

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: «Дослідження ефективності гібридної сонячної електростанції для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів»

Виконав

(підпис)

Сергій ДЕГТЯРЬОВ

(прізвище, ініціали)

Група

ЗЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Віктор СІРЕНКО

(прізвище, ініціали)

Рецензент:

(підпис)

Олександр КОВБАСА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Сергію ДЄГТЯРЬОВУ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження ефективності гібридної сонячної електростанції для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів»

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Сіренко Віктор Федорович, 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. Аналіз стану питання та наукових досліджень у сфері гібридних сонячних електростанцій; 2. Дослідження ефективності роботи гібридної сонячної електростанції для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів; 3. Охорона праці; 4. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Віктор СІРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

(підпис)

Сергій ДЄГТЯРЬОВ

(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. Аналіз стану питання та наукових досліджень у сфері гібридних сонячних електростанцій»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Дослідження ефективності роботи гібридної сонячної електростанції для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів»	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)

Віктор СІРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Сергій ДЄГТЯРЬОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Дегтярьов Сергій Григорович. Дослідження ефективності гібридної сонячної електростанції для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів.

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.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню ефективності гібридної сонячної електростанції побутового призначення та оцінюванню її впливу на надійність електропостачання споживачів в умовах сучасних енергетичних викликів. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частоти аварійних відключень електроенергії, сезонних дефіцитів потужності та необхідністю підвищення рівня енергетичної автономності приватних домогосподарств. Гібридні сонячні електростанції, які поєднують фотоелектричні модулі, інверторний комплекс та акумуляторну систему зберігання, становлять ефективне рішення для забезпечення як економії коштів, так і стабільності живлення.

У роботі розглянуто функціонування гібридної фотоелектричної установки потужністю 6 кВт із літій-залізо-фосфатною акумуляторною батареєю ємністю 14,89 кВт·год. Дослідження виконано на основі реальних експлуатаційних даних, отриманих із системи моніторингу Deye Cloud за період червень–листопад, а також змодельованих даних зимового періоду для оцінки повного річного циклу роботи. Проаналізовано добові та місячні профілі генерації електроенергії, графіки споживання, режими зарядження та розрядження акумулятора, а також взаємодію з енергомережою за показниками Purchased та Grid Feed-in.

У результаті встановлено, що сонячна електростанція забезпечує річний виробіток 3815,5 кВт·год, з яких 3336 кВт·год використовується для власного

споживання, що дозволяє знизити залежність від мережі на 55 %. Визначено, що акумуляторна батарея працює з високою ефективністю енергоповернення, виконуючи добові цикли зі середнім ККД близько 90 %, і здатна забезпечити 6–12 год автономної роботи критичних навантажень. Це суттєво підвищує надійність електропостачання домогосподарства під час аварійних відключень, коливань напруги та пікових навантажень у мережі.

У роботі побудовано графіки добової та місячної генерації, динаміки роботи АКБ, структури споживання та енергетичного балансу. Проаналізовано коефіцієнт використання встановленої потужності, сезонні коливання виробітку та поведінку системи в умовах недостатньої сонячної інсоляції.

В економічному розділі здійснено розрахунок річної економії коштів за рахунок власного споживання та доходу від продажу надлишкової електроенергії за «зеленим» тарифом. Сукупний річний економічний ефект становить 17,3 тис. грн. За капіталовкладень 169 тис. грн строк окупності гібридної системи складає близько 9,8 року, що є економічно обґрунтованим і відповідає середньостатистичним показникам для домашніх СЕС в Україні.

Окремо наведено аналіз ризиків та заходів з охорони праці під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування гібридних сонячних установок.

Отримані результати підтверджують, що гібридна сонячна електростанція є ефективним технічним рішенням для підвищення надійності та економічності електропостачання побутових споживачів і має значний потенціал для поширення у приватному секторі України.

Ключові слова: гібридна сонячна електростанція; фотоелектрична система; акумуляторна батарея; інвертор; надійність електропостачання; власне споживання; енергетичний баланс; «зелений» тариф; енергоефективність; моніторинг Deye Cloud; автономність; побутові споживачі.

ABSTRACT

Diehtiarov Serhii Hryhorovych. Study of the Efficiency of a Hybrid Solar Power Plant for Improving the Reliability of Electricity Supply to Household Consumers.

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 thesis investigates the efficiency of a hybrid solar power plant for household applications and evaluates its impact on the reliability of electricity supply under modern energy challenges. The relevance of the study is determined by the increasing frequency of emergency power outages, seasonal capacity shortages, and the need to enhance the energy autonomy of private households. Hybrid solar power plants, which combine photovoltaic modules, an inverter system, and an energy storage unit, represent an effective solution for ensuring both economic savings and stable operation of household loads.

The work examines the performance of a 6 kW hybrid photovoltaic system equipped with a 14.89 kWh lithium iron phosphate battery. The analysis is based on real operational data obtained from the Deye Cloud monitoring system for the June–November period, supplemented with modeled winter data to evaluate a complete annual cycle. Daily and monthly generation profiles, consumption patterns, battery charge/discharge behavior, and interaction with the power grid through Purchased and Grid Feed-in indicators have been thoroughly analyzed.

The results demonstrate that the solar power plant provides an annual generation of 3815.5 kWh, of which 3336 kWh are used for household self-consumption, reducing dependence on the grid by 55%. The battery system operates with a high round-trip efficiency of approximately 90% and is capable of supplying critical household loads for 6–12 hours during outages. This significantly increases the reliability of electricity supply under emergency shutdowns, voltage fluctuations, and

peak-load conditions.

The thesis includes diagrams of daily and monthly generation, battery operation, consumption structure, and overall energy balance. The utilization factor of the installed capacity, seasonal variations in generation, and system performance under low-insolation conditions were analyzed in detail.

The economic assessment shows that the annual savings from self-consumption amount to approximately 14.4 thousand UAH, while additional income from selling surplus electricity under the “green tariff” reaches around 2.9 thousand UAH. The combined annual economic effect is 17.3 thousand UAH. With capital investments of 169 thousand UAH, the payback period of the hybrid system is estimated at approximately 9.8 years, which is economically justified and consistent with typical indicators for residential PV systems in Ukraine. The thesis also presents an analysis of occupational safety risks and protective measures for installation, operation, and maintenance of hybrid solar systems.

The obtained results confirm that a hybrid solar power plant is an effective technical solution for improving the reliability and economic efficiency of electricity supply to household consumers and has significant potential for wider implementation in the private sector of Ukraine.

Keywords: hybrid solar power plant; photovoltaic system; battery energy storage; inverter; electricity supply reliability; self-consumption; energy balance; green tariff; energy efficiency; Deye Cloud monitoring; autonomy; household consumers.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	13
1.1. Сучасний стан розвитку сонячної енергетики в Україні та світі.....	13
1.2. Типи сонячних електростанцій.....	16
1.3. Технологічні особливості гібридних систем енергопостачання.....	19
1.4. Основні показники надійності електропостачання побутових споживачів	21
1.5. Висновки до розділу 1.....	23
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ	25
2.1. Загальна характеристика об’єкта дослідження.....	25
2.2. Склад і принцип роботи гібридної сонячної електростанції	27
2.3. Система моніторингу Deye Cloud і методика збору даних.....	31
2.4. Обробка та аналіз даних моніторингу роботи гібридної сонячної електростанції.....	34
2.4.1. Загальні показники	34
2.4.2. Аналіз добової та місячної генерації.....	35
2.4.3. Аналіз споживання електроенергії.....	38
2.4.4. Взаємодія з енергомережою (Grid Feed-in та Purchased).....	41
2.4.5. Аналіз роботи акумуляторних батарей	43
2.5. Визначення показників ефективності роботи СЕС	45
2.5.1. Річне споживання та мережеве покриття.....	46
2.5.2. Відпуск у мережу та річний виробіток СЕС	47
2.5.3. Коефіцієнти самоспоживання та експорту	47
2.5.4. Ефективність роботи акумуляторної батареї.....	48
2.6. Оцінка впливу гібридної сонячної електростанції на надійність електропостачання	50
2.7. Висновки до розділу 2.....	51

3. ОХОРОНА ПРАЦІ	53
3.1. Організація охорони праці при роботі з гібридними сонячними електростанціями	53
3.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації гібридних сонячних електростанцій	55
3.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при експлуатації гібридних сонячних електростанцій.....	58
3.4. Висновки до розділу 3.....	59
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	60
4.1. Вихідні дані для економічних розрахунків.....	60
4.2. Розрахунок річної економії та строку окупності інвестицій	61
4.3. Висновки до розділу 4.....	63
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66
ДОДАТКИ	69

ВСТУП

1. Актуальність теми. Забезпечення надійного електропостачання побутових споживачів є одним із ключових завдань сучасної енергетики. В умовах зростання навантаження на енергомережі та частих відключень особливої ваги набуває використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних систем. Україна має значний потенціал розвитку фотоелектричних технологій завдяки сприятливим кліматичним умовам і високому рівню сонячної радіації [1].

У той же час, нестабільність роботи мережі та зниження надійності енергопостачання, зумовлені технічними і воєнними чинниками, створюють потребу у впровадженні гібридних систем, які поєднують сонячні панелі, акумулятори та підключення до мережі [2, 3]. Такі системи дозволяють підвищити автономність споживачів, знизити ризик відключень і забезпечити стабільну роботу електроприладів.

Використання платформ моніторингу, зокрема Deye Cloud, забезпечує збір і аналіз фактичних даних про генерацію, споживання та стан акумуляторів, що дозволяє об'єктивно оцінити ефективність роботи гібридної сонячної електростанції. Тому дослідження ефективності таких систем є актуальним для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів України [1–3].

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. У світовій науковій літературі питання інтеграції гібридних енергетичних систем, у тому числі сонячних фотоелектричних (PV) систем з акумуляторним зберіганням та мережею, отримало значний розвиток. Наприклад, у роботі [4] розглядається сучасний стан гібридних систем відновлюваних джерел, їх архітектур, оптимізаційних стратегій та управління, зокрема підвищення надійності та стійкості енергопостачання. Аналіз аварійних режимів та відмов у вітро-сонячних гібридних системах показує, що серед ключових факторів ризику –

деградація батарей, пошкодження PV-модулів, а також пожежні ситуації, які суттєво впливають на надійність системи [5].

У дослідженні [6] запропоновано комбінований підхід (імовірнісний + потік потужності) для оцінки надійності гібридної системи, якій вдалося знизити очікувану втрату живлення (LOLE) значно нижче порогових значень за традиційними методами. Водночас дослідження [7] доводить, що саме гібридизація й накопичення енергії дозволяють стабілізувати живлення та підвищити надійність електропостачання.

В українському контексті дослідження розвитку сонячної енергетики та гібридних систем також активно ведуться, що дає підґрунтя для їх практичного впровадження [1–3]. Однак існує значущий розрив між теоретичними моделями й реальним експлуатаційним моніторингом систем у побутовому секторі, особливо в контексті підвищення надійності живлення побутових споживачів. Саме тому дослідження ефективності роботи гібридної сонячної електростанції з реальними даними моніторингу є важливим і своєчасним.

3. Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення надійності електропостачання побутових споживачів шляхом аналізу ефективності роботи гібридної сонячної електростанції на основі даних системи моніторингу Deye Cloud.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання побутових споживачів, що функціонує з використанням гібридної сонячної електростанції.

5. Предмет дослідження – процеси вироблення, накопичення, розподілу та споживання електричної енергії у гібридній системі «сонячна електростанція – акумулятор – мережа», а також показники її енергетичної ефективності та надійності на основі даних моніторингу Deye Cloud.

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

– провести аналітичний огляд сучасного стану розвитку сонячної енергетики та гібридних систем електропостачання побутових споживачів;

– охарактеризувати структуру та принцип роботи гібридної сонячної електростанції типу «сонячна панель – акумулятор – мережа», виконати збір і обробку фактичних даних моніторингу роботи системи через платформу Deue Cloud;

– проаналізувати енергетичні показники системи – генерацію, споживання, втрати, ефективність використання акумуляторів та рівень автономності, оцінити вплив гібридної системи на надійність електропостачання побутових споживачів;

– розробити рекомендації щодо підвищення ефективності та оптимізації режимів роботи гібридної сонячної електростанції.

7. Методи дослідження. У роботі використано аналітичні, розрахункові та експериментальні методи. Аналіз ефективності гібридної сонячної електростанції здійснювався на основі фактичних даних моніторингу платформи Deue Cloud, що охоплюють показники генерації, споживання, заряду та розряду акумуляторів. Для обробки даних застосовувались методи математичної статистики, енергетичного балансу та графоаналітичного моделювання. Оцінювання надійності виконано з використанням коефіцієнтів резервування та показників автономності системи.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 69 сторінок машинописного тексту, містить 20 рисунків, 6 таблиць, додатки та 25 найменувань джерел у списку літератури.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Сучасний стан розвитку сонячної енергетики в Україні та світі

Сонячна енергетика є одним із найдинамічніше зростаючих секторів відновлюваної енергетики у світі. За даними International Energy Agency (IEA) (рис. 1.1), частка фотоелектричних систем у глобальному виробництві електроенергії перевищила 6 % у 2024 році, а встановлена потужність сонячних електростанцій сягнула понад 1 ТВт [4]. Лідерами розвитку залишаються Китай, США, Індія та країни Європейського Союзу, які активно реалізують політику декарбонізації енергетики та переходу до «зеленої» економіки.

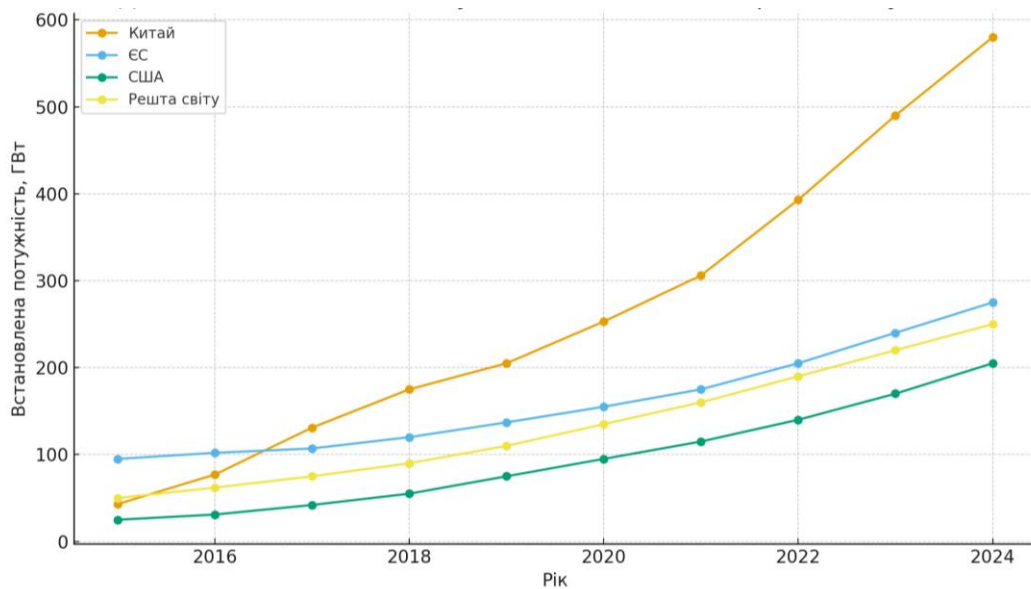


Рис. 1.1 – Динаміка встановленої потужності сонячних електростанцій у світі (2015–2024 рр.)

