

**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 роботи мережевої сонячної електростанції»

Виконав

\_\_\_\_\_ (підпис)

Владислав РІЗНИЧЕНКО

Група

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

Рецензент:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олена ДОВЖИК

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

Владиславу РІЗНІЧЕНКУ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

- Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження роботи мережевої сонячної електростанції»
- Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, к.т.н., доцент
- Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
- Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз стану питання та перспектив використання мережевих сонячних електростанцій в Україні; 2. Техніко-експериментальне дослідження роботи мережевої сонячної електростанції; 3. Охорона праці; 4. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.
- Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав РІЗНІЧЕНКО

(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 перспектив використання мережевих сонячних електростанцій в Україні»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Техніко-експериментальне дослідження роботи мережевої сонячної електростанції»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
9.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
10.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
11.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
12.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Здобувач

\_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав РІЗНИЧЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

**Різнiченко Владислав Юрiйович.** Дослiдження роботи мережевої сонячної електростанцiї.

Квалiфiкацiйна робота на здобуття магiстра за освiтньою програмою «Електроенергетика, електротехнiка та електромеханiка» зi спецiальностi 141 «Електроенергетика, електротехнiка та електромеханiка». Сумський нацiональний аграрний унiверситет, Суми, 2025.

Квалiфiкацiйна робота присвячена всебiчному дослiдженню технiчних, енергетичних та економiчних аспектiв функцiонування мережевої сонячної електростанцiї (СЕС) потужностю 9 МВт, розташованої в Київській облaстi. Актуальнiсть теми зумовлена зростанням ролi вiдновлюваних джерел енергiї в енергетичнiй полiтицi України, необхідностю зменшення залежностi вiд традицiйних паливно-енергетичних ресурсiв та пiдвищення енергетичної безпеки в умовах сучасних викликiв. Крім того, розвиток мережевих СЕС вiдповiдає глобальним тенденцiям декарбонiзацiї та iнтеграцiї чистої генерацiї в електроенергетичнi системи.

У роботi проаналiзовано стан та динамiку розвитку сонячної енергетики в України, її нормативно-правове забезпечення, технiчнi особливостi мережевих СЕС i ключовi фактори, що впливають на їх ефективнiсть. Представлено характеристику об'єкта дослiдження, що включає використання 35280 фотоелектричних модулiв JA Solar (330 Вт), iнверторiв GPTech 3MWD3-V560-F, силового трансформатора CG Power Systems 4000 кВА та обладнання високовольтного вiдсiку Ormazabal Velatia. Окрему увагу придiлено системi монiторингу iнсоляцiї, яка базується на використаннi пiранометрiв CPM10 та CUV5, а також калiброваних модулiв.

Експериментальнi дослiдження виконано на основi реальних вимiрювань добової та мiсячної сонячної радiацiї, показникiв роботи iнверторiв, генерацiї електроенергiї та технiчної доступностi обладнання. Проаналiзовано

відхилення між прогнозними та фактичними величинами інсоляції. Встановлено, що місячні відхилення становили від  $-50,6\%$  (грудень) до  $+26\%$  (вересень), а середньорічне відхилення для горизонтальної поверхні –  $-1,9\%$ , для площини масиву –  $-10,9\%$ .

Оцінювання технічної доступності показало, що фактичний показник  $99,93\%$  перевищує гарантований рівень  $99,5\%$ , а втрати електроенергії через аварійні відключення не перевищили  $275$  кВт·год за рік, що становить лише  $0,0023\%$  загального виробітку. Виявлені аварійні ситуації пов'язані переважно з порушенням ізоляції стрингів на окремих ділянках поля.

Фактичний річний виробіток електроенергії становив  $12049,5$  МВт·год, що на  $45,1\%$  перевищує розрахунковий показник ( $8306,54$  МВт·год). Найбільший місячний виробіток зафіксовано в липні ( $1868,3$  МВт·год), найменший – у грудні ( $101,8$  МВт·год). Розрахунок економічної ефективності показав, що за умови дії «зеленого» тарифу  $0,1503$  €/кВт·год річний дохід електростанції становить  $1,81$  млн €, що підтверджує її фінансову привабливість та рентабельність.

Результати дослідження підтверджують, що досліджувана мережева СЕС характеризується високою технічною та економічною ефективністю, стабільністю роботи та низькими експлуатаційними ризиками. Запропоновані рекомендації можуть бути використані для подальшої оптимізації роботи СЕС, підвищення її продуктивності та продовження строку служби обладнання. Робота має практичне значення для операторів, проєктувальників та власників сонячних електростанцій в Україні.

**Ключові слова:** сонячна енергетика; мережева сонячна електростанція; фотоелектричні модулі; інсоляція; піранометр; технічна доступність; виробіток електроенергії; інвертор; стрингові лінії; енергоефективність; «зелений» тариф; економічна ефективність; моніторинг генерації; експлуатація СЕС.

## ABSTRACT

**Riznichenko Vladyslav Yuriiovich.** Study of the Operation of a Grid-Connected Solar Power Plant.

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 qualification thesis is devoted to a comprehensive study of the technical, energy and economic aspects of a 9 MW grid-connected solar power plant (SPP) located in the Kyiv region. The relevance of the topic is determined by the growing role of renewable energy sources in Ukraine’s energy policy, the need to reduce dependence on conventional fuel and energy resources, and the strengthening of energy security under current challenges. In addition, the development of grid-connected SPPs aligns with global trends of decarbonization and integration of clean generation into modern power systems.

The thesis analyses the state and dynamics of solar energy development in Ukraine, the regulatory framework, technical features of grid-connected SPPs, and key factors influencing their efficiency. The technical characteristics of the studied power plant are presented, including 35,280 JA Solar modules (330 W), GPTECH 3MWD3-V560-F inverters, a CG Power Systems 4000 kVA power transformer, and Ormazabal Velatia high-voltage switchgear. Particular attention is paid to the solar resource monitoring system based on CPM10 and CUV5 pyranometers and calibrated reference modules.

Experimental studies are based on real measurements of daily and monthly solar radiation, inverter operation data, electricity generation and equipment availability. Deviations between forecasted and actual insolation were analysed. Monthly deviations ranged from –50.6% (December) to +26% (September), with annual deviations of –1.9% for the horizontal plane and –10.9% for the array plane.

The technical availability assessment showed a high actual value of 99.93%, exceeding the guaranteed 99.5%, while energy losses due to forced outages did not exceed 275 kWh per year (0.0023% of total generation). Most disturbances were related to insulation faults in several PV strings.

