації ГСЕС господарство зекономило 368,7 тис. грн, а річна економія за умови стабільного режиму генерації може сягати понад 442 тис. грн.

На рисунку 4.1 показано графік помісячної економії коштів завдяки роботі гібридної СЕС.

Крім прямої економії коштів, впровадження гібридної СЕС забезпечує додаткові переваги:

- зниження навантаження на зовнішню мережу електропостачання;
- підвищення надійності енергозабезпечення тваринницького комплексу;

- стабілізація мікроклімату в приміщенні перепелятника під час аварій або пікових навантажень;
- скорочення викидів CO₂ на 28–30 т/рік (еквівалент зменшення використання ≈ 10 т дизельного палива).

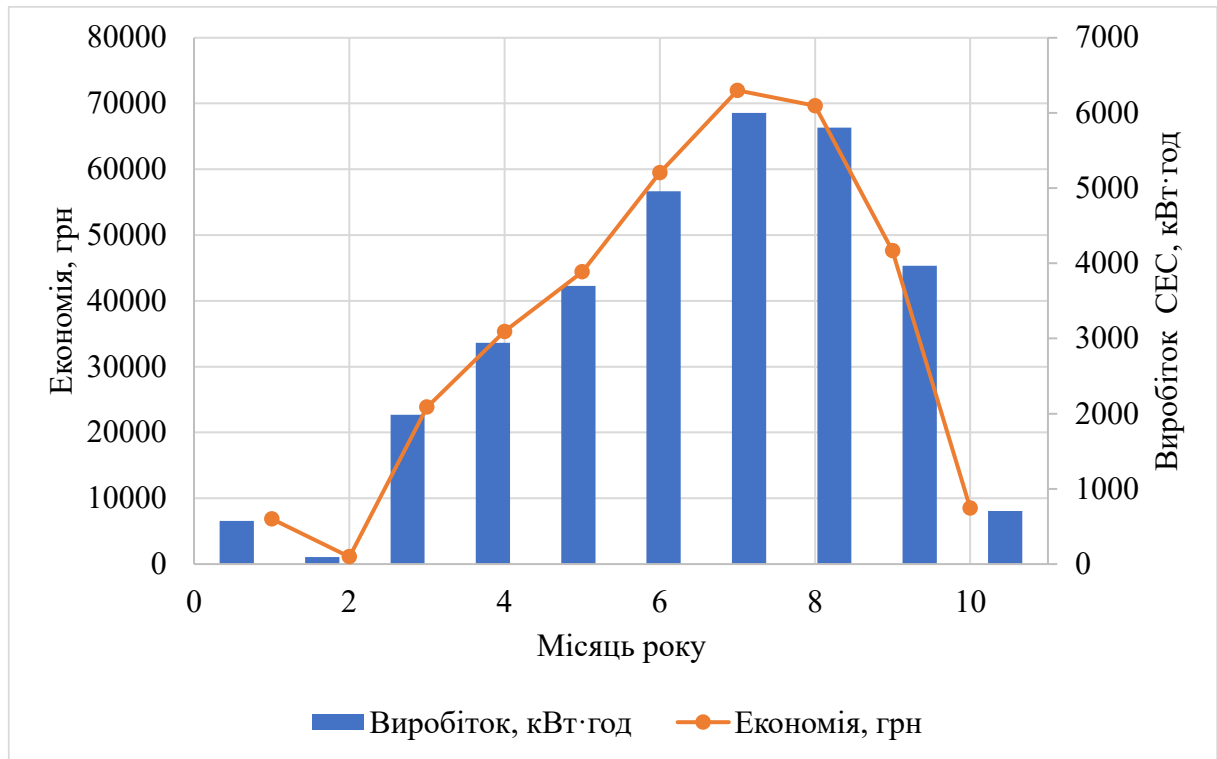


Рис. 4.1. Помісячної економії коштів та виробіток електроенергії від СЕС ФГ «Джмелик»

Висновки до розділу 4. Економічний аналіз підтверджує доцільність застосування гібридної сонячної електростанції для енергозабезпечення перепелятника ФГ «Джмелик». Власна генерація дозволяє покривати близько третини потреб об'єкта в електроенергії, зменшити річні витрати на понад 440 тис. грн і суттєво підвищити енергетичну автономність господарства.

Отриманий рівень енергоефективності та короткий термін окупності свідчать, що інвестиції у гібридні системи зберігання енергії є економічно виправданими для малих аграрних підприємств та можуть бути рекомендовані для ширшого впровадження у фермерських господарствах України.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексну оцінку ефективності функціонування гібридної сонячної електростанції, призначеної для забезпечення електроенергією перепелятника фермерського господарства «Джмелик» Роменського району Сумської області. На основі проведених аналітичних, розрахункових та економічних досліджень отримано такі основні результати та висновки.