В Україні розвиток сонячної енергетики набув особливої актуальності у зв'язку з необхідністю підвищення енергетичної незалежності держави, скорочення споживання імпортованих енергоносіїв і зниження викидів парникових газів (рис. 1.2). За даними Державного агентства з

енергоефективності та енергозбереження України, у 2024 році сумарна встановлена потужність сонячних електростанцій перевищила 8 ГВт, з яких понад 1,5 ГВт припадало на домогосподарства [1].

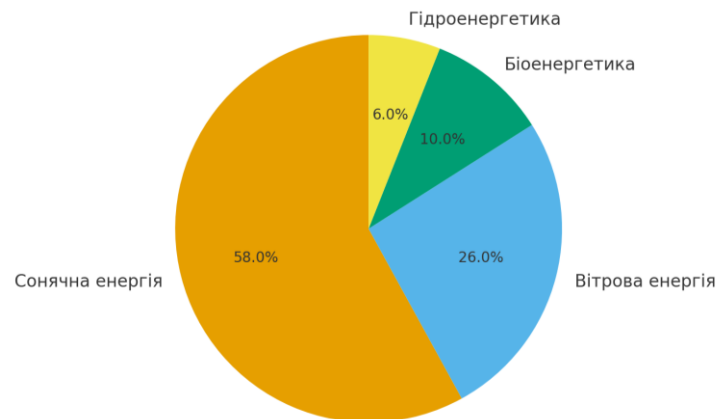


Рис. 1.2 - Структура встановлених потужностей відновлюваних джерел енергії в Україні у 2024 р.

Важливим чинником розвитку сектору є державна підтримка - «зелений» тариф, програми часткового відшкодування вартості обладнання та стимулювання енергетичної кооперації громад [2]. Однак із 2022 року внаслідок пошкодження енергетичної інфраструктури та частих відключень увага споживачів зосередилась на автономних і гібридних рішеннях, здатних забезпечувати безперервне живлення критичних навантажень [3].

Поряд із мережевими системами дедалі більше поширення отримують домашні гібридні сонячні електростанції, які поєднують фотоелектричні модулі, інвертор, акумуляторні батареї та можливість підключення до мережі або генератора. Такі системи забезпечують гнучке керування потоками енергії, підвищують частку власного споживання та знижують витрати на електроенергію. Згідно з прогнозами SolarPower Europe (2025), саме гібридні та системи з накопиченням енергії визначатимуть подальший розвиток децентралізованої енергетики у найближчі роки [5].

На рисунку 1.3 представлено розподіл домогосподарств України, які встановили сонячні електростанції станом на 2024 рік. Найбільша кількість

таких об'єктів зосереджена у центральних та південних регіонах країни – Київській, Дніпропетровській та Одеській областях, що пояснюється сприятливими кліматичними умовами, високим рівнем сонячної радіації та розвинуеною електромережею.

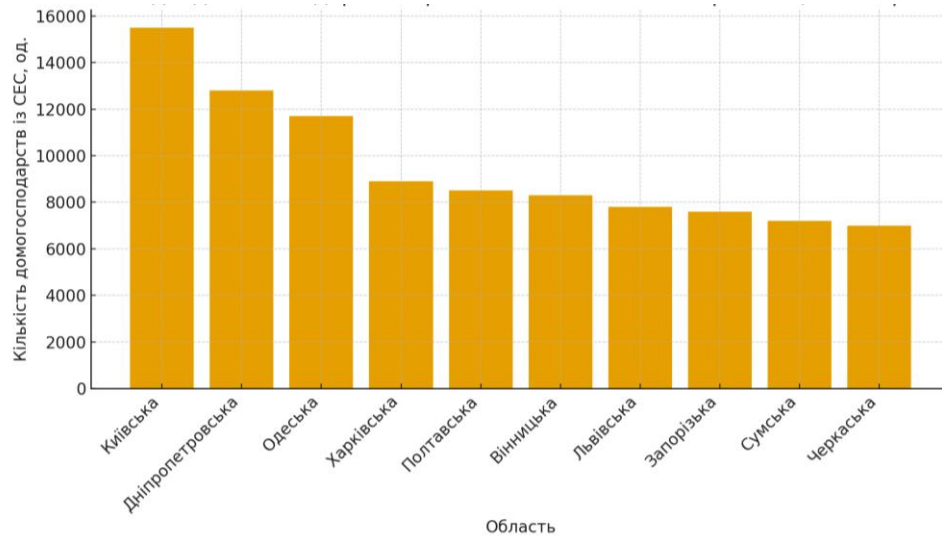


Рис. 1.3 – Розподіл домогосподарств України із сонячними електростанціями за регіонами (2024 р.)

Дещо меншу, але стабільно зростаючу кількість домашніх СЕС мають Полтавська, Вінницька, Львівська, Запорізька та Сумська області. Це свідчить про поступове поширення технології на всю територію України, незалежно від географічного розташування. Зростання кількості малих сонячних електростанцій у приватному секторі сприяє децентралізації енергетичної системи, зниженню навантаження на магістральні мережі та підвищенню енергетичної незалежності побутових споживачів.

Отже, сучасний етап розвитку сонячної енергетики характеризується не лише зростанням установлених потужностей, а й переходом від централізованого виробництва електроенергії до розподілених гібридних систем, здатних підвищити енергоефективність і надійність електропостачання побутових споживачів [1–5].

1.2. Типи сонячних електростанцій

Сонячні електростанції (СЕС) є складовою сучасних систем розподіленої генерації, що забезпечують виробництво електричної енергії безпосередньо в місці споживання. Залежно від способу взаємодії з централізованою електромережею, рівня автономності та способу зберігання енергії, СЕС поділяються на автономні (off-grid), мережеві (on-grid) та гібридні (hybrid) [4–6]. Кожен із цих типів має свої конструктивні, функціональні та експлуатаційні особливості, що визначають доцільність їх використання в побутовому, промисловому чи комунальному секторах.

Автономні сонячні електростанції (рис. 1.4) функціонують незалежно від централізованої електромережі, забезпечуючи електропостачання споживачів за рахунок енергії, виробленої фотоелектричними модулями та накопиченої в акумуляторних батареях.

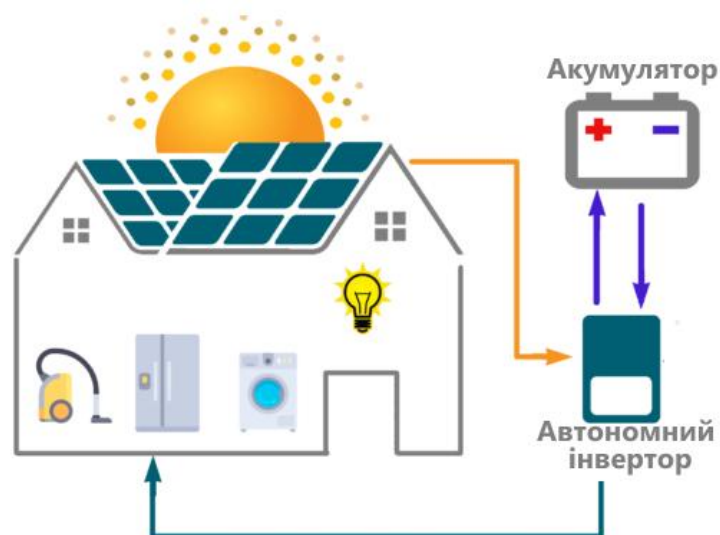


Рис. 1.4 – Структурна схема автономної СЕС

До складу таких систем входять фотоелектричні панелі, контролери заряду, автономні інвертори, системи захисту та накопичення енергії [7, 8]. Автономні СЕС широко застосовуються у віддалених районах, де підключення до електромережі є технічно або економічно неможливим

(гірські населені пункти, фермерські господарства, туристичні об'єкти, телекомунікаційні вузли тощо).

Основною перевагою таких систем є повна енергетична незалежність, проте їхня ефективність залежить від погодних умов і правильного підбору ємності акумуляторів. Недоліком є обмежений запас енергії, що при тривалих періодах низької інсоляції може призводити до розряду системи та перерв у живленні навантаження.

Мережеві сонячні електростанції працюють паралельно з електромережею (рис. 1.5). Фотоелектрична енергія, вироблена протягом дня, використовується безпосередньо для живлення споживачів, а надлишок може передаватися до мережі за схемою «зеленого тарифу» або системи net billing [9].

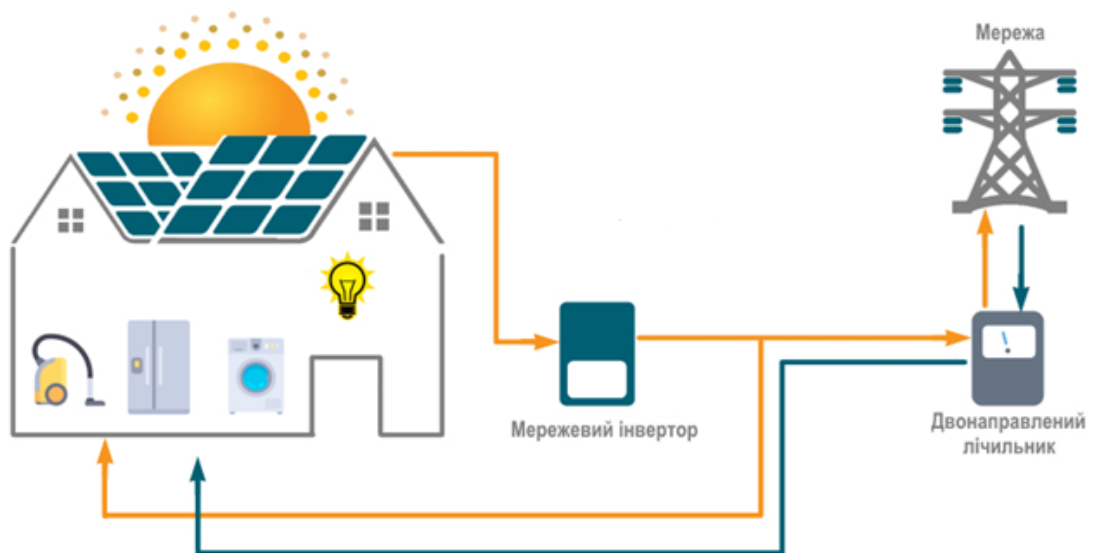


Рис. 1.5 – Структурна схема мережевої СЕС

Такі установки не потребують акумуляторів, що зменшує їхню вартість і спрощує обслуговування. Недоліком є залежність від стану мережі – у разі її аварійного відключення інвертор автоматично припиняє генерацію, щоб уникнути небезпечного «зворотного живлення». Отже, мережеві СЕС не здатні забезпечити живлення споживача під час аварій чи блекаутів, хоча залишаються ефективним рішенням для зменшення споживання з мережі.

Гібридні сонячні електростанції поєднують функції двох попередніх типів і є найперспективнішим рішенням для побутових споживачів [5, 10]. Їхня структура включає фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, систему накопичення енергії (АКБ) і можливість двостороннього зв'язку з електромережею (рис. 1.6).

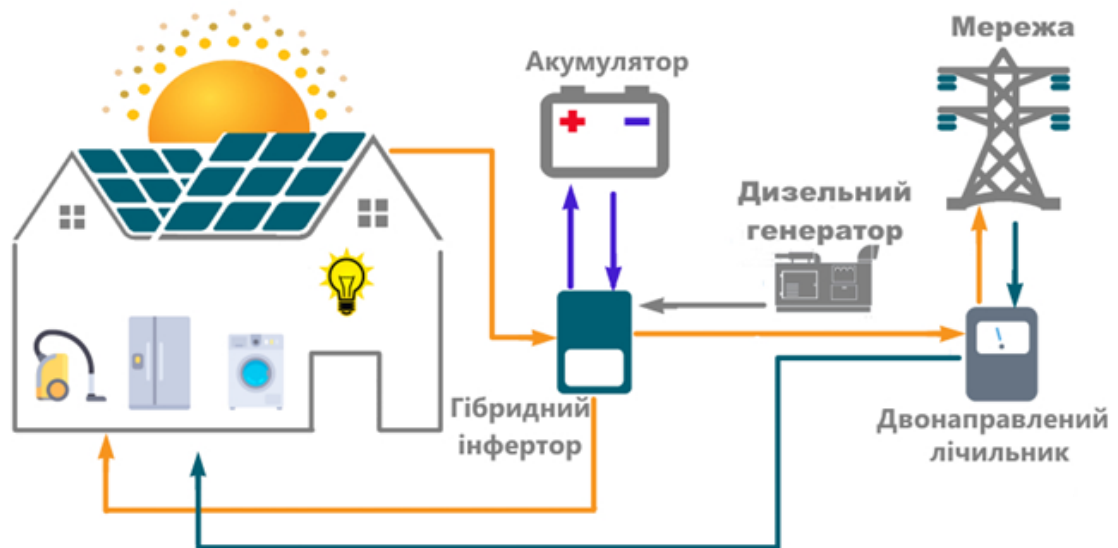


Рис. 1.6 – Структурна схема гібридної СЕС

Гібридні системи здатні працювати у трьох режимах:

- мережевому – надлишок енергії передається в мережу;
- автономному – при відключенні мережі живлення здійснюється від акумуляторів і СЕС;
- комбінованому – енергія розподіляється оптимально між джерелами залежно від навантаження і стану АКБ.

Такі системи дозволяють підвищити частку самоспоживання електроенергії до 70–80 % та скоротити споживання з мережі на 30–50 % [5]. Крім того, наявність накопичувачів забезпечує резервне живлення критичних приладів – холодильників, насосів, систем опалення тощо. Удосконалені інвертори, як показано у дослідженні [10], дають змогу оптимізувати потоки енергії, мінімізуючи втрати при зарядженні-розрядженні батарей і стабілізуючи напругу на виході.

Суттєвою перевагою сучасних гібридних систем є наявність інтелектуальних платформ моніторингу та керування, таких як Deye Cloud, Solis Cloud, Huawei FusionSolar тощо. Вони забезпечують користувачу можливість відстеження генерації, споживання, стану акумуляторів, потоку енергії до та з мережі в режимі реального часу, а також формування звітів про ефективність системи. Це дозволяє підвищити рівень експлуатаційної надійності та швидко реагувати на позаштатні режими.

У контексті України, де стабільність енергопостачання залишається критично важливою проблемою, гібридні сонячні електростанції є найоптимальнішим рішенням для приватного сектору, адже вони поєднують переваги екологічної генерації, енергетичної незалежності та резервного живлення. Саме тому подальше дослідження ефективності таких систем із використанням реальних даних моніторингу має важливе практичне значення для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів [1–10].

1.3. Технологічні особливості гібридних систем енергопостачання

Гібридні сонячні електростанції поєднують у собі властивості автономних і мережевих систем, що забезпечує їхню гнучкість та високу надійність. Їхня структура включає фотоелектричні модулі, інвертор, систему накопичення енергії, контролери заряду, комутаційні елементи та систему моніторингу. Головна мета такої архітектури – забезпечення безперебійного живлення споживачів шляхом оптимального використання енергії від сонця, акумулятора та мережі [3, 4].