The actual annual electricity generation amounted to 12,049.5 MWh, exceeding the projected value (8,306.54 MWh) by 45.1%. The highest monthly output was recorded in July (1,868.3 MWh), and the lowest in December (101.8 MWh). Economic calculations demonstrated that, with a feed-in tariff of 0.1503 €/kWh, the annual revenue reaches 1.81 million euros, confirming the high financial attractiveness and profitability of the SPP.

The results confirm that the studied grid-connected solar power plant is characterized by high technical and economic efficiency, operational stability and low maintenance risks. The proposed recommendations can be used to improve operational performance, enhance productivity and extend equipment lifetime. The results have practical value for operators, designers and owners of solar power plants in Ukraine.

**Keywords:** solar energy; grid-connected solar power plant; photovoltaic modules; insulation; pyranometer; technical availability; electricity generation; inverter; PV strings; energy efficiency; feed-in tariff; economic performance; generation monitoring; SPP operation.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	10
<b>1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ</b> .....	13
1.1. Глобальні тенденції розвитку мережеских сонячних електростанцій....	13
1.2. Стан та динаміка розвитку сонячної енергетики в Україні.....	14
1.3. Нормативно-правове забезпечення функціонування мережеских сонячних електростанцій .....	18
1.4. Технічні особливості мережеских СЕС .....	20
1.5. Фактори, що впливають на ефективність мережеских СЕС.....	22
1.6. Висновки до розділу 1.....	23
<b>2. ТЕХНІКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ</b> .....	25
2.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження .....	25
2.2. Методика проведення досліджень .....	32
2.3. Дослідження динаміки інсоляції на горизонтальну та похилу поверхню протягом року .....	35
2.3.1. Дослідження місячних величин інсоляції на горизонтальну поверхню .....	35
2.3.2. Дослідження місячних величин інсоляції на площині масиву фотомодулів.....	37
2.4. Дослідження місячної та річної технічної доступності СЕС .....	39
2.5. Дослідження місячного виробітку електричної енергії.....	41
2.6. Аналіз ключових показників ефективності роботи СЕС (KPI).....	43
2.6.1. Аналіз коефіцієнта продуктивності (Performance Ratio).....	44
2.6.2. Аналіз питомого виробітку (Final Yield).....	45
2.7. Аналіз аварійних відключень (Forced outages).....	46
2.8. Висновки до розділу 2.....	52
<b>3. ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	54
3.1. Організація охорони праці при роботі мережеских СЕС.....	54

3.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації мережевої СЕС.....	55
3.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці.....	57
3.4. Висновки до розділу 3.....	59
<b>4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ СЕС .....</b>	<b>60</b>
4.1. Помісячний аналіз доходу від реалізації електроенергії.....	60
4.2. Річний економічний результат.....	62
4.3. Висновки до розділу 4.....	62
<b>ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>65</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>67</b>

## ВСТУП

**1. Актуальність теми.** Мережеві сонячні електростанції (СЕС) стають одним із ключових елементів сучасних енергетичних систем завдяки швидкому зростанню світових PV-потужностей, зниженню вартості технологій та підвищенню їхньої ефективності [1]. Фотоенергетика демонструє найвищі темпи розвитку серед усіх відновлюваних джерел енергії, що визначає її значну роль у процесах декарбонізації та модернізації енергетичних систем. В Україні розвиток мережевих СЕС до 2022 року демонстрував стабільне зростання, однак після руйнувань енергетичної інфраструктури внаслідок збройної агресії РФ роль локальних та децентралізованих джерел генерації значно посилилася [2]. Мережеві СЕС дозволяють підвищити живучість енергосистеми, зменшити пікові навантаження та забезпечити додаткові резерви за рахунок розподіленої генерації. Ефективність роботи таких систем визначається рівнем інсоляції, температурним режимом, технічним станом обладнання та якістю експлуатації. Відомо, що відхилення інсоляції, аварійні простої та технічні обмеження можуть суттєво змінювати фактичний виробіток і коефіцієнт продуктивності (PR) [3–4]. Особливо актуальним є вивчення реальних даних роботи мережевих СЕС на території України, оскільки кліматичні умови, профіль навантаження та особливості електричних мереж відрізняються від європейських і світових стандартів.

Таким чином, аналіз роботи мережевої сонячної електростанції на основі фактичних даних є важливим науковим і практичним завданням, що має значний внесок у розвиток сучасної відновлюваної енергетики України.

**2. Аналіз стану наукової розробки проблеми.** Питання ефективної роботи мережевих сонячних електростанцій активно досліджується у міжнародній науковій літературі, зосередженій на впливі кліматичних умов, технічних характеристик обладнання та експлуатаційних режимів на продуктивність фотоелектричних систем. У роботі [5] детально розглянуто

залежність ефективності фотоелектричних модулів від температури, що є одним із ключових факторів зниження вихідної потужності в реальних умовах експлуатації. Сучасні підходи до моделювання та прогнозування роботи PV-станцій ґрунтуються на комплексному врахуванні інсоляції, характеристик інверторів та втрат у силових трактах. У дослідженні [6] підкреслюють, що точність прогнозів значною мірою залежить від реальної технічної доступності обладнання та своєчасності усунення аварій. Дослідження IEA PVPS демонструють, що для більшості промислових електростанцій технічна доступність перевищує 99 %, але навіть короточасні збої можуть впливати на кінцевий річний виробіток, особливо у періоди високої інсоляції [7].

В Україні наукові роботи переважно зосереджені на оцінюванні потенціалу сонячної енергетики та кліматичних особливостей регіонів. Зокрема, дослідження [8] вказують на суттєву сезонність сонячного ресурсу на території України та необхідність використання локальних вимірювань для коректного прогнозування роботи мережевих СЕС. Попри значну кількість світових досліджень, існує обмежена кількість робіт, що аналізують експлуатаційні дані саме українських промислових PV-проектів, що підкреслює актуальність проведення глибокого техніко-експериментального дослідження роботи мережевої сонячної електростанції.

**3. Мета дослідження.** Метою кваліфікаційної роботи є комплексне дослідження технічних, енергетичних та експлуатаційно-економічних характеристик мережевої сонячної електростанції, оцінювання ефективності її функціонування в реальних умовах експлуатації та визначення ключових факторів, що впливають на виробіток електроенергії, технічну доступність і економічну результативність, з подальшим формуванням рекомендацій щодо оптимізації роботи СЕС.