1. Проведено аналітичний огляд сучасного стану розвитку гібридних систем електропостачання. Визначено, що гібридні СЕС, які поєднують фотоелектричну генерацію, системи накопичення енергії та резервні джерела, є ефективним рішенням для стабільного енергопостачання об'єктів аграрного сектору. Вони забезпечують високу надійність, гнучкість та енергоефективність, зменшуючи залежність споживачів від централізованої мережі.

2. Досліджено кліматичні та технологічні умови функціонування системи. Роменський район має сприятливі умови для роботи сонячних електростанцій, із середньорічною глобальною радіацією 1150–1300 кВт·год/м², що забезпечує стабільну генерацію електроенергії. Аналіз графіків навантаження перепелятника показав добру кореляцію між піковими періодами споживання та виробітком СЕС у літній період.

3. За результатами моніторингу встановлено високу ефективність роботи системи. За 10 місяців спостережень сумарний виробіток становив 30726 кВт·год при загальному споживанні 94381 кВт·год. Рівень прямого самоспоживання фотоелектричної генерації досяг 94,36 %, а показник енергонезалежності системи – 32,5 %. Питомий виробіток становить 614,5 кВт·год/кВт_р, що еквівалентно близько 737 кВт·год/кВт_р·рік у річному перерахунку. Ефективність акумуляторного циклу ($\eta_{\text{ц}} = 98,96 \%$) свідчить про незначні втрати енергії при зберіганні.

4. Доведено техніко-економічну доцільність впровадження гібридних систем. Завдяки оптимальній конфігурації, орієнтованій на самоспоживання, СЕС забезпечує покриття денних піків навантаження, скорочення закупівлі енергії з мережі та підвищення надійності електропостачання. Це дозволяє щороку економити понад 440 тис. грн на оплаті електроенергії та суттєво підвищити енергетичну автономність господарства.

5. Питання охорони праці та безпеки експлуатації розглянуто в комплексі. Визначено потенційні небезпечні й шкідливі фактори при роботі з гібридною СЕС, розроблено заходи щодо запобігання ураженню електричним струмом, перегріву обладнання, займання та травмування персоналу. Організація охорони праці у ФГ «Джмелик» оцінюється як задовільна, із наявністю необхідних інструкцій, журналів інструктажів і засобів індивідуального захисту.

За результатами досліджень можна зробити наступні рекомендації для подальшого підвищення енергоефективності ФГ «Джмелик»:

- розглянути можливість модернізації системи шляхом розширення потужності фотоелектричного поля та ємності АКБ для підвищення рівня енергонезалежності до 50–60 %;

- впровадити алгоритми динамічного керування навантаженням і тарифним плануванням для подальшої оптимізації енергобалансу;

- використовувати досвід ФГ «Джмелик» як демонстраційний кейс для впровадження гібридних сонячних систем у фермерських господарствах України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квіт. 2023 р. № 373-р. Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-p> (дата звернення: 21.10.2025).
2. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серп. 2024 р. № 761-р. Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/761-2024-p> (дата звернення: 21.10.2025).
3. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 груд. 2021 р. № 1803-р. Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-p> (дата звернення: 21.10.2025).
4. Бобров А. І., Шевченко С. М. Відновлювана енергетика: сучасні тенденції та перспективи розвитку. Енергетика і електрифікація. 2023. № 3. С. 12–20.
5. Panwar N. L., Kaushik S. C., Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. P. 1513–1524.
6. Іванов В. О., Мельник Ю. С. Дослідження ефективності гібридних систем електропостачання для сільських споживачів. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 2. С. 33–41.
7. Khan M. J., Iqbal M. T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renewable Energy*. 2005. Vol. 30. P. 835–854.
8. Сидоренко О. М., Петренко І. В. Оптимізація параметрів автономних сонячних систем енергозабезпечення. Технічна електродинаміка. 2021. № 6. С. 42–49.