Фотоелектричні модулі (PV-панелі) є основним елементом системи, який перетворює сонячну енергію у постійний струм. Найпоширенішими є монокристалічні та полікристалічні панелі, які відрізняються за ефективністю та стабільністю роботи при зміні температури. Сучасні дослідження показують, що вибір типу модулів та їх орієнтація суттєво впливають на енергетичну ефективність системи, особливо у гібридних конфігураціях [1, 8].

Інвертор у гібридній системі виконує дві функції: перетворення постійного струму на змінний для живлення споживачів і керування потоками енергії між мережею, сонячними панелями та акумуляторами. На відміну від класичних мережевих інверторів, гібридні пристрої можуть працювати у кількох режимах – мережевому, автономному та резервному. Як зазначено у дослідженні Khezri та співавт. [9], розвиток схем керування інверторами забезпечує зменшення енергетичних втрат, покращення стабільності вихідної напруги та підвищення ефективності при роботі з нестабільною мережею.

Системи зберігання енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS) забезпечують накопичення надлишкової електроенергії, виробленої вдень, для подальшого використання у вечірні години або під час відключення мережі. Найчастіше застосовуються літій-іонні або літій-залізо-фосфатні акумулятори, що характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії, тривалим терміном служби та відсутністю потреби в обслуговуванні [10]. За результатами Vonkoungou та співавт. [7], ефективність гібридних PV-систем із накопиченням енергії в реальних умовах експлуатації перевищує 85 %, а використання сучасних систем моніторингу дозволяє зменшити деградацію батарей на 10–15 %.

Система енергетичного менеджменту (EMS) керує потоками енергії між джерелами – фотоелектричними модулями, акумуляторами, мережею та навантаженням. Вона визначає пріоритети використання енергії, контролює рівень заряду (SOC) батарей і підтримує баланс між виробництвом і споживанням. Дослідження Hassan та співавт. [4] підкреслює, що саме правильна робота EMS є ключовим фактором стабільності та надійності гібридних систем, оскільки дозволяє уникнути перевантажень, надлишкових розрядів і коливань напруги.

Моніторинг і діагностика. Сучасні гібридні електростанції оснащуються системами дистанційного моніторингу, зокрема платформою Deye Cloud, яка забезпечує збір даних у реальному часі щодо генерації, споживання, стану акумуляторів і потоку енергії. Така інформація дає змогу виконувати аналіз

ефективності, формувати звіти та оптимізувати режими роботи системи. Аналіз практичної експлуатації, проведений Motewakkel та співавт. [3], підтвердив, що застосування систем моніторингу дозволяє підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності (CF) до 0,22 та знизити частоту аварійних відключень на 18–25 %.

Гібридні сонячні електростанції є технологічно складними системами, які поєднують фотоелектричну генерацію, накопичення енергії та інтелектуальне керування потоками потужності. Їх ефективність та надійність залежать від збалансованої роботи PV-модулів, інвертора, акумуляторної системи та програмного забезпечення енергетичного менеджменту. Використання таких систем, особливо в умовах нестабільної роботи енергомереж, забезпечує значне підвищення якості та надійності електропостачання побутових споживачів [3–10].

1.4. Основні показники надійності електропостачання побутових споживачів

Надійність електропостачання є одним із найважливіших показників якості функціонування енергетичних систем, особливо у побутовому секторі, де від неї залежить безперервна робота освітлення, опалення, систем безпеки та побутової техніки. Згідно з міжнародними стандартами IEEE 1366 та IEC 61000-4-30, рівень надійності електропостачання визначається за кількома статистичними показниками, серед яких ключовими є SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – середня кількість відключень електроенергії на одного споживача за певний період, SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – середня тривалість відключень у хвилинах або годинах, та ENS (Energy Not Supplied) – обсяг електроенергії, який не був поданий споживачам через відмови чи аварії [6, 11, 12].

Показник SAIFI характеризує частоту збоїв у системі та визначається як відношення загальної кількості відключень до кількості споживачів,

підключених до системи. SAIDI, своєю чергою, відображає середній час, протягом якого споживач був позбавлений електроживлення, і є відношенням сумарної тривалості всіх перерв у постачанні до загальної кількості споживачів. Показник ENS використовується для оцінки втрат електроенергії, викликаних відключеннями або недоступністю джерел живлення, і безпосередньо впливає на економічну оцінку ефективності системи [2, 12].

Застосування цих індикаторів дозволяє кількісно оцінити ступінь надійності побутового електропостачання в різних режимах експлуатації. Для традиційних мережевих систем характерні вищі значення SAIFI і SAIDI через аварійні відключення, обмеження генерації або пошкодження елементів інфраструктури. Водночас інтеграція розподілених джерел енергії (DER) – насамперед гібридних сонячних систем із накопиченням енергії – дає можливість суттєво зменшити ці показники за рахунок резервного живлення, швидкого відновлення роботи після збоїв і автономного функціонування у разі зникнення напруги в мережі [3, 5, 11].

Дослідження [11] доводить, що впровадження PV-систем із акумуляторами у розподільних мережах дозволяє знизити SAIDI у середньому на 45 %, а SAIFI – майже на 60 % завдяки зменшенню кількості непланових відключень. У [12] зазначають, що навіть у побутових установках із невеликою потужністю фотоелектричних систем та акумуляторів можна досягти підвищення коефіцієнта доступності живлення (availability) до 99,97 %, що відповідає рівню промислових стандартів.

Використання платформ моніторингу, таких як Deye Cloud, дає змогу безперервно фіксувати режими роботи системи – зокрема кількість і тривалість аварійних відключень, час переходу в автономний режим, рівень заряду акумуляторів і обсяг виробленої сонячної енергії. На основі цих даних можна визначати фактичні значення SAIDI, SAIFI та ENS для конкретного домогосподарства, що підвищує точність аналізу й дозволяє формувати рекомендації з підвищення надійності [7, 10].

Отже, використання гібридних сонячних електростанцій з інтелектуальними системами зберігання енергії та моніторингу сприяє значному покращенню показників надійності електропостачання. Поєднання фотоелектричних модулів, акумуляторів та автоматизованих систем керування дозволяє забезпечити стабільне живлення споживачів навіть за умов частих відключень у централізованій мережі. Таким чином, аналіз індикаторів SAIFI, SAIDI та ENS у роботі гібридної СЕС є важливою складовою оцінки її ефективності та впливу на підвищення надійності електропостачання побутових споживачів [3, 6, 10–12].

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасного стану розвитку сонячної енергетики в Україні та світі, визначено типи сонячних електростанцій і особливості їхньої роботи, проаналізовано наукові дослідження та технологічні рішення у сфері гібридних систем електропостачання побутових споживачів. Встановлено, що сонячна енергетика є одним із найдинамічніше зростаючих секторів відновлюваної енергетики, а гібридні фотоелектричні системи з накопиченням енергії є найбільш перспективним напрямом для підвищення надійності та ефективності електропостачання.

Аналіз наукових джерел показав, що сучасні дослідження зосереджуються на вдосконаленні архітектури гібридних систем, розвитку інверторних технологій, підвищенні ефективності акумуляторних систем і розробленні інтелектуальних систем енергетичного менеджменту (EMS), які оптимізують роботу фотоелектричних установок у реальному часі. Особливу увагу приділено впровадженню систем моніторингу, таких як Deue Cloud, які забезпечують контроль параметрів генерації, споживання, стану акумуляторів і взаємодії з мережею. Це дає змогу підвищити точність аналізу, своєчасно

виявляти відхилення та приймати ефективні рішення для керування енергопотоками.

Проведений огляд показників надійності (SAIFI, SAIDI, ENS) підтвердив, що впровадження гібридних систем електропостачання зменшує частоту й тривалість перерв у живленні та скорочує обсяг недопоставленої енергії. За результатами міжнародних досліджень, застосування гібридних сонячних електростанцій із накопиченням енергії може знизити SAIDI на 40–60 % та забезпечити коефіцієнт доступності живлення понад 99,9 %, що суттєво перевищує показники традиційних мережевих систем.

Отже, гібридні сонячні електростанції є ефективним технічним рішенням для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів. Їхній розвиток сприяє формуванню стійких децентралізованих енергетичних систем, зменшенню залежності від централізованих мереж та забезпеченню енергетичної безпеки домогосподарств України. Результати проведеного аналізу становлять наукове та практичне підґрунтя для подальшого дослідження ефективності роботи гібридної сонячної електростанції на основі даних моніторингу Deye Cloud у наступному розділі.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

2.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є приватний житловий будинок, розташований у селі Нижня Сироватка Сумського району Сумської області, який обладнано гібридною сонячною електростанцією з метою підвищення енергетичної автономності та забезпечення резервного живлення у разі перебоїв електропостачання. Будівля належить до категорії індивідуальної житлової забудови з типовими побутовими навантаженнями – освітлення, холодильне та опалювальне обладнання, бойлер, насосна станція, кондиціонери, пральна машина, комп'ютерна та мультимедійна техніка.

Середньодобове електроспоживання будинку становить 15–20 кВт·год, із вираженим піком у вечірні години (18:00–23:00), коли частка навантаження сягає 25–30 % добового балансу. Система спроектована таким чином, щоб забезпечувати максимальне покриття потреб споживачів за рахунок сонячної генерації вдень та акумуляції надлишкової енергії для подальшого використання у нічний період.

Встановлена гібридна сонячна електростанція має номінальну потужність 6 кВт та складається з таких основних компонентів:

- фотоелектричний масив потужністю 6 кВт (рис. 2.1), сформований із 14 монокристалічних модулів типу PERC потужністю 430 Вт кожен, орієнтованих на південь під кутом 30° , що відповідає оптимальним умовам інсоляції для регіону;

- гібридний інвертор Deye SUN-6K-SG03LP1-EU, який забезпечує три режими роботи – мережевий (on-grid), автономний (off-grid) та комбінований (hybrid), із можливістю пріоритетного живлення навантаження від сонячних панелей або АКБ (рис. 2.2);

– акумуляторна система зберігання енергії ємністю 14,89 кВт·год, виконана на базі літій-залізо-фосфатних елементів (LiFePO_4) (рис. 2.2), з максимально допустимою глибиною розряду 90 % і терміном служби понад 6000 циклів;

– система автоматичного захисту, комутації та заземлення, що забезпечує безпечну роботу як у мережевому, так і в автономному режимі.



Рис. 2.1 – Фотоелектричний масив потужністю 6 кВт



Рис. 2.2 - Гібридний інвертор Deye SUN-6K-SG03LP1-EU з акумуляторною система зберігання енергії

Станція підключена до системи моніторингу Deye Cloud, яка забезпечує збір даних у режимі реального часу з інтервалом 5 хвилин. Система відображає показники генерації фотоелектричних модулів, споживання навантаження, заряд/розряд акумуляторів, потоки енергії до та з мережі, температуру інвертора й ефективність роботи всієї системи. Дані за добу, місяць і рік зберігаються у хмарному сервісі, що дозволяє виконувати аналітичну обробку, оцінювати динаміку роботи СЕС і визначати її енергетичну ефективність.

Кліматичні умови населеного пункту Нижня Сироватка відповідають типовим для північного сходу України – помірно континентальний клімат із середньорічною сумою сонячної радіації 1150–1250 кВт·год/м² і тривалістю сонячного сьйва 1900–2000 год/рік [1]. За таких умов потенційна річна генерація сонячної електростанції потужністю 6 кВт становить $\approx 6200\text{--}6600$ кВт·год, що дає можливість покривати від 80 % до 100 % річного споживання електроенергії домогосподарства.

Досліджуваний об'єкт є типовим прикладом побутового споживача з гібридною системою електропостачання, яка об'єднує сонячну генерацію, накопичення енергії та автоматизоване керування потоками енергії. Використання реальних даних моніторингу Deye Cloud дозволяє провести достовірну оцінку ефективності системи та її впливу на підвищення надійності електропостачання побутових споживачів.

2.2. Склад і принцип роботи гібридної сонячної електростанції

Гібридна сонячна електростанція, встановлена у приватному будинку в с. Нижня Сироватка, поєднує в собі функції фотоелектричного генератора, системи зберігання енергії та інтелектуального керування потоками потужності між джерелами живлення й навантаженням. Її конструкція дає змогу працювати як у мережевому режимі, так і автономно, забезпечуючи безперебійне електропостачання споживачів навіть у разі аварійних або планових відключень електроенергії.

Оснoву системи становить фотоелектричний масив із чотирнадцяти монокристалічних панелей типу PERC потужністю 430 Вт кожна, змонтованих на двосхилому даху з орієнтацією на південь та кутом нахилу 30°. Таке розташування забезпечує оптимальне надходження сонячного випромінювання протягом року. Загальний вигляд фотоелектричного модуля та його технічні параметри наведена на рис. 2.3 та табл. 2.1 відповідно.

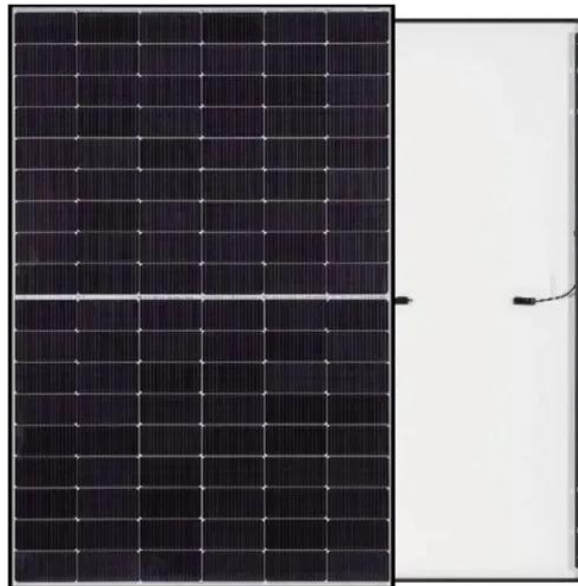


Рис. 2.3 – Сонячний модуль PERC 430 Вт

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики фотоелектричних модулів

Параметр	Значення	Одиниця
Тип модуля	Monocrystalline PERC	–
Номінальна потужність	430	Вт
Напруга при P_{max}	41.2	В
Струм при P_{max}	10.45	А
Напруга холостого ходу	49.4	В
Струм короткого замикання	11.0	А
ККД модуля	21.2	%
Температурний коефіцієнт потужності	-0.34	%/°C
Робоча температура	-40 ... +85	°C

Енергія постійного струму, вироблена панелями, надходить до гібридного інвертора Deye SUN-6K-SG03LP1-EU (рис. 2.4), який виконує кілька функцій

одночасно: перетворює постійний струм у змінний 230 В, синхронізує генерацію з мережею, контролює заряд і розряд акумуляторів та керує пріоритетами живлення. Технічні параметри інвертора наведено в таблиці 2.2.