**4. Об'єкт дослідження** – мережева сонячна електростанція Диммерка 2 KNESS Energy, що працює в реальних умовах експлуатації.

**5. Предмет дослідження** – енергетичні, технічні та експлуатаційні показники роботи мережевої сонячної електростанції, а також фактори, що

впливають на її ефективність та відхилення фактичних результатів від розрахункових значень.

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

– виконати аналіз стану питання та перспектив використання мережевих сонячних електростанцій в Україні, узагальнивши світовий і вітчизняний досвід, нормативну базу та ключові фактори, що визначають ефективність їх роботи;

– провести техніко-експериментальне дослідження роботи мережевої сонячної електростанції на основі реальних експлуатаційних даних інсоляції, температури, виробітку електроенергії, технічної доступності та показників продуктивності;

– оцінити умови безпеки праці та вимоги охорони праці під час експлуатації мережевої сонячної електростанції, визначивши основні небезпечні фактори та заходи щодо їх мінімізації;

– обґрунтувати економічну ефективність роботи мережевої сонячної електростанції, визначивши основні витрати, економічні ефекти та показники окупності.

**7. Методи дослідження.** Методологічну основу роботи становлять аналіз і узагальнення наукових джерел, математична статистика, техніко-експлуатаційний та порівняльний аналіз, а також графічні методи для опрацювання та візуалізації даних. Економічні методи застосовано для оцінювання ефективності та визначення ключових фінансових показників роботи мережевої сонячної електростанції.

**8. Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 67 сторінок машинописного тексту, містить 18 рисунків, 5 таблиць, 4 додатки та 27 найменувань джерел у списку літератури.

# 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ

## 1.1. Глобальні тенденції розвитку мережесонячних електростанцій

Упродовж останніх двох десятиліть мережесонячні електростанції стали одним із ключових інструментів світового енергетичного переходу. За даними Міжнародного енергетичного агентства, сукупна встановлена потужність сонячної генерації у 2023 році перевищила 1 ТВт, а фотоенергетика стала найбільш швидкозростаючою технологією генерації у світі [9]. Висока інтенсивність розвитку зумовлена стрімким технологічним прогресом, масштабуванням виробництва модулів, а також зниженням собівартості електроенергії, що зробило СЕС конкурентними не лише з відновлюваними, а й традиційними видами генерації. Аналітичні огляди BloombergNEF свідчать, що рівень LCOE для великих промислових СЕС є найнижчим серед усіх технологій нової генерації в більшості регіонів світу [10].

Ключовим чинником швидкого розвитку галузі є глобальна нерівномірність сонячного ресурсу, що визначає суттєві потенційні можливості для регіонів із високою інсоляцією. На рисунку 1.1а наведено глобальну карту сонячного ресурсу, яка демонструє значний потенціал Північної Африки, Австралії, Близького Сходу та південних регіонів США.

Паралельно значного розвитку набувають технології систем накопичення енергії та “гнучких” інверторів, що дають змогу інтегрувати великі обсяги сонячної генерації у мережі без погіршення їхньої стабільності. Звіти NREL підкреслюють, що сучасні інвертори дедалі частіше виконують функції мережесонячних елементів – забезпечують регулювання напруги, реактивної потужності та частоти [11].

Особливе значення у контексті глобальних тенденцій має зростання ролі PV+Storage рішень. За даними SolarPower Europe, частка нових СЕС, що вводяться у поєднанні із системами накопичення, щороку збільшується на 35–45 %, що підтверджує тренд переходу до більш гнучких та стійких конфігурацій генерації [12]. У країнах ЄС, США та Китаї такі комплекси вже виконують функції підтримання пікових навантажень та стабілізації напруги, зменшуючи залежність систем від традиційних джерел.

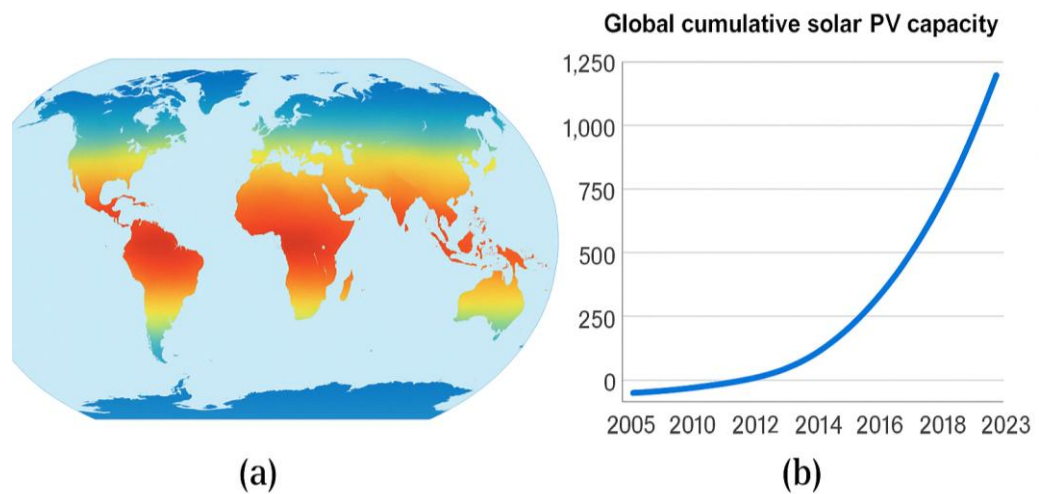


Рис. 1.1 – Глобальні тенденції у фотоенергетиці: (а) – глобальна карта сонячного ресурсу; (б) – зростання сумарної встановленої потужності сонячних СЕС у світі (2005–2023 рр.)

Загалом розвиток мережевих сонячних електростанцій формує нову архітектуру світової енергетики – децентралізовану, гнучку та орієнтовану на інтеграцію цифрових технологій. Стале зростання встановлених потужностей (рисунок 1.1б) підтверджує стратегічну роль фотоенергетики як одного з найважливіших інструментів глобальної енергетичної трансформації.

## 1.2. Стан та динаміка розвитку сонячної енергетики в Україні

Сонячна енергетика є одним із найдинамічніших сегментів відновлюваної енергетики України. За період 2014–2021 рр. встановлена потужність

сонячних електростанцій зростає більш ніж у 30 разів – від 280 МВт до понад 8 ГВт, що дозволило Україні увійти до групи європейських країн з найвищими темпами розвитку фотоенергетики [13]. Такий стрибок став можливим завдяки поєднанню сприятливої державної політики, інвестиційної активності та високого технічного потенціалу регіонів зі значними показниками річної інсоляції.