9. Luna-Rubio R., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez D., Ríos-Moreno G. Optimal sizing of renewable hybrid energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 1077–1088.
10. Мельничук О. А., Савчук В. Г. Енергетична автономність аграрних підприємств на основі ВДЕ. *Агроінженерія*. 2023. № 4. С. 25–31.
11. Givler T., Lilienthal P. Using HOMER Software to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems. NREL Report. 2005. NREL/TP-710-36774.
12. IEA PVPS. Trends in Photovoltaic Applications 2023. IEA, 2023. URL: https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2023/ (дата звернення: 21.10.2025).
13. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025. URL: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024> (дата звернення: 21.10.2025).
14. NREL. 2024 Annual Technology Baseline — Utility-Scale Battery Storage. National Renewable Energy Laboratory, 2024. URL: <https://atb.nrel.gov/electricity/2024/> (дата звернення: 21.10.2025).
15. Luna-Rubio R., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez D., Ríos-Moreno G. Optimal sizing of renewable hybrid energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 1077–1088.
16. Bhattacharjee S., Acharya S. PV–wind hybrid power option for a low wind topography. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89. P. 942–950.
17. Міненерго України. Development of Microgrids Identified as Key to Strengthening Ukraine’s Energy Security. 2025. URL: <https://www.mev.gov.ua/en/news/development-microgrids-identified-key-strengthening-ukraines-energy-security-rsts-report> (дата звернення: 21.10.2025).
18. EnergySage. How hybrid solar systems work. 2024. URL: <https://www.energysage.com/solar/> (дата звернення: 21.10.2025).
19. SolarPower Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028. 2024. URL: <https://www.solarpowereurope.org> (дата звернення: 21.10.2025).

20. Luna-Rubio R., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez D., Ríos-Moreno G. Optimal sizing of renewable hybrid energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*. 2012. Vol. 86. P. 1077–1088.
21. Bhattacharjee S., Acharya S. PV–wind hybrid power option for a low wind topography. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89. P. 942–950.
22. Мельничук О. А., Савчук В. Г. Енергетична автономність аграрних підприємств на основі ВДЕ. *Агроінженерія*. 2023. № 4. С. 25–31.
23. IEA PVPS. Hybrid Photovoltaic Systems – Technical Report T15-09. 2023.
24. Fraunhofer ISE. Overview of Energy Storage Technologies. 2023.
25. NREL. Battery Energy Storage Systems (BESS) Data Book. 2024.
26. DTEK. Ukraine’s first industrial-scale energy storage system launched. 2023. URL: <https://dtek.com>
27. NREL. Microgrid Design Handbook. 2023
28. ДСТУ EN 62446-1:2022 Фотоелектричні (PV) системи. Вимоги до тестування, документації та технічного обслуговування. Частина 1. Системи, підключені до мережі. Документація, пусконаладжувальні випробування та перевірка (EN 62446-1:2016, IDT; A1:2018). Статус: діючий від 31.12.2023. URL: online.budstandart.com (дата звернення: 21.10.2025).
29. ДСТУ HD 60364-5-51:2022 Електроустановки будівель. Вибір і встановлення електричного обладнання. Загальні правила (HD 60364-5-51:2009, IDT). Статус: діючий від 31.12.2023. URL: online.budstandart.com (дата звернення: 21.10.2025).
30. Кодекс систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (із змінами). URL: zakon.rada.gov.ua/go/v0310874-18 (дата звернення: 21.10.2025).
31. Правила роздрібного ринку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312 (із змінами). URL: zakon.rada.gov.ua/go/v0312874-18 (дата звернення: 21.10.2025).

32. Кодекс комерційного обліку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 311 (із змінами). URL: zakon.rada.gov.ua/go/v0311874-18 (дата звернення: 21.10.2025).

33. ДСТУ EN 50549-1:2022 Вимоги до генерувальних установок, призначених для паралельного під'єднання до розподільчих мереж. Частина 1. Під'єднання до мережі низької напруги (EN 50549-1:2019, IDT). Статус: чинний від 01.03.2023. URL: online.budstandart.com (дата звернення: 21.10.2025).

34. ДСТУ EN 50549-2:2022 Вимоги до генерувальних установок... Частина 2. Підключення до мережі середньої напруги (EN 50549-2:2019, IDT; АС:2019-03). Статус: діючий від 31.12.2023. URL: online.budstandart.com (дата звернення: 21.10.2025).

35. НКРЕКП. Про затвердження змін до Кодексу систем розподілу (2025). URL: nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-zmin-do-koдексу-sistem-rozpodilu-10 (дата звернення: 21.10.2025).

36. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. Наказ Держнаглядохоронпраці № 257 від 06.10.1997 (із змінами). URL: ukrstone.org/files/NPAOP/40.1-1.01-97.pdf (дата звернення: 21.10.2025).

37. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (чинні вимоги). URL: dnaop.com/html/2029/doc-NPAOP_40.1-1.21-98 (дата звернення: 21.10.2025).

ДОДАТКИ