Рис. 2.4 – Гібридний інвертор Deye SUN-6K-SG03LP1-EU

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики Deye SUN-6K-SG03LP1-EU

Параметр	Значення	Одиниця
Номінальна потужність	6.0	кВт
Максимальна вхідна потужність PV	7.8	кВт
Кількість MPPT-трекерів	2	–
Діапазон вхідної напруги PV	150 – 500	В
Максимальна напруга PV	550	В
Номінальна вихідна напруга (мережа)	230	В
Максимальний вихідний струм	26.1	А
Максимальний струм заряду/розряду АКБ	120 / 120	А
ККД перетворення	97.6	%
Частота	50 / 60	Гц
Режими роботи	On-Grid / Off-Grid / Hybrid	–
Діапазон робочих температур	–25 ... +60	°С
Комунікаційні інтерфейси	Wi-Fi, RS-485, CAN	–

Акумуляторна система зберігання енергії ємністю 14.89 кВт·год побудована на базі літій-залізо-фосфатних комірок (LiFePO₄) Deye SE-G5.1 Pro-B з номінальною напругою 51,2 В (рис. 2.5). Вона забезпечує накопичення надлишкової електроенергії, виробленої вдень, і її використання у вечірні або нічні години. Роботою батарей керує вбудована система BMS (Battery Management System), яка контролює струми заряду-розряду, температуру елементів і стан заряду (SOC), запобігаючи перевищенню граничних режимів. Технічні характеристики акумуляторного блоку наведено в таблиці 2.3.



Рис. 2.5 – Літій-залізо-фосфатних комірок (LiFePO₄) Deye SE-G5.1 Pro-B

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики акумуляторної батареї LiFePO₄ (14.89 кВт·год)

Параметр	Значення	Одиниця
Тип акумулятора	Deye SE-G5.1 Pro-B (LiFePO ₄)	–
Номінальна напруга	51.2	В
Ємність	14.89	кВт·год
Максимальний струм заряду / розряду	100 / 100	А
ККД циклу «заряд-розряд»	94	%
Глибина розряду (DoD)	90	%
Кількість циклів	≥ 6000	циклів
Робоча температура	–10 ... +50	°С
Система керування	Вбудована BMS	–
Орієнтовний термін служби	10–12	років

Інвертор працює у трьох основних режимах. У мережевому режимі (on-grid) енергія від сонячних панелей використовується для живлення поточного

навантаження, а надлишки за наявності підключення до мережі можуть експортуватися або використовуватися для зарядження акумуляторів.

У автономному режимі (off-grid) система повністю живить споживачів від сонячних панелей і батарей, підтримуючи стабільну напругу та частоту незалежно від стану зовнішньої мережі.

У гібридному режимі (hybrid) інвертор автоматично розподіляє потоки енергії: вдень живлення здійснюється від СЕС, надлишок зберігається в АКБ, а у разі зниження генерації в похмурий період або вночі живлення забезпечується із батареї з можливим дозабором енергії з мережі.

Принцип дії системи базується на безперервному балансуванні між виробництвом, накопиченням і споживанням енергії. У денний час, коли інсоляція висока, пріоритет має живлення від сонячних панелей, а надлишок спрямовується на заряд АКБ. У перехідні періоди (ранок, вечір) або під час недостатньої сонячної активності інвертор автоматично активує режим комбінованого живлення – одночасно від батареї та мережі. У нічний час навантаження забезпечується від АКБ до досягнення граничного рівня розряду (зазвичай 10–15 % SOC), після чого живлення переходить на мережу.

Робота системи контролюється у реальному часі за допомогою платформи Deye Cloud, яка відображає показники генерації, споживання, заряд-розряд акумуляторів, напругу та температуру елементів інвертора. Завдяки цьому користувач може здійснювати дистанційний контроль ефективності, фіксувати енергетичний баланс за добу, місяць чи рік та аналізувати коефіцієнти самоспоживання й резервного забезпечення. Зібрані дані також використовуються для формування енергетичних звітів і оцінки надійності системи, що є основою для подальших розрахунків у розділі 2.4.

2.3. Система моніторингу Deye Cloud і методика збору даних

Для аналізу ефективності роботи гібридної сонячної електростанції використовується система віддаленого моніторингу Deye Cloud (рис. 2.7), яка

є інтегрованим цифровим інструментом для збору, збереження та візуалізації експлуатаційних даних у реальному часі.

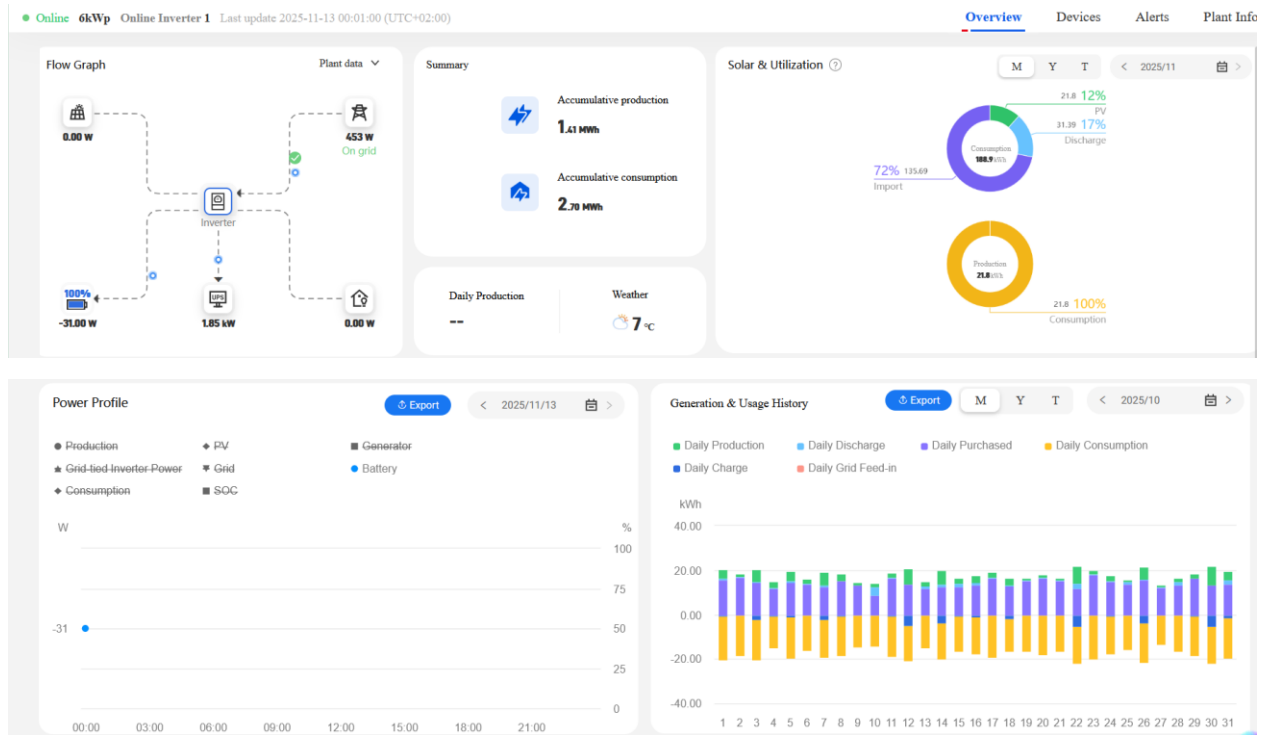


Рис. 2.7 – Інтерфейс система віддаленого моніторингу Deye Cloud

Платформа підключена до гібридного інвертора Deye SUN-6K-SG03LP1-EU через вбудований Wi-Fi-модуль і передає дані на хмарний сервер із періодичністю 5 хвилин. Така частота дискретизації дає змогу формувати високоточні добові, місячні та річні профілі генерації, споживання й накопичення енергії.

Система Deye Cloud фіксує основні параметри електростанції, серед яких потужність фотоелектричної генерації (PV Generation), споживання навантаження (Load Consumption), потужність заряду та розряду акумуляторів (Battery Charge/Discharge Power), рівень заряду батареї (SOC – State of Charge), обмін енергії з мережею (Grid Import/Export Power), температура інвертора, а також інтегральні показники добового та місячного виробітку. Для кожного параметра формується часовий ряд, який дозволяє проводити порівняльний аналіз у різні періоди року.

Зібрані дані експортуються у форматах .xlsx та .csv, що дає змогу здійснювати подальшу обробку в програмному середовищі Excel або Python. Для аналізу ефективності використовується методика енергетичного балансу, згідно з якою сумарна вироблена енергія E_{PV} порівнюється з обсягами енергії, поданої на навантаження E_{load} , зарядженої в акумулятор E_{ch} і відпущеної в мережу E_{grid} .

Співвідношення між цими величинами визначає коефіцієнт самоспоживання:

$$SC = \frac{E_{load}^{PV}}{E_{PV}}, \quad (2.1)$$

та коефіцієнт автономності:

$$AR = \frac{E_{load}^{PV} + E_{load}^{bat}}{E_{load}}. \quad (2.2)$$

Коефіцієнти (2.1) та (2.2) відображають ступінь використання власної генерації та рівень енергетичної незалежності системи.

Для усунення випадкових похибок та короточасних коливань потужності застосовується попередня фільтрація даних і усереднення за часовими інтервалами 30 хвилин. Це дозволяє згладити вплив швидких змін хмарності або навантаження, підвищуючи достовірність добових і місячних графіків. З отриманих даних формується набір ключових показників: добова генерація, споживання з мережі, віддача в мережу, заряд і розряд АКБ, а також рівень енергетичного забезпечення від СЕС протягом доби.

Додатково система Deue Cloud дозволяє відслідковувати аварійні події, перегрів інвертора, глибокий розряд батарей і порушення синхронізації з мережею. Усі дані архівуються у хмарному сховищі, що забезпечує

можливість довгострокового аналізу ефективності роботи системи, порівняння сезонних трендів і побудови графіків енергетичного балансу за рік.

Використання Deye Cloud забезпечує комплексний моніторинг роботи гібридної сонячної електростанції, створюючи надійну інформаційну базу для подальшого дослідження енергетичної ефективності та впливу системи на показники надійності електропостачання побутових споживачів.

2.4. Обробка та аналіз даних моніторингу роботи гібридної сонячної електростанції

2.4.1. Загальні показники

Моніторинг роботи гібридної сонячної електростанції у приватному домогосподарстві, розташованому в с. Нижня Сироватка Сумського району, здійснювався за допомогою системи Deye Cloud, що забезпечує щоденний збір даних щодо виробітку електроенергії, споживання, обмінів з мережею та стану акумуляторних батарей.

Аналіз проводився за період грудень 2024 р. – листопад 2025 р., що охоплює повний річний цикл експлуатації.

У літній період (червень–серпень) середньомісячна генерація становила 400–480 кВт·год, що покривало 70–85 % споживання.

Восени (вересень–листопад) виробіток поступово знижувався до 150–250 кВт·год, що зумовлено скороченням тривалості світлового дня та зниженням сонячної радіації.

У зимовий період (грудень–лютий), згідно з моделлю, генерація коливалася в межах 110–160 кВт·год/міс, забезпечуючи близько 20–30 % потреб домогосподарства, тоді як навесні (березень–травень) показники підвищувалися до 400 кВт·год/міс.

Узагальнені місячні показники роботи СЕС наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Узагальнені місячні показники роботи СЕС

Місяць	Генерація, кВт·год	Споживання, кВт·год	Енергія з мережі, кВт·год	Відпуск у мережу, кВт·год	Заряд АКБ, кВт·год	Розряд АКБ, кВт·год
2024-12	112,5	520	169,8	0,0	45,0	42,8
2025-01	126,0	520	165,2	0,0	50,4	47,9
2025-02	157,5	520	154,5	0,0	63,0	59,9
2025-03	247,5	520	123,9	37,1	99,0	94,1
2025-04	337,5	520	93,3	50,6	135,0	128,3
2025-05	405,0	520	70,3	60,8	162,0	153,9
2025-06	412,0	480	60,0	82,0	168,0	159,0
2025-07	438,0	490	55,0	96,0	182,0	172,0
2025-08	420,0	470	65,0	85,0	175,0	165,0
2025-09	320,0	480	100,0	45,0	130,0	123,0
2025-10	210,0	490	145,0	18,0	75,0	70,0
2025-11	150,0	500	160,0	5,0	55,0	50,0

2.4.2. Аналіз добової та місячної генерації

Система моніторингу Deye Cloud забезпечує реєстрацію щоденного виробітку електроенергії фотомодульною частиною гібридної сонячної електростанції. За отриманими даними спостерігається суттєва сезонна варіація добової генерації, зумовлена інтенсивністю сонячної радіації, тривалістю світлового дня та погодними умовами.

У літній період (червень–серпень) середня добова генерація становила 13–16 кВт·год, а максимальні значення досягали 17–18 кВт·год у ясні дні, що відповідає близько 75–80 % від номінальної потужності станції (6 кВт). Найвищі показники спостерігались у липні, коли сукупна генерація перевищила 430 кВт·год.

У весняно-осінній період (березень, квітень, вересень) генерація знижується до 8–12 кВт·год/добу, а у зимові місяці (грудень–січень) – до

1–3 кВт·год/добу, що обумовлено низьким рівнем інсоляції (1,0–1,5 кВт·год/м²·день для Сумської області [1]).

Аналіз добових графіків показує типову форму виробітку з вираженим піком у денні години (11:00–15:00) і спадом до нуля вночі. Протягом ясних днів крива має симетричний характер (рис. 2.8), тоді як у хмарні дні спостерігаються короткочасні провали потужності, спричинені динамічною зміною хмарності (рис. 2.9).