Важливим чинником зростання ринку стало впровадження «зеленого тарифу», який забезпечив гарантований викуп електроенергії від виробників, створивши економічні стимули для промислових інвесторів та домогосподарств. Унаслідок цього сформувався унікальний для регіону сегмент приватних СЕС: їх кількість зростає з кількох сотень у 2015 році до понад 45 тисяч у 2021 році, а встановлена потужність перевищила 1,4 ГВт [14]. Значною мірою це сприяло формуванню децентралізованої структури генерації, яка підвищує стійкість енергосистеми.

Розвиток сонячної генерації супроводжувався модернізацією мереж та технологічним оновленням обладнання. На великих промислових СЕС впроваджено системи моніторингу, інвертори з функціями підтримки частоти та напруги, погодинні графіки обмеження потужності. Ці технології відповідають світовим тенденціям розвитку smart-grid та дозволяють ефективніше інтегрувати СЕС у роботу об'єднаної енергосистеми.

Після початку повномасштабної війни у 2022 році галузь зіткнулася з суттєвими викликами. Частина об'єктів була знищена чи захоплена, особливо у Херсонській та Запорізькій областях, де зосереджувались великі промислові СЕС. Водночас сонячна генерація зберегла здатність підтримувати денний баланс енергосистеми, особливо у літні періоди. За даними Міненерго, СЕС продовжували забезпечувати стабільний внесок у пікові години навіть попри обмеження диспетчеризації та дефіцит резервів [15].

Важливою тенденцією 2022–2024 років стало активне зростання сегмента малих та комерційних дахових СЕС, що пов'язано зі зростанням потреби у локальній генерації, підвищенням вартості електроенергії та необхідністю

забезпечення енергетичної автономності підприємств. Низка компаній впроваджує гібридні системи «СЕС + накопичувач», що дозволяє зменшити залежність від мережевої енергії та підвищити надійність електропостачання.

Кількість сонячних мережевих електростанцій за областями України станом на 24 квітня 2024 року зображено на рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Кількість сонячних мережевих електростанцій за областями України станом на 24 квітня 2024 року

Аналіз рис. 1.2 показує, що приблизно половина всіх сонячних електростанцій України зосереджена лише у шести областях. Найбільше їх налічується в Івано-Франківській області – 142 об’єкти, у Дніпропетровській – 134, у Вінницькій – 122. Дещо менше станцій розташовано в Хмельницькій та Київській областях – по 107 кожна, а також у Миколаївській – 92.

Натомість найменше сонячних електростанцій зафіксовано у східних регіонах: у Луганській та Донецькій областях функціонують лише по дві, у Сумській – п’ять, а в Полтавській – сім.

Варто зауважити, що певна частина СЕС знаходиться на тимчасово окупованих територіях Херсонщини, Запоріжжя, Донеччини та Луганщини, тому ці об'єкти наразі не беруть участі в роботі Об'єднаної енергосистеми України.

Динаміка запуску нових мережевих СЕС протягом 2017-2024 рр. наведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3 – Динаміка запуску нових мережевих СЕС протягом 2017-2024 рр

Згідно з даними Energy Map (рис. 1.3), 2019 рік став рекордним за кількістю нових сонячних електростанцій, зведених в Україні за останнє десятиліття. Саме тоді спостерігався найбільший приріст у сфері сонячної генерації. У наступні роки темпи введення нових потужностей почали поступово спадати, що відображається у скороченні кількості виданих ліцензій.

Початок повномасштабного вторгнення Росії в Україну у 2022 році ще більше уповільнив розвиток галузі. Після 24 лютого 2022 року на територіях

Херсонської, Запорізької, Миколаївської, Харківської, Донецької та Луганської областей не було видано жодної нової ліцензії на спорудження сонячних електростанцій – через активні бойові дії, окупацію або близькість до лінії фронту.

Попри складні умови, міжнародні організації прогнозують подальший розвиток української сонячної генерації. Згідно з аналітичним оглядом ІЕА, у середньостроковій перспективі (після стабілізації безпекової ситуації) Україна має потенціал повернутися до довоєнних темпів розвитку ВДЕ, а фотоенергетика відіграватиме ключову роль у відновленні та модернізації енергетичного сектору [16]. Особливий потенціал мають регіони центральної та південної України, де річна сумарна інсоляція наближається до 1350–1600 кВт·год/м<sup>2</sup>, що відповідає показникам південних регіонів Європейського Союзу.

Загалом сонячна енергетика України характеризується сформованою інфраструктурою, великим інвестиційним портфелем, високими показниками інсоляції та значним потенціалом розвитку. Подальший прогрес галузі залежатиме від відновлення мережевої інфраструктури, доступності гнучких потужностей, удосконалення регуляторної політики та впровадження технологій накопичення енергії, що дасть змогу інтегрувати більші обсяги сонячної генерації без загрози для стабільності енергосистеми.

### **1.3. Нормативно-правове забезпечення функціонування мережевих сонячних електростанцій**

Нормативно-правове забезпечення роботи мережевих сонячних електростанцій в Україні ґрунтується на поєднанні законодавчих актів, підзаконних нормативних документів, технічних стандартів та регуляторних вимог, які визначають принципи будівництва, приєднання, експлуатації та підтримки об'єктів фотоенергетики. Основою правового регулювання є Закон України «Про альтернативні джерела енергії», який визначає правові,

економічні та організаційні засади використання відновлюваних джерел енергії, включаючи правила визначення «зеленого тарифу» та умови стимулювання виробників електроенергії з СЕС [17].

Важливе значення мають положення Закону України «Про ринок електричної енергії», який встановлює механізми роботи ринку, вимоги до виробників, правила диспетчеризації та балансування, а також регулює умови приєднання сонячних електростанцій до мереж операторів системи розподілу та передачі [18]. Порядок технічного приєднання визначається Кодексом системи розподілу та Кодексом системи передачі, які встановлюють вимоги до проектування, підключення, забезпечення якості електроенергії та роботи інверторного обладнання [19].

У сфері технічного регулювання вагомим місцем займають національні стандарти та гармонізовані європейські норми. Зокрема, ДСТУ EN 50583 визначає вимоги до фотоелектричних систем, інтегрованих у будівлі; ДСТУ ІЕС 61727 регламентує параметри взаємодії фотоелектричних установок з мережею; ДСТУ EN 50160 встановлює норми якості електроенергії в мережах низької напруги [20]. Застосування цих стандартів забезпечує відповідність українських СЕС європейським вимогам і дозволяє інтегрувати сучасне обладнання міжнародних виробників.