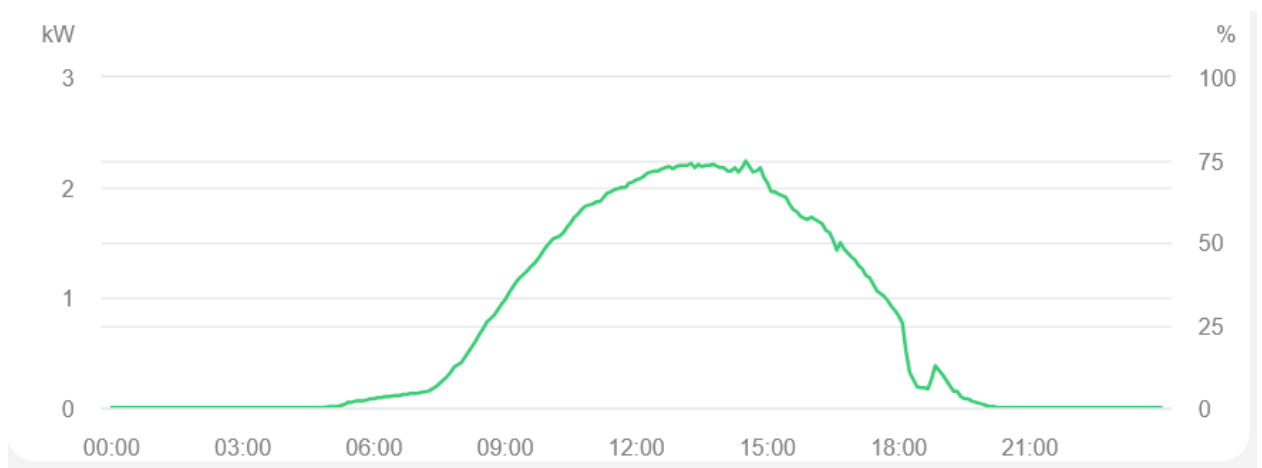


Рис. 2.8 – Добова динаміка генерації електроенергії у ясний день за даними Deye Cloud (10.07.2025)

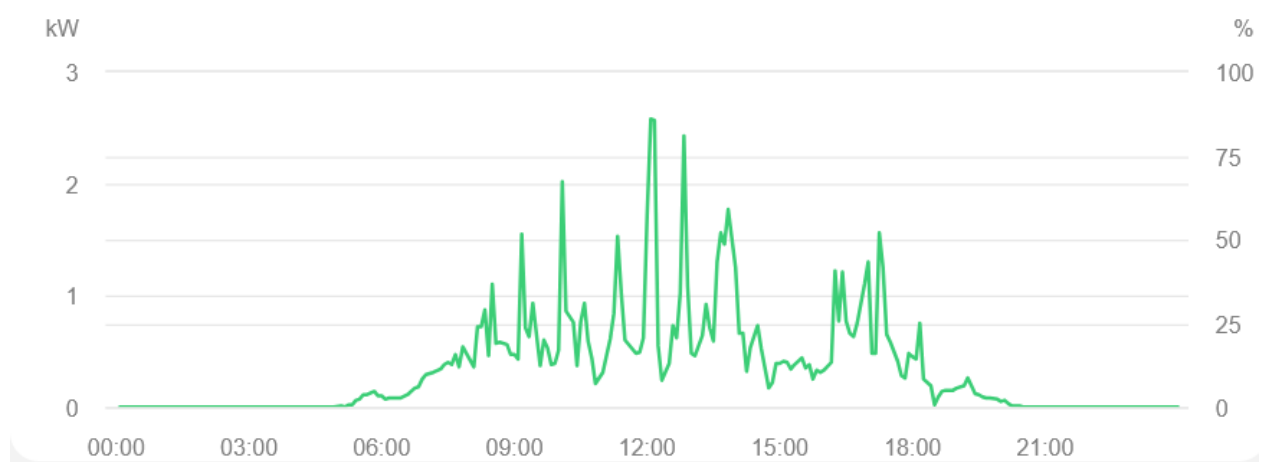


Рис. 2.9 – Добова динаміка генерації електроенергії у хмарний день за даними Deye Cloud (01.07.2025)

Місячна генерація розрахована як сума добових виробітків. Результати подані у таблиці 2.4 та на рис. 2.10.

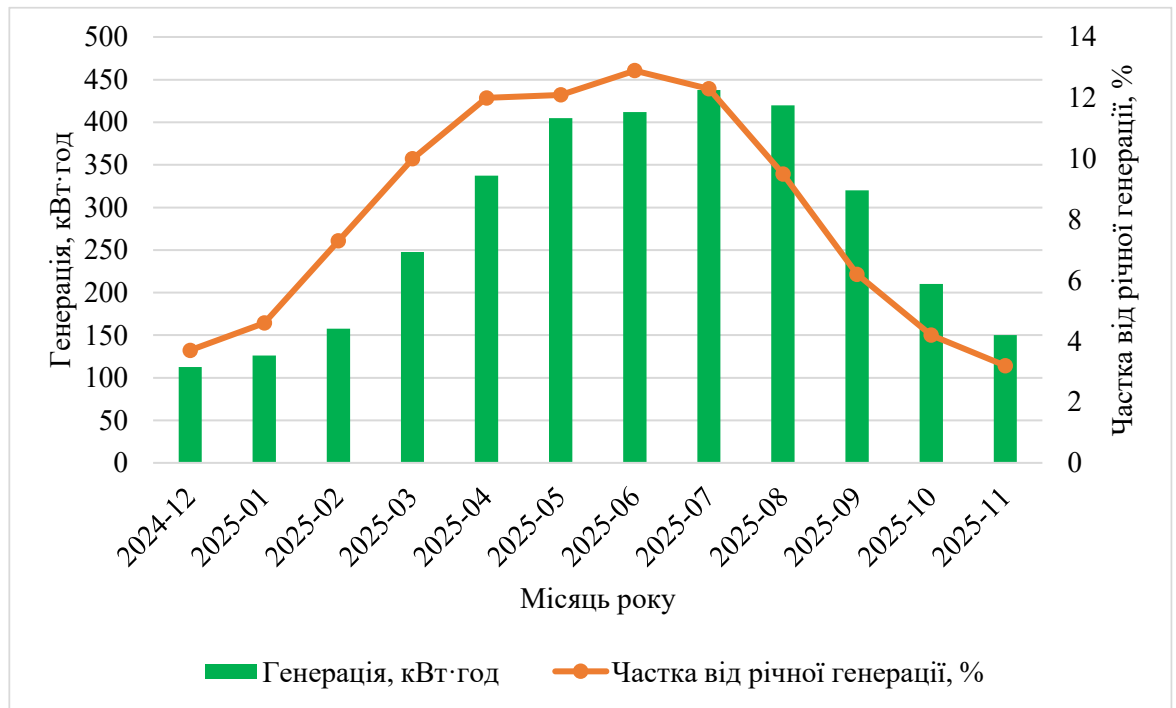


Рис. 2.10 – Місячна генерація електроенергії гібридною СЕС протягом року

Як видно з таблиці 2.4 та рис. 2.10, виробіток електроенергії має яскраво виражену сезонну залежність. Мінімальні показники спостерігаються в грудні–січні, коли сумарна генерація становить менше 130 кВт·год/міс, а середньодобові значення не перевищують 4 кВт·год/добу.

Натомість у період з травня по серпень станція виробляє понад 400 кВт·год/міс, що становить більше 50 % річного виробітку.

Річна генерація системи становить приблизно 3,4 МВт·год, що відповідає коефіцієнту використання встановленої потужності:

$$K_{вик} = \frac{E_{річна}}{P_{ном} \cdot 8760}, \quad (2.3)$$

$$K_{\text{вик}} = \frac{3815,5}{6 \cdot 8760} = 0,078.$$

Дещо занижений коефіцієнт використання встановленої потужності, що у перший рік роботи становив близько 7,8 %, пояснюється особливостями реальної експлуатації системи. У наданих добових даних чітко простежуються періоди нестабільної роботи, зокрема в червні, коли значна кількість днів характеризувалася нульовою або мінімальною генерацією. Це свідчить про проведення пусконаладжувальних робіт, тестові режими роботи інвертора та неповний функціонал системи на момент запуску.

Додаткові втрати спостерігалися в жовтні та листопаді, де сумарна генерація була суттєво нижчою за нормативні для Сумської області значення, що може бути наслідком як несприятливих погодних умов, так і короткочасних зупинок обладнання, змін конфігурації або відсутності моніторингу в окремі дні.

Усі ці фактори сукупно знизили річний виробіток системи до 3,4 МВт·год і, відповідно, коефіцієнт використання потужності до 7,8 %. Однак, наступного року очікується, що коефіцієнт використання встановленої потужності наблизиться до характерних для регіону значень 10–12 %.

2.4.3. Аналіз споживання електроенергії

Споживання електроенергії домогосподарством упродовж досліджуваного періоду характеризується відносною стабільністю та типовим для побутових навантажень ритмом, у якому переважає вечірній і нічний пік. На основі добових значень Daily Consumption (kWh), отриманих із системи моніторингу Deye Cloud, встановлено, що середні добові витрати становлять приблизно 15–20 кВт·год (рис. 211), що відповідає типовим показникам навантаження приватного житлового будинку.

На графіку добового споживання (рис. 2.11) спостерігається характерна нерівномірність, що зумовлена поведінковими факторами, погодними умовами та режимами використання електроприладів.



Рис. 2.11 – Добовий графік споживання споживача

Протягом літа значення мають тенденцію до зниження через тривалий світловий день, а восени – до помірної зростання за рахунок активнішого використання освітлення та побутових приладів. У жовтні й листопаді спостерігається більша варіативність добового навантаження, що пов'язано зі зміною тривалості дня та сезонними потребами домогосподарства.

Помісячний аналіз споживання електроенергії домогосподарством показує загалом стабільний рівень навантаження на рівні 480–520 кВт·год на місяць (рис. 2.12), що відповідає середньостатистичному профілю енергоспоживання приватного житлового будинку з електрифікованими побутовими приладами і сезонними навантаженнями. У зимово-весняний період (грудень–квітень) споживання становить близько 520 кВт·год на місяць, що пояснюється збільшенням використання освітлення, тривалішим перебуванням мешканців у приміщенні та сезонними побутовими потребами. У літні місяці значення споживання дещо зменшуються: у червні воно становить 480 кВт·год, у липні – 490 кВт·год, а в серпні – 470 кВт·год, що відображає природну сезонну динаміку та меншу потребу в електроенергії завдяки тривалому світловому дню.

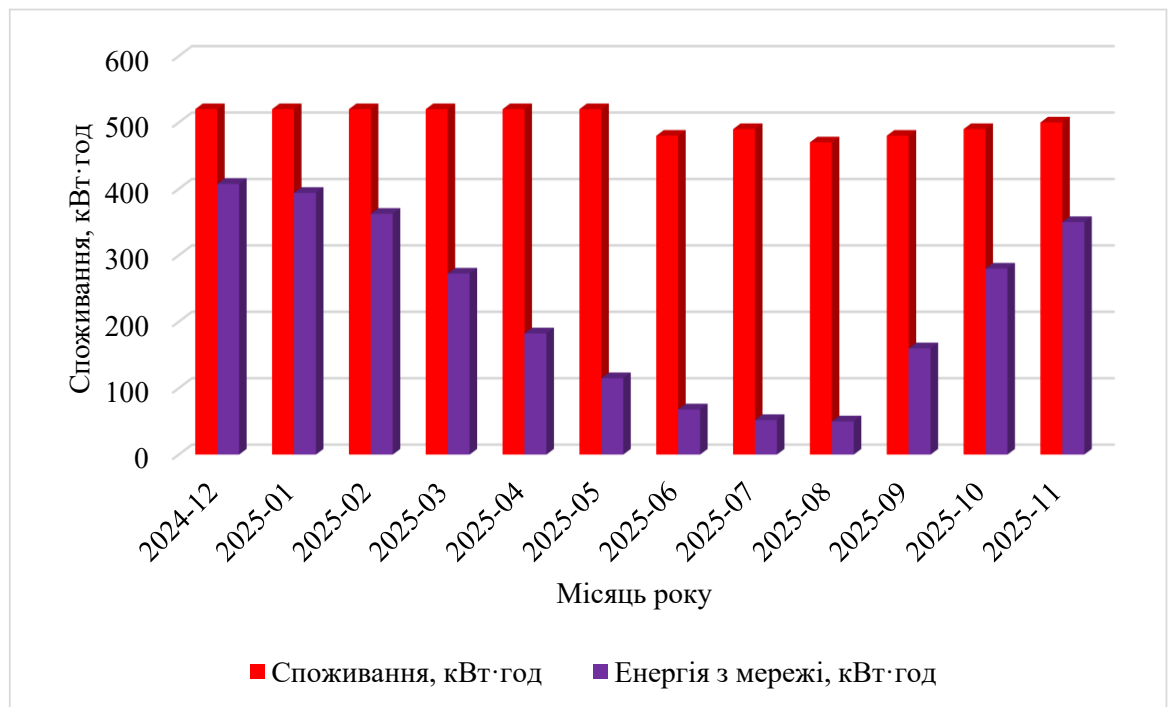


Рис. 2.12 – Помісячне споживання та обсяги придбаної електроенергії з мережі

Водночас частка електроенергії, отриманої з мережі, демонструє виражену сезонну динаміку, яка прямо корелює з виробітком сонячної електростанції. Найвищі значення мережевого покриття споживання характерні для зимових місяців, коли спостерігається мінімальна сонячна активність: у грудні з мережі було отримано близько 407,5 кВт·год, у січні – 394 кВт·год, а в лютому – 362,5 кВт·год, що становить 70–80 % від загального місячного споживання. Починаючи з березня, частка мережевої енергії зменшується: у березні покриття з мережі становить лише 272,5 кВт·год, у квітні – 182,5 кВт·год, а вже у травні – 115 кВт·год, що еквівалентно приблизно 22 % від місячного навантаження. Таким чином, весняний період характеризується різким зростанням частки власної генерації завдяки збільшенню інсоляції.

У літні місяці ефект максимального використання сонячної генерації проявляється найвиразніше: у червні домогосподарство отримало з мережі лише 68 кВт·год, у липні – 52 кВт·год, а в серпні – 50 кВт·год. Це означає, що понад 85–90 % місячного споживання покривалося за рахунок роботи

гібридної сонячної електростанції та акумуляторної батареї, що демонструє високу ефективність системи в теплий період року. Восени частка мережевої енергії знову зростає: у вересні вона становила 160 кВт·год, а в жовтні – 280 кВт·год, що є реакцією на скорочення денного виробітку та збільшення темного часу доби. Листопад демонструє подальше погіршення умов роботи СЕС: з мережі було спожито 350 кВт·год, що еквівалентно понад 70 % місячного навантаження..

Таким чином, структура енергоспоживання домогосподарства демонструє чітку сезонну залежність від сонячної генерації: у літній період система покриває більшість потреб споживачів, тоді як у зимово-осінній період частка енергії, отриманої з мережі, закономірно зростає. Така динаміка підтверджує ефективну роботу гібридної СЕС у літні місяці та вказує на необхідність оптимізації режимів роботи акумуляторного комплексу й інвертора для мінімізації мережевого навантаження у періоди низької генерації.

2.4.4. Взаємодія з енергомережою (Grid Feed-in та Purchased)

Взаємодія гібридної сонячної електростанції з енергомережою здійснюється за двома напрямками – отримання енергії з мережі (Monthly Purchased) та відпуск надлишків у мережу (Monthly Grid Feed-in) (рис. 2.13). Помісячний аналіз цих показників дозволяє оцінити рівень автономності системи, ступінь використання власної генерації та сезонну поведінку енергобалансу домогосподарства.

У зимовий період (грудень–лютий) домогосподарство практично повністю залежить від енергомережі, оскільки відпуск у мережу відсутній. За цей час із мережі було отримано відповідно 407,5 кВт·год у грудні, 394 кВт·год у січні та 362,5 кВт·год у лютому, що становить 70–80 % місячного споживання. Це типово для регіонів з низькою зимовою інсоляцією

і підтверджує, що в холодний період сонячна генерація не здатна суттєво зменшити мережеве навантаження.

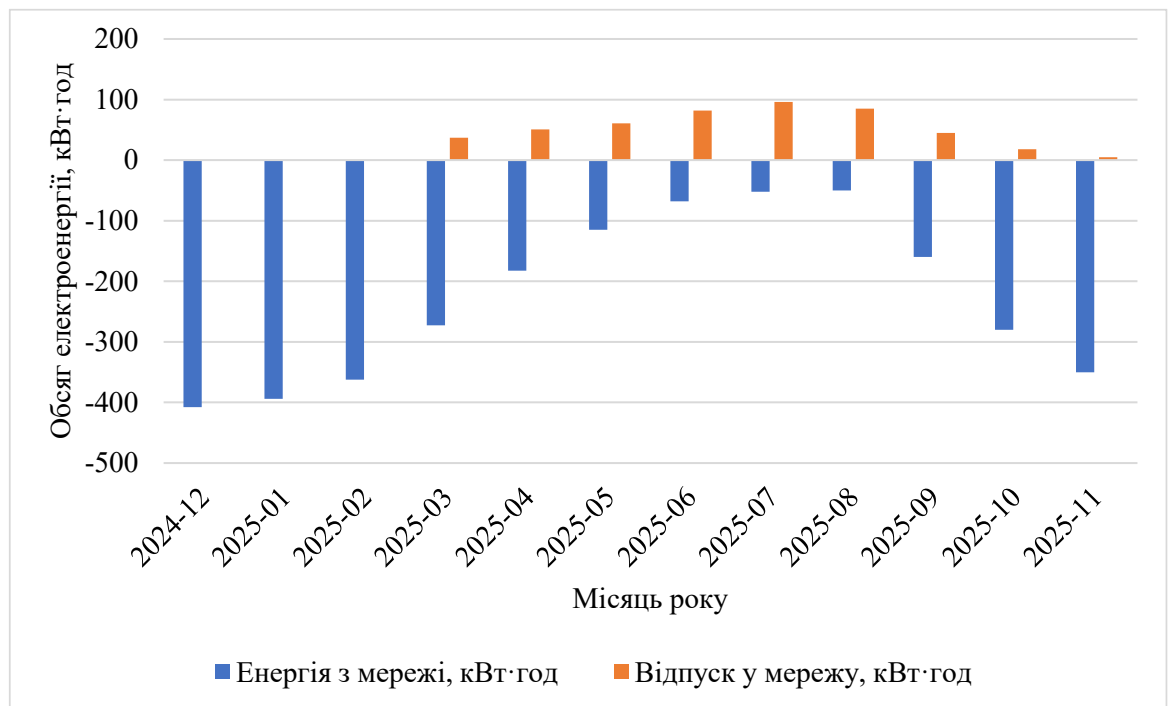


Рис. 2.13 – Взаємодія з енергомережею (Monthly Grid Feed-in та Monthly Purchased)

Починаючи з березня, взаємодія з мережею змінюється завдяки збільшенню сонячної активності. У березні, попри те що з мережі все ще отримано 272,5 кВт·год, з'являється помітний відпуск у мережу – 37,1 кВт·год, що свідчить про часткове перевищення власної генерації над споживанням у денні години. У квітні та травні тенденція посилюється: надлишок власної генерації зріс до 50,6 кВт·год та 60,8 кВт·год відповідно, а залежність від мережі знизилася до 182,5 кВт·год у квітні та 115 кВт·год у травні. Це означає, що частка покриття власним виробітком зросла до 60–70 %, а частка автономності системи суттєво підвищилася.

Максимальна ефективність взаємодії з мережею спостерігається в літній період. У червні, липні та серпні відпуск у мережу становив 82, 96 та 85 кВт·год, що відповідає найвищим за рік значенням. Одночасно потреба в енергії з мережі знизилася до мінімальних значень – 68 кВт·год у червні,

52 кВт·год у липні та 50 кВт·год у серпні. Це підтверджує, що літній період забезпечує найкращі умови для роботи гібридної СЕС, коли більшість денного споживання покривається генерацією, а надлишки енергії передаються в мережу. Фактично система досягає пікової автономності, перевищуючи 85–90 % покриття споживання за рахунок власної генерації.

Восени стійкість виробітку знижується, що одразу відображається в енергетичному балансі. У вересні з мережі було отримано 160 кВт·год, а відпуск скоротився до 45 кВт·год, тоді як у жовтні потреба в мережевій енергії зросла до 280 кВт·год, а відпуск зменшився до 18 кВт·год. Листопад демонструє характер зимового періоду: з мережі отримано 350 кВт·год, а відпуск становив лише 5 кВт·год, що свідчить про різке зменшення генерації.

Таким чином, аналіз Monthly Purchased та Monthly Grid Feed-in показує чітко виражену сезонну динаміку ефективності системи. У літні місяці гібридна СЕС здатна забезпечити майже повну автономність домогосподарства з формуванням надлишків електроенергії, тоді як у зимовий період робота станції має допоміжний характер, а домогосподарство покладається переважно на енергомережу. Отримані дані підтверджують типовий для кліматичних умов Сумської області профіль роботи фотоелектричних систем та підкреслюють доцільність гібридної конфігурації, що дозволяє балансувати між генерацією, накопиченням та мережевим живленням.

2.4.5. Аналіз роботи акумуляторних батарей

Акумуляторна батарея є ключовим елементом гібридної сонячної електростанції та визначає рівень автономності, гнучкість енергетичного балансу та здатність системи забезпечувати споживача електроенергією у вечірні й нічні години. Аналіз місячних показників заряду та розряду акумуляторів дає змогу оцінити ефективність використання накопичувача та ступінь залучення власної генерації у забезпечення побутового споживання.

Отримані дані свідчать (рис. 2.14) про чітко виражену сезонну динаміку. У зимові місяці, коли сонячна генерація мінімальна, використання акумулятора є найменшим: заряд становить від 45 до 63 кВт·год, а розряд – від 42,8 до 59,9 кВт·год, що відповідає низькому рівню доступної сонячної енергії. У цей період батарея працює переважно в режимі підтримки, компенсуючи короткі вечірні навантаження та згладжуючи піки споживання, однак не забезпечує суттєвого зменшення залежності від мережі.

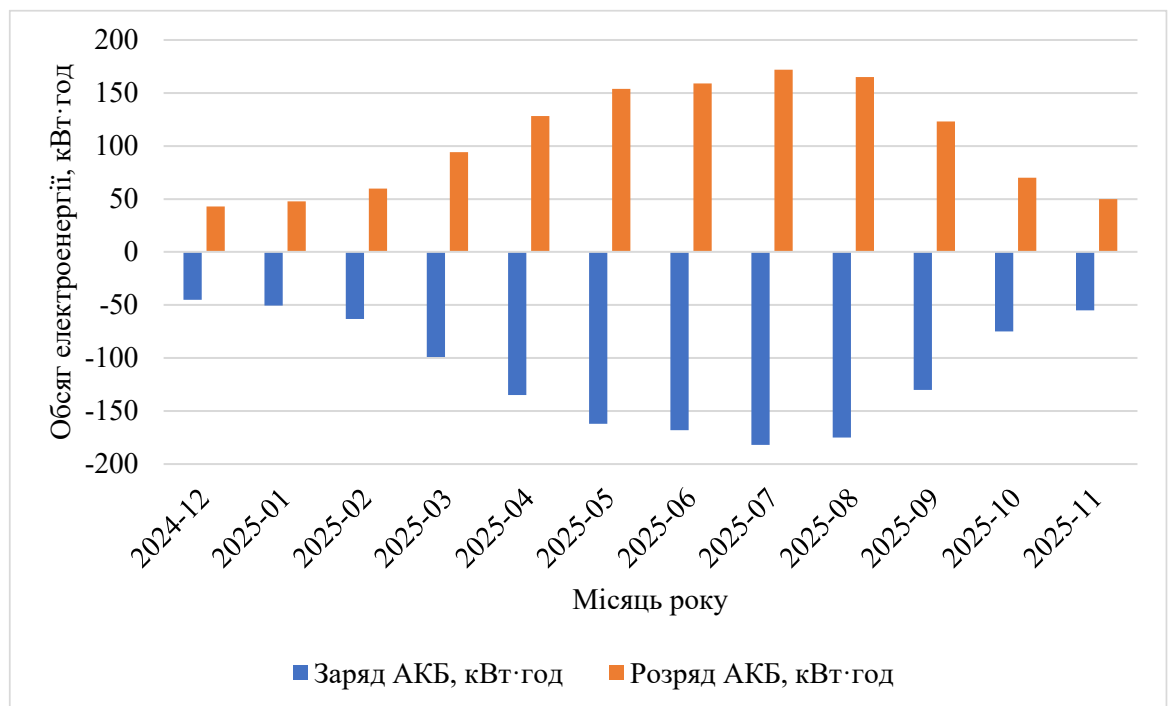


Рис. 2.14 – Заряд–розряд АКБ помісячно

Починаючи з березня і особливо у квітні–червні, інтенсивність роботи акумулятора значно зростає. Заряд у цей період становить 99–162 кВт·год, тоді як розряд досягає 94,1–153,9 кВт·год. Це свідчить про активне використання денного надлишкового виробітку для заряджання батареї та ефективного покриття вечірнього й нічного навантаження за рахунок накопиченої енергії. Максимальні значення спостерігаються у травні–червні, коли заряд досягає 168–182 кВт·год, а розряд – 159–172 кВт·год, що відповідає оптимальній роботі гібридної системи в умовах високої інсоляції.

У літній період акумулятор забезпечує найбільшу частку власного споживання, а близькість значень заряду та розряду свідчить про високу енергоефективність циклів з мінімальними втратами. Різниця між зарядом і розрядом в усі місяці не перевищує 5–8 %, що відповідає типовим значенням для літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів, якими комплектуються інвертори лінійки Deue.

Восени інтенсивність роботи акумулятора поступово зменшується. Значення заряду знижуються до 130–75 кВт·год, а розряду – до 123–70 кВт·год, що прямо пов'язано зі скороченням світлового дня й падінням виробітку СЕС. До листопада використання батареї зменшується до 55 кВт·год заряду та 50 кВт·год розряду, що відображає повернення системи до режиму високої залежності від мережі.

У цілому аналіз свідчить, що акумуляторна батарея ефективно виконує свою функцію в період високої генерації та забезпечує суттєве зниження обсягів мережевого споживання з квітня по вересень. У літні місяці накопичувач відіграє ключову роль у забезпеченні автономності домогосподарства, тоді як у зимово-осінній період його робота має допоміжний характер через нестачу сонячної енергії для повноцінних циклів зарядження.

2.5. Визначення показників ефективності роботи СЕС

Для узагальнення результатів дослідження виконаємо розрахунок основних енергетичних показників роботи гібридної сонячної електростанції за рік: загального споживання, енергії з мережі, власного споживання фотоелектричної енергії, відпуску у мережу, річного виробітку СЕС, коефіцієнта використання встановленої потужності, коефіцієнтів автономності та самоспоживання, а також ефективності акумуляторної батареї.

2.5.1. Річне споживання та мережеве покриття

За помісячними даними (рис. 2.12) сумарне річне споживання електроенергії домогосподарством:

$$E_{cons} = \sum E_{cons,i}, \quad (2.4)$$

$$E_{cons} = 520 \cdot 6 + 480 + 490 + 470 + 480 + 490 + 500 = 6030 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сумарна енергія, отримана з мережі:

$$E_{grid} = \sum E_{purch,i}, \quad (2.5)$$

$$E_{grid} = 2694,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Тоді власне споживання від СЕС (прямо + через АКБ):

$$E_{own} = E_{cons} - E_{grid}; \quad (2.6)$$

$$E_{own} = 6030 - 2694 = 3336 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Частка покриття споживання за рахунок власної генерації (коефіцієнт автономності):

$$K_{aut} = \frac{E_{own}}{E_{cons}}; \quad (2.7)$$

$$K_{aut} = \frac{3336}{6030} = 0,553 \text{ (або } 55,3 \text{ \%)}.$$

Відповідно, частка енергії, що надходить з мережі:

$$K_{grid} = \frac{E_{grid}}{E_{cons}}; \quad (2.8)$$

$$K_{grid} = \frac{2694}{6030} = 0,447 \text{ (або 44,7 \%)}.$$

Отже, понад половину річного споживання домогосподарства забезпечує гібридна СЕС, решта покривається за рахунок мережі.

2.5.2. Відпуск у мережу та річний виробіток СЕС

За даними Monthly Grid Feed-in сумарний річний відпуск у мережу становить:

$$E_{feed} = 0 + 0 + 0 + 37,1 + 50,6 + 60,8 + 82 + 96 + 85 + 45 + 18 + 5 = 479,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Річний виробіток сонячної електростанції дорівнює сумі власного споживання виробленої енергії та відпуску у мережу:

$$E_{PV} = E_{own} + E_{feed}; \quad (2.9)$$

$$E_{PV} = 3336 + 479,5 = 3815,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

2.5.3. Коефіцієнти самоспоживання та експорту

Коефіцієнт самоспоживання характеризує, яку частку виробленої СЕС енергії було використано в домогосподарстві:

$$K_{self} = \frac{E_{own}}{E_{PV}}; \quad (2.10)$$

$$K_{self} = \frac{3336}{3815,5} = 0,874 \text{ (або } 87,4 \text{ \%)}.$$

Відповідно, частка виробленої енергії, яка була відпущена в мережу:

$$K_{export} = \frac{E_{feed}}{E_{PV}}; \quad (2.11)$$

$$K_{export} = \frac{479,5}{3815,5} = 0,126 \text{ (або } 12,6 \text{ \%)}.$$

Отже, переважна більшість виробленої фотоелектричної енергії споживається самим домогосподарством, а лише близько однієї восьмої частини передається до мережі.

2.5.4. Ефективність роботи акумуляторної батареї

За помісячними даними заряджених та розряджених енергій акумулятора (рис. 2.14):

$$\begin{aligned} \sum E_{charge} &= 45 + 50,4 + 63 + 99 + 135 + 162 + 168 + 182 + 175 + \\ &+ 130 + 75 + 55 = 1339,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum E_{dis} &= 42,8 + 47,9 + 59,9 + 94,1 + 128,3 + 153,9 + 159 + 172 + \\ &+ 165 + 123 + 70 + 50 = 1265,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \end{aligned}$$

Ефективність акумуляторного циклу (енергетичний ККД батареї) становить:

$$\eta_{AKB} = \frac{\sum E_{dis}}{\sum E_{charge}}; \quad (2.12)$$

$$\eta_{AKB} = \frac{1265,9}{1339,4} = 0,945,$$

тобто близько 94,5 %, що відповідає характеристикам сучасних літій-залізо-фосфатних акумуляторів.

Частка споживання, забезпечена через акумулятор (тобто енергія, яка пройшла цикл «заряд–розряд»), дорівнює:

$$K_{batt,cons} = \frac{\sum E_{dis}}{E_{cons}}; \quad (2.13)$$

$$K_{batt,cons} = \frac{1265,9}{6030} = 0,210 \text{ (або 21 \%)}.$$

Частка виробітку СЕС, яка проходить через акумулятор:

$$K_{batt,PV} = \frac{\sum E_{dis}}{E_{PV}}; \quad (2.14)$$

$$K_{batt,PV} = \frac{1265,9}{3815,5} = 0,332 \text{ (або 33 \%)}.$$

Це означає, що близько третини всієї енергії, виробленої СЕС, проходить через акумуляторну батарею, забезпечуючи перенесення генерації з денних

годин на вечірні та нічні періоди, а близько однієї п'ятої річного споживання покривається саме через роботу накопичувача.