Регуляторну політику в галузі здійснює Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Вона визначає умови встановлення «зеленого тарифу», правила формування аукціонів підтримки, механізми диспетчерських обмежень та вимоги до комерційного обліку, включаючи запровадження засобів дистанційного збору даних та вимірювання в режимі реального часу [21].

Особливої актуальності набули нормативні зміни, спрямовані на підтримку розподіленої генерації в умовах воєнного стану. Постанови Міненерго та НКРЕКП дозволили прискорити процедури приєднання малих СЕС, спростили вимоги до rooftop-генерації для підприємств та забезпечили

можливість встановлення гібридних систем із накопичувачами енергії для підвищення стійкості локальних енергетичних вузлів [22].

Таким чином, нормативно-правова база України забезпечує комплексне регулювання роботи мережевих СЕС, охоплюючи правові, технічні, економічні та диспетчерські аспекти. Подальший розвиток цієї сфери передбачає адаптацію регуляторної політики до вимог ЄС, розвиток механізмів підтримки розподіленої генерації та інтеграцію систем накопичення енергії у відповідні нормативні документи.

#### **1.4. Технічні особливості мережевих СЕС**

Мережеві сонячні електростанції (рис. 1.4) є складними електротехнічними комплексами, що функціонують у взаємодії з енергосистемою та забезпечують перетворення сонячної енергії в електричну з подальшою передачею її до мережі. Їх технічні особливості визначаються сукупністю апаратного забезпечення, схемних рішень, характеристик інверторів, умов підключення та алгоритмів керування. Кожен із цих елементів суттєво впливає на продуктивність, стабільність і якість виробленої електроенергії.

Основним функціональним елементом мережевої СЕС є фотоелектричні модулі, параметри яких – номінальна потужність, температурний коефіцієнт, спектральна чутливість та деградація – визначають можливу кількість генерованої енергії. Струмovo-напругові характеристики модулів залежать від інсоляції, температури та умов експлуатації, що потребує застосування сучасних інверторів з функціями максимального відстеження точки потужності (MPPT). Кількість MPPT-входів, діапазон робочих напруг та ККД інвертора безпосередньо впливають на втрати у DC-колі та здатність станції працювати в умовах часткового затінення.

Мережеві інвертори відіграють ключову роль у взаємодії СЕС з енергосистемою. Вони забезпечують синхронізацію з мережею, перетворення

постійної напруги в змінну та виконання додаткових функцій підтримки напруги та реактивної потужності згідно з вимогами кодексів системи розподілу. Сучасні інвертори оснащені алгоритмами обмеження генерованої потужності (power curtailment), автоматичного відключення при порушеннях параметрів мережі, а також функціями LVRT/HVRT (Low/High Voltage Ride Through), що дозволяє підтримувати стійкість мережі під час аварійних процесів.



Рис. 1.4 – Структурна схема функціонування мережевої СЕС

Схеми електричних з'єднань мережевих СЕС включають стрингові мережі, DC-комбайнер-бокиси, інверторні станції, трансформаторні підстанції та лінії приєднання до мережі. До основних технічних особливостей належать узгодження напруги генерації із параметрами мережі, вимоги до заземлення, компенсації реактивної потужності та забезпечення показників якості електроенергії згідно з ДСТУ EN 50160. Важливою складовою є система моніторингу (SCADA), яка здійснює збір даних про інсоляцію, температуру, доступність обладнання, аварійні події та виробіток, що дозволяє оперативно оцінювати стан станції та виявляти відмови.

До характерних технічних обмежень мережевих СЕС належать добові та сезонні коливання генерації, залежність продуктивності від температури

модулів, необхідність відповідності нормам диспетчеризації та обмеження у години пікової генерації. У сучасних умовах ці обмеження частково компенсуються через застосування інтелектуальних інверторів, оптимізацію конфігурацій стрингів, а також інтеграцію систем накопичення енергії, що дозволяє зменшити вплив нестабільності генерації на мережу.

Таким чином, технічні особливості мережевих сонячних електростанцій визначаються складною взаємодією фотоелектричних модулів, інверторного обладнання, схемних рішень та мережевих обмежень, а їх оптимальна робота потребує комплексного врахування електротехнічних, кліматичних та експлуатаційних факторів.

### **1.5. Фактори, що впливають на ефективність мережевих СЕС**

Ефективність роботи мережевих сонячних електростанцій визначається сукупністю зовнішніх та внутрішніх технічних чинників, що формують фактичну величину виробленої електроенергії, а також впливають на відповідність роботи станції проєктним показникам. Одним із ключових факторів є рівень сонячної інсоляції, який характеризує кількість енергії, що надходить на площину модуля. Просторова та сезонна нерівномірність інсоляції в Україні зумовлює значні коливання генерації, при цьому мінімальні значення припадають на зимові місяці, а максимальні – на літній період. Важливим є і спектральний склад сонячного випромінювання, який змінюється залежно від погодних умов та висоти Сонця над горизонтом.

Температура фотоелектричних модулів є другим критичним фактором: зі зростанням температури знижується вихідна напруга модулів, що призводить до падіння продуктивності. Для сучасних кремнієвих модулів характерний температурний коефіцієнт зменшення потужності на рівні 0,3–0,5 %/°C. У реальних умовах це означає, що в літні дні з високою інсоляцією модулі можуть генерувати менше енергії, ніж у прохолодну, але сонячну погоду.

Стан поверхні модулів, зокрема наявність пилу, бруду, снігу або відкладень, суттєво впливає на фактичний рівень поглинутої сонячної енергії.

Ефект “soiling loss” у промислових СЕС може досягати 5–15 % залежно від місця розташування та періодичності обслуговування. Важливим також є наявність затінення – навіть незначне часткове затінення одного модуля може призвести до падіння виробітку цілого стрингу через послідовне з’єднання модулів.

До внутрішніх технічних факторів належать характеристики інверторів та ефективність роботи алгоритмів MPPT, які визначають здатність системи відстежувати точку максимальної потужності. Значну роль відіграють і мережеві обмеження: диспетчерські команди на обмеження потужності (curtailment), аварійні відключення, порушення параметрів напруги та частоти. Якість електроенергії у мережі, у тому числі рівень гармонічних складових та флуктуацій напруги, може впливати на стабільність роботи інверторів та частоту їх захисних відключень.