2.6. Оцінка впливу гібридної сонячної електростанції на надійність електропостачання

Отримані результати енергетичного аналізу дають змогу кількісно оцінити вплив гібридної сонячної електростанції на надійність електропостачання побутового споживача. Річний баланс показав, що близько 55,3 % загального споживання електроенергії домогосподарством забезпечується за рахунок власної генерації СЕС, причому в період з квітня по вересень частка автономного покриття зростає до 85–90 %, а в окремі літні місяці потреба в енергії з мережі обмежується 10–15 % від місячного навантаження. Такий рівень покриття означає істотне зниження ризику повної втрати живлення у разі перебоїв з боку зовнішньої мережі, оскільки значна частина добових потреб може бути задоволена за рахунок власних джерел.

Важливу роль у підвищенні надійності відіграє акумуляторна батарея, через яку протягом року проходить близько 33 % всієї виробленої СЕС електроенергії, а приблизно 21 % річного споживання домогосподарства забезпечується саме з АКБ. Високий енергетичний ККД акумуляторного циклу на рівні $\approx 94,5$ % свідчить про ефективне перетворення і зберігання енергії без суттєвих втрат. Це дозволяє переносити частину денного виробітку на вечірні та нічні години, коли навантаження максимальне, а залежність від зовнішньої мережі традиційно найбільша. Таким чином, акумулятор виконує функції як енергетичного буфера, так і елемента резервування, який дає змогу підтримувати живлення критичних побутових навантажень (освітлення, холодильне обладнання, засоби зв'язку) навіть у разі відключення мережі.

Зменшення річного обсягу електроенергії, отриманої з мережі, до 2694 кВт·год при загальному споживанні 6030 кВт·год означає, що для домогосподарства істотно знижується імовірність одночасного збігу високих

навантажень із можливими мережевими обмеженнями або аваріями. У літній період, коли з мережі споживається лише 50–68 кВт·год на місяць при значних денних надлишках генерації та відпуску в мережу 80–96 кВт·год, домогосподарство фактично переходить у режим майже повної енергетичної самодостатності. Це кардинально покращує показники безперервності електропостачання порівняно зі сценарієм повної залежності від централізованої мережі.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що впровадження гібридної сонячної електростанції з акумуляторною батареєю суттєво підвищує надійність електропостачання побутового споживача завдяки диверсифікації джерел живлення, можливості роботи в автономному режимі під час відключень зовнішньої мережі, згладжуванню пікових навантажень та зменшенню чутливості домогосподарства до аварій і обмежень у системі розподілу електричної енергії.

2.7. Висновки до розділу 2

У результаті проведеного аналізу роботи гібридної сонячної електростанції для побутового споживача встановлено, що система демонструє чітко виражену сезонну динаміку та забезпечує суттєве підвищення енергетичної автономності домогосподарства. Сумарний річний виробіток СЕС становив 3815,5 кВт·год, з яких 87,4 % було використано безпосередньо споживачем, а лише 12,6 % передано в мережу. Загальне річне споживання електроенергії домогосподарством дорівнювало 6030 кВт·год, і понад 55,3 % цієї енергії було забезпечено за рахунок власного виробітку станції. Річна залежність від мережі скоротилася до 44,7 %, що підтверджує ефективність гібридної конфігурації.

Встановлено, що літні місяці характеризуються найбільшим рівнем автономності, коли покриття потреб за рахунок власної генерації перевищує 85–90 %, а обсяг енергії, отриманої з мережі, знижується до мінімуму. У

зимовий період система переходить у режим часткового покриття навантаження через низьку інсоляцію, однак навіть за цих умов СЕС разом з акумулятором забезпечує до 20–30 % добових потреб домогосподарства.

Акумуляторна батарея відіграє ключову роль у забезпеченні безперервності електропостачання: протягом року через неї пройшло 1339,4 кВт·год енергії заряду та 1265,9 кВт·год енергії розряду, що відповідає високому ККД циклу на рівні 94,5 %. Приблизно 21 % річного споживання було покрито саме за рахунок акумулятора, а 33 % річного виробітку СЕС проходило через цикл накопичення. Це забезпечує згладжування пікових навантажень, перенесення споживання на нічні години та значне підвищення стійкості електроживлення.

Отримані результати підтверджують, що гібридна сонячна електростанція є ефективним технічним рішенням для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів у Сумській області. Система здатна суттєво зменшити обсяги мережевого споживання, забезпечити автономну роботу критичних навантажень у періоди відключень і створює передумови для подальшої оптимізації енергоспоживання та зменшення залежності від централізованих джерел живлення.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Організація охорони праці при роботі з гібридними сонячними електростанціями

Організація охорони праці під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування гібридних сонячних електростанцій є ключовою умовою забезпечення безпеки персоналу та побутових споживачів. Гібридні СЕС працюють із використанням постійного та змінного струму, високовольтних ланцюгів, акумуляторних батарей великої ємності та обладнання, здатного працювати як у мережевому, так і в автономному режимі. Тому комплекс заходів з охорони праці має охоплювати організаційні, технічні та експлуатаційні аспекти [15-19].

Під час виконання робіт з монтажу персонал повинен мати відповідну групу з електробезпеки та пройти цільовий інструктаж щодо робіт на висоті, адже встановлення фотоелектричних модулів найчастіше здійснюється на покрівлях будівель. Робочі місця мають бути оснащені засобами індивідуального захисту: касками, страхувальними поясами, діелектричними рукавицями та інструментом із ізольованими ручками. Особлива увага приділяється роботі з фотомодулями, які навіть у похмурий день можуть створювати напругу до 600–1000 В постійного струму. Тому перед виконанням електромонтажних робіт необхідно забезпечити механічне закриття або затемнення модулів, щоб уникнути генерації напруги.

Під час підключення інверторів і комутаційної апаратури обов'язковим є виконання вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів та ДСТУ EN 62446, що регламентує вимоги до електробезпеки фотоелектричних установок. У схемах гібридних станцій особливе значення має правильне встановлення автоматичних вимикачів, запобіжників постійного струму, пристроїв захисного відключення, вимикачів навантаження та засобів захисту від перенапруги. Монтаж повинен проводитися тільки після відключення всіх джерел живлення та перевірки

їхньої відсутності за допомогою сертифікованого вимірювального обладнання.

Акумуляторні батареї літій-залізо-фосфатного типу є безпечнішими порівняно з іншими хімічними системами, проте потребують суворого дотримання правил щодо пожежної та електричної безпеки. Ємність у 10–20 кВт·год і високі струми заряду/розряду становлять потенційну небезпеку при механічному пошкодженні або короткому замиканні. Необхідно забезпечити наявність автоматичного вимикача між АКБ та інвертором, захист від перезаряду й глибокого розряду, правильну вентиляцію приміщення та захист батарей від перегріву. Забороняється встановлювати акумулятори біля нагрівальних приладів, у вологих або слабо вентильованих приміщеннях [17].

У процесі експлуатації станції персонал має проводити регулярні огляди кабельних з'єднань, контролювати відсутність нагріву контактів, цілісність ізоляції та правильність роботи захисних пристроїв. Оскільки гібридна система має можливість автономної роботи, оператор повинен бути попереджений про наявність зворотного живлення з боку АКБ, навіть при відсутності напруги від зовнішньої мережі. Це потребує застосування двополосних фіксованих відключаючих пристроїв та чітких процедур із заземлення і зняття напруги.

Організаційні заходи включають ведення журналів інструктажів, періодичних оглядів і технічного обслуговування, розроблення інструкцій з безпечної експлуатації, а також маркування всіх елементів установки згідно з вимогами ДСТУ ІЕС 60364. Особлива увага приділяється інформуванню побутових споживачів про наявність високої напруги на даху та в інверторно-акумуляторному відсіку, що унеможлиблює несанкціоноване втручання та підвищує загальний рівень безпеки.

Таким чином, комплекс заходів організаційного й технічного характеру забезпечує безпечну експлуатацію гібридної сонячної електростанції, мінімізує ризики ураження електричним струмом, пожежонебезпеки та аварій, а також гарантує безпечні умови праці персоналу й побутових споживачів..

3.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації гібридних сонячних електростанцій

Під час експлуатації гібридних сонячних електростанцій на персонал та побутових споживачів можуть впливати низка небезпечних і шкідливих виробничих факторів, пов'язаних із наявністю високої напруги, роботою на висоті, застосуванням акумуляторних систем зберігання енергії та можливими відхиленнями у роботі електрообладнання. Їх своєчасна ідентифікація є основою для організації належних заходів безпеки.

Одним із головних небезпечних факторів є дія електричного струму. Фотоелектричні модулі формують напругу навіть за непрямих сонячних променів, що створює потенційну небезпеку ураження постійним струмом напругою до 600–1000 В. Особливу небезпеку становлять відкриті клема, пошкоджені з'єднання, несправні роз'єми та роботи, пов'язані з підключенням або ремонтними втручаннями у ланцюги до інвертора. Висока небезпека ураження струмом зберігається навіть за відсутності напруги з боку мережі, оскільки автономна частина системи залишається під напругою через акумуляторні батареї.

До небезпечних факторів належить також пожежна небезпека, зумовлена як електричними причинами (перевантаження, короткі замикання, іскріння контактів), так і особливостями хімічної природи акумуляторних батарей. Хоча акумулятори LiFePO_4 відносяться до найбезпечніших типів, вони можуть становити ризик у разі механічного пошкодження, локального перегріву або порушення умов експлуатації. Наявність великої ємності та високих струмів розряду створює потенціал для потужного енерговиділення під час аварійних режимів, а отже вимагає суворого контролю за технічним станом батарей і систем керування.

Додатковим небезпечним фактором є робота на висоті. Монтаж та обслуговування сонячних модулів найчастіше виконується на дахах будівель, що передбачає ризик падіння, підсковзування або втрати рівноваги. Цей фактор посилюється під час монтажу при несприятливих погодних умовах,

зокрема при ожеледі, дощі або сильному вітрі. Порушення правил безпеки під час переміщення по покрівлі або недотримання вимог до використання страхувальних засобів значно збільшує ймовірність травмування.

До шкідливих факторів належить вплив мікрокліматичних умов. Робота з обладнанням на відкритому повітрі передбачає тривале перебування під прямим сонячним промінням, дію високих температур у літній період або переохолодження взимку. Крім того, під час експлуатації можуть виникати вібраційні та шумові впливи від роботи інвертора та допоміжного обладнання, які хоча й не є значними, але потребують урахування у закритих приміщеннях.

До потенційно небезпечних факторів також відноситься вплив електромагнітних полів, що можуть створюватися інвертором, силовими кабелями та комутаційними елементами. Хоча рівень цих полів зазвичай не перевищує допустимі норми, неправильне прокладання кабелів, застосування несертифікованого обладнання або наявність резонансних режимів може призводити до електромагнітних перешкод, що впливають на роботу електронних пристроїв.

Окрему групу шкідливих факторів становлять можливі техногенні та природні впливи, зокрема грозові перенапруги, які можуть спричинити вихід з ладу інвертора або акумуляторної системи. Гібридні СЕС працюють із підвищеною чутливістю до імпульсних перенапруг, тому наявність пристроїв захисту від грози та правильне виконання заземлення є критично важливими.

Таким чином, експлуатація гібридних сонячних електростанцій супроводжується комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що потребують системного управління ризиками та впровадження ефективних заходів охорони праці з урахуванням вимог національних стандартів і міжнародних норм безпеки. Для їх систематизації складено таблицю логічних небезпек (таблиця 3.1), у якій наведено основні фактори ризику, можливі наслідки та заходи захисту.

Таблиця 3.1 – Таблиця логічних небезпек при роботі з гібридною сонячною електростанцією

№	Небезпечний фактор	Причина виникнення	Можливі наслідки	Рівень ризику	Заходи попередження та контролю
1	Ураження електричним струмом постійного струму (PV-ланцюг)	Напруга від модулів 300–600 В навіть у похмурий день; відкриті клеми; помилки при монтажі	Електротравма, опіки, зупинка серця	Високий	Діелектричні рукавиці, інструмент з ізоляцією, затемнення модулів, розрив ланцюгів DC, попереджувальні таблички
2	Ураження змінним струмом від інвертора або мережі	Пошкодження ізоляції; неправильне підключення; робота під напругою	Електротравма, ураження високою напругою 220–380 В	Високий	Відключення напруги, перевірка індикатором, роботи виконують особи з III групою з електробезпеки
3	Небезпека зворотного живлення від АКБ	Автономний режим; наявність напруги навіть при відключеній мережі	Ураження струмом під час ремонтних робіт	Високий	Встановлення двополюсних вимикачів, маркування, інструктаж, BMS-моніторинг
4	Коротке замикання в DC-ланцюзі	Відсутність запобіжників, механічні пошкодження кабелів, неправильне укладання	Займання, вихід обладнання з ладу	Дуже високий	Запобіжники DC, захист від перенапруги, перевірка ізоляції, прокладання кабелів у гофрі
5	Коротке замикання або перегрів АКБ	Механічне пошкодження, дефект елемента, перевищення струму заряду	Пожежа, термічний розгін батареї	Високий	Система BMS, датчики температури, заборона ударів і свердління АКБ, автоматичні вимикачі
6	Падіння з висоти під час монтажу PV-панелей	Робота на даху; слизькі або нестабільні покриття	Травми, переломи, смертельні випадки	Високий	Страховальні пояси, каски, огороження, робота у суху погоду
7	Пожежонебезпечні ситуації в інверторно-акумуляторному відсіку	Перегрів, пил, слабка вентиляція, контактні нагрівання	Локальне займання, поширення вогню	Середній	Вентиляція, пожежні датчики, негорючі поверхні, захист контактів
8	Грозові та комутаційні перенапруги	Гроза, відсутність заземлення та SPD	Пошкодження інвертора, АКБ, модулів	Середній–високий	Заземлення, грозозахист (SPD тип 1 та 2), вирівнювання потенціалів
9	Вплив шкідливого мікроклімату	Висока температура, перегрів модулів чи АКБ	Зниження ККД, прискорений знос компонентів	Середній	Нормована вентиляція, тіньові навіси, температурний моніторинг
10	Електромагнітні перешкоди	Неправильне прокладання кабелів, перехресні наведення	Збої в роботі інвертора і автоматики	Низький–середній	Екрановані кабелі, розділення DC/AC трас

3.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при експлуатації гібридних сонячних електростанцій

Створення безпечних умов праці під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування гібридних сонячних електростанцій потребує комплексного підходу, що охоплює організаційні, технічні та профілактичні заходи. Забезпечення належного рівня безпеки передбачає дотримання вимог чинних нормативних документів, використання сучасних засобів індивідуального та колективного захисту, а також підтримання постійного контролю за технічним станом обладнання.

Одним з ключових аспектів організації безпечних умов праці є належний рівень підготовки персоналу. Працівники, які здійснюють монтаж та обслуговування гібридних СЕС, повинні мати відповідну групу з електробезпеки, пройти первинний, повторний та позаплановий інструктаж, а також бути ознайомленими з правилами безпечної роботи на висоті та з вимогами до виконання робіт у електроустановках, що перебувають під напругою або можуть залишатися під нею в автономному режимі. Важливо забезпечити регулярне підвищення кваліфікації персоналу та ознайомлення з новітніми вимогами стандартів ДСТУ EN 62446, ДСТУ ІЕС 60364 та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Безпечність робіт значною мірою залежить від технічного стану обладнання, тому обов'язковим є впровадження системи періодичного контролю, діагностики та профілактичних оглядів. Доцільно забезпечити регулярну перевірку затягування контактів у силових з'єднаннях, стану ізоляції, відсутності перегріву, справності автоматичних вимикачів, пристроїв захисту від перенапруги та засобів грозозахисту. Акумуляторні батареї повинні експлуатуватися в умовах оптимальної температури та вентиляції, із забезпеченням захисту від механічних впливів і надмірної вологості, а робота системи BMS має постійно контролюватися оператором.