Експлуатаційні фактори включають технічну доступність обладнання (availability), своєчасність усунення аварій, якість сервісного обслуговування та функціонування системи моніторингу. Для сучасних промислових СЕС доступність на рівні 99,5–99,9 % є критичною для досягнення запланованого річного виробітку.

Узгоджене врахування перелічених факторів дозволяє забезпечити стабільну, прогнозовану та економічно ефективну роботу сонячної електростанції в умовах взаємодії з мережею та впливу зовнішніх кліматичних чинників.

## **1.6. Висновки до розділу 1**

1. Проведено комплексний аналіз сучасних тенденцій розвитку сонячної енергетики у світі та в Україні, а також розглянуто нормативно-правові, технічні та експлуатаційні аспекти функціонування мережевих сонячних електростанцій. Встановлено, що глобальна фотоенергетика залишається одним із ключових драйверів енергетичного переходу, демонструючи

стабільне зростання встановлених потужностей, зниження собівартості виробленої електроенергії та широке впровадження інтелектуальних інверторних технологій.

2. Аналіз розвитку галузі в Україні показав, що до 2022 року сонячна енергетика характеризувалася високими темпами зростання завдяки державній підтримці, інвестиційній активності та сприятливим кліматичним умовам. Попри виклики, пов'язані з воєнними діями та руйнуванням енергетичної інфраструктури, СЕС зберегли ключову роль у структурі відновлюваної генерації, забезпечуючи стабільний внесок у покриття денних навантажень та розвиток децентралізованих систем енергопостачання.

3. Дослідження нормативно-правової бази засвідчило, що українське законодавство охоплює широке коло питань – від умов будівництва та приєднання СЕС до вимог щодо якості електроенергії, диспетчерських обмежень та особливостей експлуатації в умовах воєнного стану. Нормативи гармонізовані з європейськими стандартами, що забезпечує технічну сумісність обладнання та сприяє інтеграції сучасних технологій.

4. Установлено, що ефективність роботи СЕС визначається взаємодією зовнішніх кліматичних чинників (інсоляція, температура, погодні умови) та внутрішніх технічних параметрів (ефективність МРРТ, якість інверторної техніки, технічна доступність, затінення, забруднення модулів).

5. Проведений аналіз показує, що успішна експлуатація мережевої сонячної електростанції потребує комплексного врахування кліматичних, технічних, нормативних і експлуатаційних факторів. Ці положення формують наукову та методологічну основу для подальшого дослідження фактичної роботи СЕС у другому розділі роботи.

## 2. ТЕХНІКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 2.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом техніко-експериментального дослідження є мережева сонячна електростанція, розташована на території Київської області у Броварському районі, встановлена потужність якої становить 9 МВт (рис. 2.1). Станція належить до класу промислових фотоелектричних об'єктів та функціонує в режимі повної синхронізації з об'єднаною енергосистемою України, забезпечуючи виробництво активної електричної енергії та її передачу до мережі 10 кВ.



Рис. 2.1 – Досліджувана мережева СЕС 9 МВт

Оснoву генерації становлять фотоелектричні модулі JA Solar типу JAP72S01-330/SC номінальною потужністю 330 Вт (рис. 2.2). Загальна кількість модулів – 35280 шт.

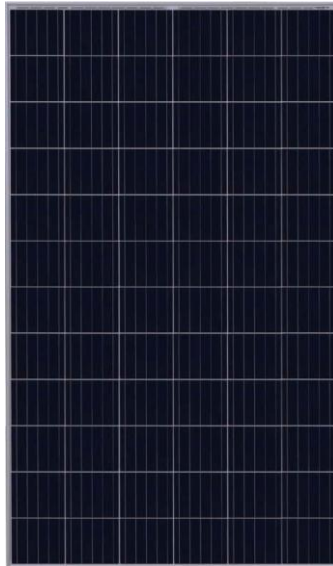


Рис. 2.2 – Фотоелектричні модулі JA Solar типу JAP72S01-330/SC

Технічні характеристики фотоелектричних модулів JA Solar типу JAP72S01-330/SC наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики JA Solar типу JAP72S01-330/SC

Параметр	Значення
Тип модуля	Монокристалічний, 72-елементний
Номинальна потужність ( $P_{max}$ )	330 Вт
Напруга в точці максимальної потужності ( $V_{mp}$ )	37,6 В
Струм у точці максимальної потужності ( $I_{mp}$ )	8,79 А
Напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ )	46,4 В
Струм короткого замикання ( $I_{sc}$ )	9,29 А
ККД модуля	16,9–17,1 %
Температурний коефіцієнт потужності ( $P_{max}$ )	-0,41 %/°C
Температурний коефіцієнт $V_{oc}$	-0,31 %/°C
Температурний коефіцієнт $I_{sc}$	+0,05 %/°C
Робоча температура	-40...+85 °C
Тип елементів	Monocrystalline Silicon
Максимальна напруга системи	1000 / 1500 В (залежно від конфігурації)

Номінальний робочий струм запобіжника	15 А
Розміри	1956 × 992 × 40 мм
Маса	22,5 кг
Ступінь захисту	IP67
Матеріал лицьової поверхні	Закалене високопрозоре скло 3,2 мм
Матеріал задньої частини	Полімерна плівка (backsheet)
Рамка	Анодований алюміній
Термін служби	≥ 25 років

Структура розміщення модулів організована у вигляді стрингових підсистем: кожен стринг складається з 28 послідовно з'єднаних панелей, після чого група стрингів об'єднується в ящики з'єднань (ЯЗ) (рис. 2.3). Один ЯЗ містить 22–24 стринги, що дозволяє формувати оптимізовані DC-кола та мінімізувати втрати на з'єднаннях. Вихідні лінії від ЯЗ прокладені безпосередньо до інверторних станцій.



Рис. 2.3 – Зовнішній вигляд ящика з'єднань

На електростанції встановлено інвертори іспанського виробництва GPТech типу 3MWD3-V560-F, кожен з яких має номінальну потужність 3 МВт.



Рис. 2.4 – Зовнішній вигляд інвертора WD3

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики інвертора

Параметр	Значення
Виробник	GPТech (Green Power Technologies), Іспанія
Модель інвертора	3MWD3-V560-F
P/N	199320016
Серійний номер	1848-051-0004
Дата виробництва	11/2018
Клас устаткування / Захист	Protective Class 1, Enclosure Type 3R (IP54)
DC-параметри (вхід постійного струму)	
Максимальна напруга масиву PV	1500 VDC
Максимальний робочий струм при 35°C / 50°C	4800 / 4320 A DC
Діапазон роботи MPPT	805...1250 VDC
Максимальний струм короткого замикання	3 × 10 000 A
AC-параметри (вихід змінного струму)	
Діапазон робочої напруги (3-фазна)	504...616 VAC, номінал 560 VAC

Діапазон робочої частоти	47...53 Hz, номінал 50 Hz
Максимальний вихідний струм при 35°C / 50°C	3620 / 3295 A AC
Максимальна повна вихідна потужність при 35°C / 50°C	3985 / 3535 kVA
Діапазон коефіцієнта потужності (кос φ)	0,9 ind...0,9 cap
Експлуатаційні параметри	
Робоча температура	-20°C...+60°C
Температура зберігання	-30°C...+65°C

Конструктивно станція поділена на три інверторні модулі – М-1 (інвертор 1), М-2 (інвертор 2) та М-3 (інвертор 3). У кожен модуль входить по 6 ЯЗ, отже загалом на станції функціонує 18 ЯЗ. Інвертори виконують обов'язкові функції синхронізації, контролю якості напруги, обмеження потужності, а також реалізують алгоритми МРРТ для максимально ефективного відбору енергії від фотомодулів.

Передавання енергії до мережі здійснюється через трансформаторну підстанцію, яка містить силовий трансформатор CG Power Systems номінальною потужністю 4000 кВА (рис. 2.5).

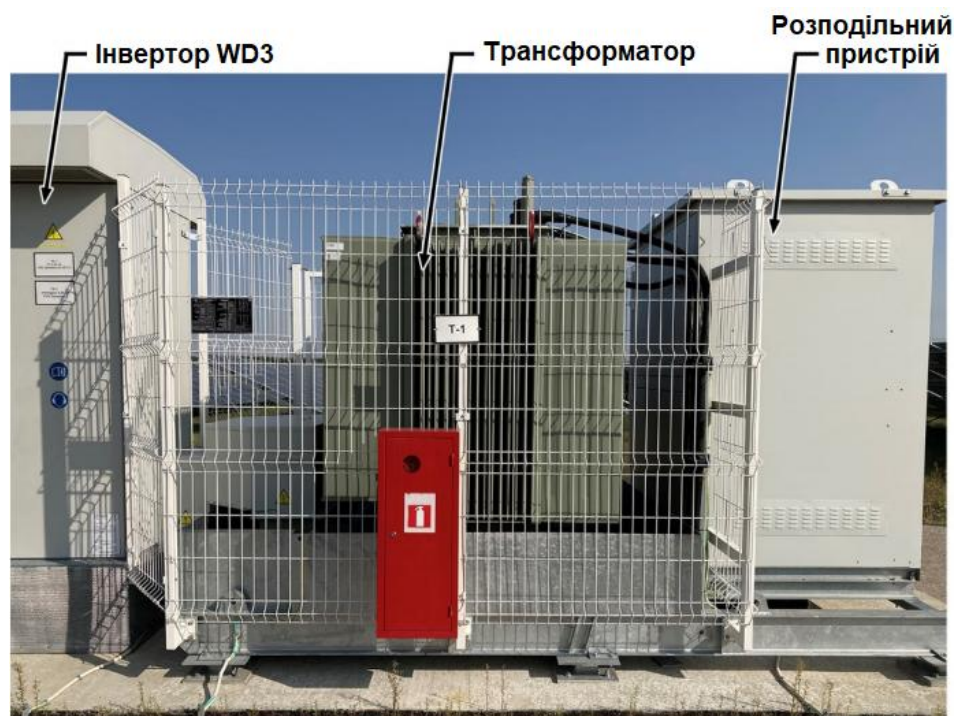


Рис. 2.5 – Трансформатор енергоустановки

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики трансформатора

Параметр	Значення
Виробник	CG Power Systems Belgium NV (Pauwels Transformer)
Серійний номер	10211800330
Рік виробництва	2018
Стандарт	IEC 60076 / 1–5
Тип обмоток / з'єднання	Dyn11
Номінальна потужність	4000 кВА
Номінальна напруга ВН (HV1)	10500 / 10250 / 10000 / 9750 / 9500 В (5 ступенів перемикача)
Номінальна напруга НН (LV1)	560 В
Номінальні струми:	
– ВН	230,9 А
– НН	4123,9 А
Перемикач відпайок (tap changer)	5 позицій (HV1)
Втрати короткого замикання (при 75°C)	35423 Вт
Відсоток напруги КЗ (impedance)	6,34 %
Референтна потужність для втрат	4000 кВА
Втрати холостого ходу (no-load losses)	3663 Вт
Максимальна потужність КЗ системи	1000 МВА
Ізоляційний рівень:	
– HV1	LI 75 kV / AC 28 кВ
– LV1	LI 30 kV / AC 10 кВ
Охолодження	ONAN (природна циркуляція масла та повітря)
Тип діелектричної рідини	Мінеральне масло (IEC 60296)
Допустимий вміст РСВ	< 1 ppm
Робоча температура:	
– Максимальна температура верхнього шару масла	+100 °C
– Мінімальна температура охолоджувальної рідини	–30 °C
– Підвищення температури обмоток	65 °C
Маса:	
– Повна маса	7984 кг
– Маса діелектричної рідини	1600 кг
– Маса сталі (core mass)	2814 кг
– Маса активної частини	4090 кг
– Маса алюмінієвих провідників	816 кг

Підвищувальний трансформатор здійснює перетворення напруги від інверторів до рівня 10 кВ, необхідного для подальшої подачі в мережу оператора системи розподілу. У складі підстанції також встановлено шафи високовольтного відсіку типу РУ-10 кВ (рис. 2.6), виготовлені компанією Ormazabal Velatia, які виконують функції комутації, захисту та вимірювання.