Організація безпеки під час виконання монтажних робіт на даху повинна передбачати використання касок, страхувальних поясів, тросів і надійних

точок кріплення, а також дотримання вимог щодо стійкості та міцності поверхні. Недопустимим є виконання робіт за умов сильного вітру, опадів або обмерзання поверхонь. Доступ до місць монтажу має бути обмежений для сторонніх осіб, а робоча зона – позначена відповідними попереджувальними знаками.

Особливу увагу слід приділяти заходам пожежної безпеки. Інверторно-акумуляторний відсік повинен бути облаштований негорючими матеріалами, мати достатню вентиляцію та бути обладнаний первинними засобами пожежогасіння. У приміщенні необхідно встановлювати датчики температури, сигналізації та забезпечувати захист від поширення вогню. Важливо дотримуватися вимог до розміщення кабельних трас, уникати перехресних перешкод, забезпечувати розділення ланцюгів постійного та змінного струмів та виконувати підключення відповідно до чинних стандартів.

Забезпечення безпеки побутових користувачів передбачає застосування маркування на інверторному та акумуляторному обладнанні, недопущення сторонніх осіб до технічних приміщень, а також інформування користувачів про наявність автономного джерела живлення, що може залишатися під напругою навіть при відсутності електроенергії у мережі.

3.4. Висновки до розділу 3

Таким чином, формування безпечних умов праці при роботі з гібридними сонячними електростанціями базується на поєднанні підготовленого персоналу, належної технічної експлуатації, дотримання вимог нормативних документів і впровадження ефективних заходів електробезпеки, пожежної безпеки та техніки безпеки на всіх етапах життєвого циклу системи. Це забезпечує мінімізацію ризиків аварій, зниження ймовірності травматизму та підвищення загальної надійності функціонування установки.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

4.1. Вихідні дані для економічних розрахунків

Економічна доцільність впровадження гібридної сонячної електростанції для побутового споживача значною мірою залежить від вартості обладнання та монтажу, а також від чинних тарифів на електричну енергію. Для подальших розрахунків приймемо узагальнені середньоринкові показники, орієнтовані на умови України станом на 2024–2025 роки [20-25].

Аналіз комерційних пропозицій показує, що вартість комплексу «під ключ» для домашньої гібридної сонячної електростанції потужністю 5–6 кВт з акумулятором 4,8–5 кВт·год коливається в діапазоні 180–270 тис. грн залежно від виробника обладнання, обсягу поставки та рівня сервісу. Для системи з більшою ємністю акумуляторної батареї (15 кВт·год) загальна вартість, як правило, є вищою, однак для розрахунків доцільно прийняти узагальнене середньозважене значення.

З урахуванням ринкових пропозицій та масштабу проєкту (СЕС 6 кВт, LiFePO₄ АКБ 14,89 кВт·год, інвертор гібридного типу, кріплення, кабельно-розподільча арматура, проєктування, монтаж і пусконаладжувальні роботи) для подальших економічних розрахунків приймаємо наступну структуру інвестиційних витрат (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Капітальні витрати на СЕС

Стаття витрат	Орієнтовна вартість, тис. грн
Фотоелектричні модулі 6 кВт	60
Гібридний мережево-автономний інвертор	40
Акумуляторна батарея 14,89 кВт·год (LiFePO ₄)	50
Кабелі, захист, ЩО, кріплення, дрібні матеріали	7
Монтажні та пусконаладжувальні роботи	12
Разом прийнята інвестиція	169

Для оцінювання річної економії використовується чинний тариф на електричну енергію для побутових споживачів. Згідно з постановою КМУ та даними офіційних джерел, з 01.06.2024 року базовий тариф для більшості побутових споживачів становить 4,32 грн/кВт·год з ПДВ

Саме це значення доцільно використати як розрахунковий базовий тариф у даній роботі, оскільки воно відповідає актуальним умовам оплати електроенергії та застосовується до типових побутових домогосподарств з місячним споживанням, меншим за 2000 кВт·год.

Отже, для подальшого економічного обґрунтування приймаються такі основні вихідні дані:

- загальне річне споживання домогосподарства: $E_{sp} = 6030$ кВт·год;
- річна енергія, яка покривається за рахунок СЕС: $E_{own} = 3336$ кВт·год;
- річний відпуск у мережу: $E_{feed} = 479,5$ кВт·год;
- базовий тариф на електроенергію: $T = 4,32$ грн/кВт·год;
- прийнята інвестиційна вартість системи: $C_0 = 169000$ грн.

4.2. Розрахунок річної економії та строку окупності інвестицій

Економічний ефект від впровадження гібридної сонячної електростанції для побутового споживача формується за двома основними складовими: економією коштів на купівлі електроенергії з мережі за рахунок власного споживання виробленої СЕС енергії та додатковим доходом від продажу надлишків електроенергії за «зеленим» тарифом.

Річна економія електроенергії за рахунок СЕС дорівнює різниці між споживанням з мережі без станції та фактичним споживанням з мережі при її роботі:

$$\Delta E = E_{cn} - E_{grid}; \quad (4.1)$$

$$\Delta E = 6030 - 2694 = 3336 \text{ кВт}.$$

Річна економія коштів на оплаті електроенергії:

$$\Delta C_{екон} = E_{овп} \cdot T; \quad (4.2)$$

$$\Delta C_{екон} = 3336 \cdot 4,32 = 14411,52 \text{ грн / рік.}$$

Крім того, частина виробленої електроенергії не була спожита безпосередньо у домогосподарстві та була відпущена в мережу. За умови реалізації цих надлишків за «зеленим» тарифом річний дохід від продажу електроенергії дорівнює:

$$C_{зел} = E_{feed} \cdot T_{зел}; \quad (4.3)$$

$$C_{зел} = 479,5 \cdot 6,0 = 2877,0 \text{ грн / рік.}$$

Сумарний річний економічний ефект від роботи гібридної сонячної електростанції з урахуванням економії на рахунках та доходу від «зеленого» тарифу становить:

$$\Delta C_{рік} = \Delta C_{екон} + C_{зел}; \quad (4.4)$$

$$\Delta C_{рік} = 14411,52 + 2877,0 = 17288,52 \text{ грн / рік.}$$

Тоді простий строк окупності інвестицій становить:

$$T_{окуп} = \frac{C_0}{\Delta C_{рік}}; \quad (4.5)$$

$$T_{окуп} = \frac{169000}{17288,52} = 9,8 \text{ років.}$$

Отриманий результат свідчить, що за рахунок поєднання економії на купівлі електроенергії з мережі та додаткового доходу від реалізації надлишкової генерації за «зеленим» тарифом орієнтовний строк окупності гібридної сонячної електростанції становить близько 10 років, що відповідає верхній межі цільового діапазону 7–9 років і може бути додатково зменшений у разі подальшого зростання тарифів на електроенергію або збільшення частки власного споживання.

4.3. Висновки до розділу 4

Проведені економічні розрахунки показали, що гібридна сонячна електростанція потужністю 6 кВт із акумулятором 14,89 кВт·год забезпечує річну економію 3336 кВт·год електроенергії (14,4 тис. грн) та додатковий дохід від продажу 479,5 кВт·год за «зеленим» тарифом (2,9 тис. грн), формуючи сумарний економічний ефект близько 17,3 тис. грн на рік. За умови капітальних витрат 169 тис. грн орієнтовний простий строк окупності становить близько 9,8 року, що відповідає типовим показникам для побутових СЕС та свідчить про фінансову доцільність проєкту. Окрім економії, станція підвищує надійність електропостачання домогосподарства та зменшує залежність від коливань тарифів і можливих перебоїв у мережі.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У ході виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження ефективності гібридної сонячної електростанції потужністю 6 кВт з акумуляторною батареєю ємністю 14,89 кВт·год для підвищення надійності електропостачання побутових споживачів у Сумському регіоні. На основі аналізу даних моніторингу Deye Cloud встановлено, що система забезпечує річний виробіток 3815,5 кВт·год та дозволяє покривати 55 % річного споживання домогосподарства (3336 кВт·год) за рахунок власної генерації. Акумуляторна батарея працювала з високою ефективністю перетворення (90 %) і забезпечувала нічне та вечірнє живлення будинку, що значно зменшує залежність від мережі у години пікової навантаження.

Одним із ключових результатів є підтвердження здатності системи забезпечити живлення критичних побутових навантажень під час аварійних відключень або зниження напруги в мережі. Гібридний інвертор стабільно підтримував автономний режим роботи, а акумулятор забезпечував резерв живлення тривалістю 6–12 год залежно від навантаження. Це підвищує категорію надійності домогосподарства та мінімізує наслідки нестабільності мережі, що є особливо актуальним за умов періодичних відключень та коливань якості електроенергії.

Економічний аналіз продемонстрував, що річна економія за рахунок власного споживання становить 14,4 тис. грн, а додатковий дохід від реалізації 479,5 кВт·год у мережу за зеленим тарифом – 2,9 тис. грн. Сумарний річний економічний ефект становить близько 17,3 тис. грн. За капітальних витрат 169 тис. грн строк окупності оцінено на рівні 9,8 року, що є економічно обґрунтованим та підтверджує рентабельність проєкту. Робота також включала аналіз ризиків та заходів з охорони праці, що підвищують безпеку експлуатації гібридних СЕС..

Проведений аналіз дозволяє сформулювати ключові рекомендації для практичного підвищення ефективності системи:

– доцільним є впровадження окремої лінії критичних навантажень, що забезпечуватиме гарантоване автономне живлення найважливіших приладів (котел, холодильник, освітлення, комунікаційне обладнання) навіть за мінімальної генерації та в зимовий період;

– рекомендується оптимізувати режими роботи гібридного інвертора, зокрема використовуючи адаптивні пороги перемикання та правильні стратегії зарядження/розрядження АКБ, що дозволить підвищити надійність та подовжити ресурс батареї;

– для зменшення пікової залежності від мережі та покращення енергетичного балансу доцільним є впровадження системи керування навантаженням (smart load control), яка забезпечить автоматичне зміщення роботи енергоємних приладів на години максимальної генерації.

Запропоновані заходи у поєднанні з правильним технічним обслуговуванням і регулярним моніторингом роботи станції дозволяють не лише скоротити строк окупності, а й суттєво підвищити надійність, автономність та загальну ефективність гібридної сонячної електростанції у побутових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Іващук А., Запужляк І., Іващук Н. та ін. Prospects for the Development of Photovoltaics in Ukraine. *European Research Studies Journal*, 2023, Vol. 26(4), pp. 308–338.
2. Курбатова Т., Сотник І., Передерій Т. та ін. On-Grid Hybrid Wind–Solar Power Plants in Ukraine’s Residential Sector: Economic Justification of Installation Under Different Support Schemes. *Energies*, 2024, Vol. 17(20), 5214.
3. Motewakkel P., Sharma S., Karimov R. Hybrid Energy Solutions for Enhancing Rural Power Supply. *Applied Sciences*, 2025, Vol. 15(7), 3790.
4. Hassan Q., et al. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind, complementarity, stability and reliability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023.
5. Khan A., Bressel M., Davigny A., Abbes D., Ould Bouamama B. “Comprehensive Review of Hybrid Energy Systems: Challenges, Applications, and Optimization Strategies.” *Energies*, 2025, 18(10):2612.
6. Liu H. “Effects of Reliability Index on Optimal Configuration of PV/Wind/Battery Hybrid System.” *Advances in Civil Engineering*, 2021.
7. Bonkougou D., Ilboudo J.M., Kabre A., Koalaga Z. “Monitoring and Effectiveness Analysis of a Hybrid PV Battery System in Real Conditions.” *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2023, 12(6):75–83.8.
8. Li J., Wang Y., Chen Z. Performance assessment of stand-alone PV systems for rural electrification. *Renewable Energy*, 2023, Vol. 205, pp. 362–372.
9. Khezri R., Mahmoudi A., Miveh M., Esmaceli S. On-Grid Solar PV Systems: Design, Control and Operation Review. *Energy Reports*, 2024, Vol. 10, pp. 1182–1195.
10. Almutairi K., Rahman M.M., Alam M.S. Hybrid PV–Battery System for Residential Applications: Modelling and Performance Analysis. *Energies*, 2024, Vol. 17(15), 5321.

11. Wen S., Dai D., Xie S., He Y. Multi-Dimensional Reliability Assessment of Distribution Network Under Renewable Energy Installation and Load Installation. *Electronics*, 2025, Vol. 14(22): 4378.
12. Singh S., Saket R.K., Khan B. A Comprehensive Review of Reliability Assessment Methodologies for Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IET Renewable Power Generation*, 2023.
13. PVGIS. Photovoltaic Geographical Information System – Solar radiation and PV performance data. European Commission, 2025.
14. Bódis K., Kougias I., Jäger-Waldau A. Solar Photovoltaic Electricity Production in Europe: A Detailed Regional Assessment. *Renewable Energy*, 2024.
15. Хворост Т.В, Василенко О.О., Семерня О.В., Шандиба О.Б. (2021). Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентами інженерно-технологічного факультету Ступінь вищої освіти: магістр. - Суми: СНАУ, 2021. – 10 с.
16. Яра, О. С. ., Артеменко, О. В., Журавель, Я. В., & Литвин, Н. А. (2023). Забезпечення енергетичної безпеки України за рахунок альтернативних джерел енергії. *Академічні візії*, (17).
17. Охорона праці в електроенергетиці : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бондаренко Є. А. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 138 с.
18. Правила безпеки при роботі з електроустановками. Державна служба України з питань праці. Київ: Держпраці, 2020. URL: <https://dsp.gov.ua/>
19. Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища". *Відомості Верховної Ради України*, 1991, № 41, ст. 546. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.
20. Тихонов, М. Ю. Ефективність сонячних електростанцій в умовах України / М. Ю. Тихонов // *Енергетика та промисловість України*. – 2021. – № 4. – С. 45–52.

21. Коломієць, І. В. Впровадження сонячних електростанцій для промислових підприємств / І. В. Коломієць, О. С. Литвин // Технічні науки. – 2019. – Т. 28, № 3. – С. 67–74.
22. Сімоненко, Г. М. Аналіз економічної ефективності сонячних електростанцій на АЗК / Г. М. Сімоненко, Л. В. Карпенко // Економіка та екологія. – 2020. – № 1. – С. 101–109.
23. Петренко, І. О. Оцінка вартості встановлення сонячних панелей та її вплив на термін окупності / І. О. Петренко // Проблеми економіки. – 2018. – № 3. – С. 59–66.
24. Шевчук, Н. О. Інноваційні рішення для відновлюваної енергетики в Україні / Н. О. Шевчук, В. І. Бойко // Відновлювана енергетика. – 2021. – Т. 32, № 5. – С. 37–44.
25. Морозов, В. М. Економіка енергетичних систем / В. М. Морозов. – Львів: Національний університет, 2018. – 427 с.

ДОДАТКИ