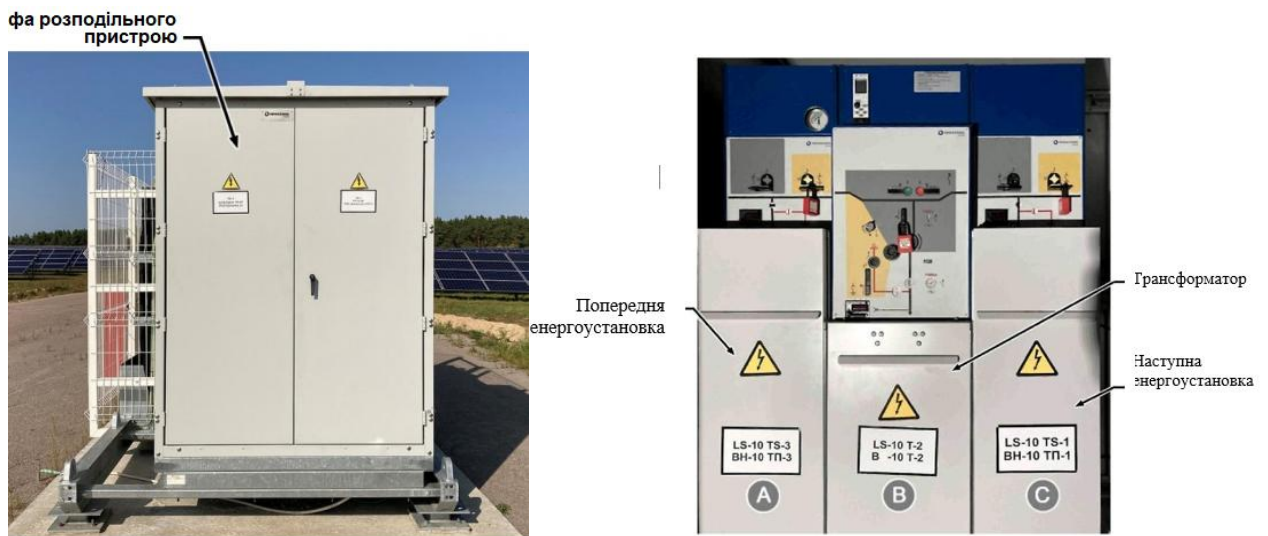


Рис. 2.6 – Шафа високовольтного відсіку (РУ-10)

Конфігурація електростанції доповнюється однолінійною електричною схемою (рис. 2.7), яка відображає структуру DC-та AC-кіл, взаємозв'язки між інверторними модулями, ЯЗ, трансформаторним обладнанням та вузлами приєднання. Така схема забезпечує однозначне уявлення про топологію електростанції та використовується як основа для діагностики, технічного обслуговування та аналізу експлуатаційних режимів.

Наведені характеристики дозволяють оцінити технічну складність об'єкта та формують базу для подальшого аналізу сонячних ресурсів, технічної доступності, виробітку електроенергії та показників продуктивності СЕС, що детально розглядається у наступних підрозділах.

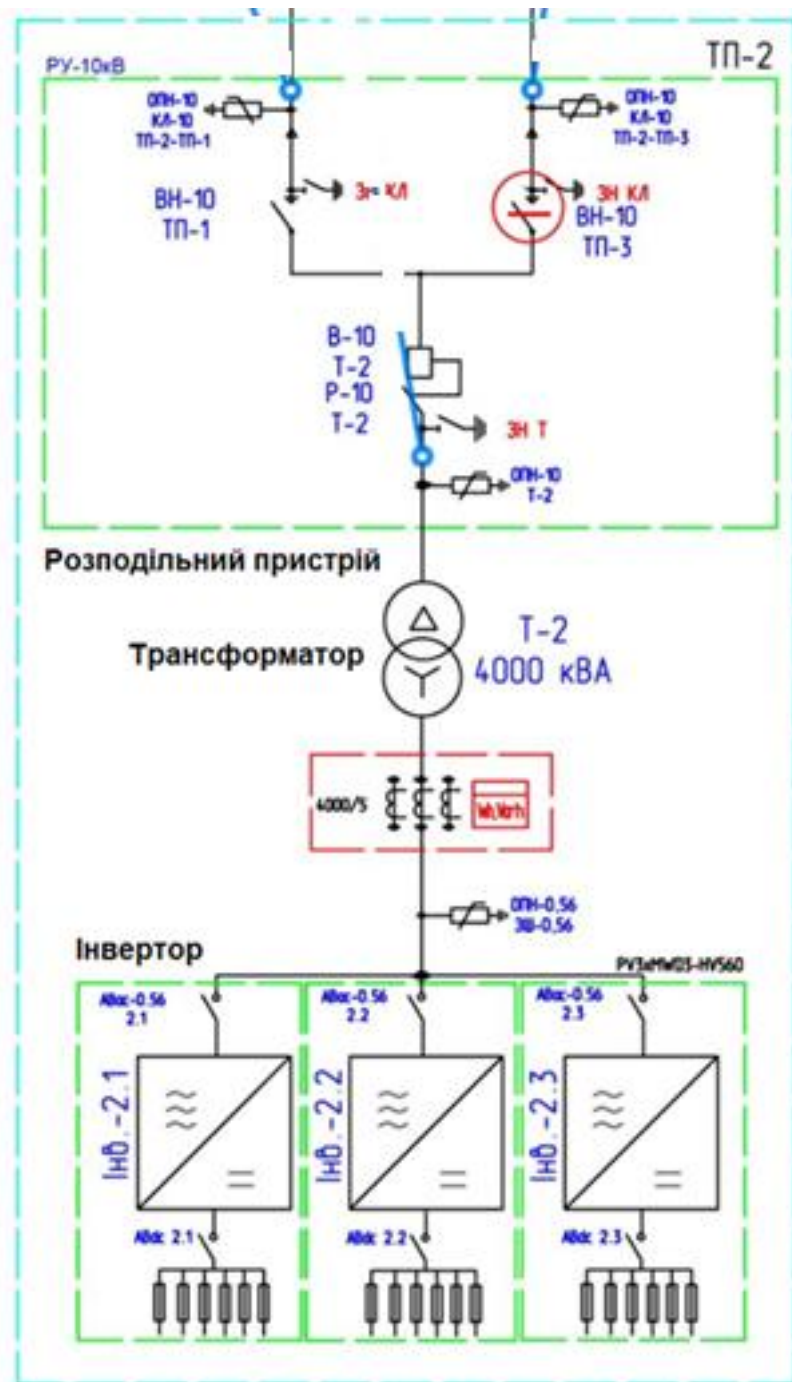


Рис. 2.7 – Однолінійна схема системи СЕС

## 2.2. Методика проведення досліджень

Методика техніко-експериментального дослідження роботи мережевої сонячної електростанції ґрунтується на комплексному аналізі сонячних ресурсів, параметрів роботи фотоелектричних модулів, результатів моніторингу інверторів та вимірних показників технічної доступності.

Дослідження виконувалися із застосуванням як первинних вимірювань, так і даних SCADA-системи електростанції.

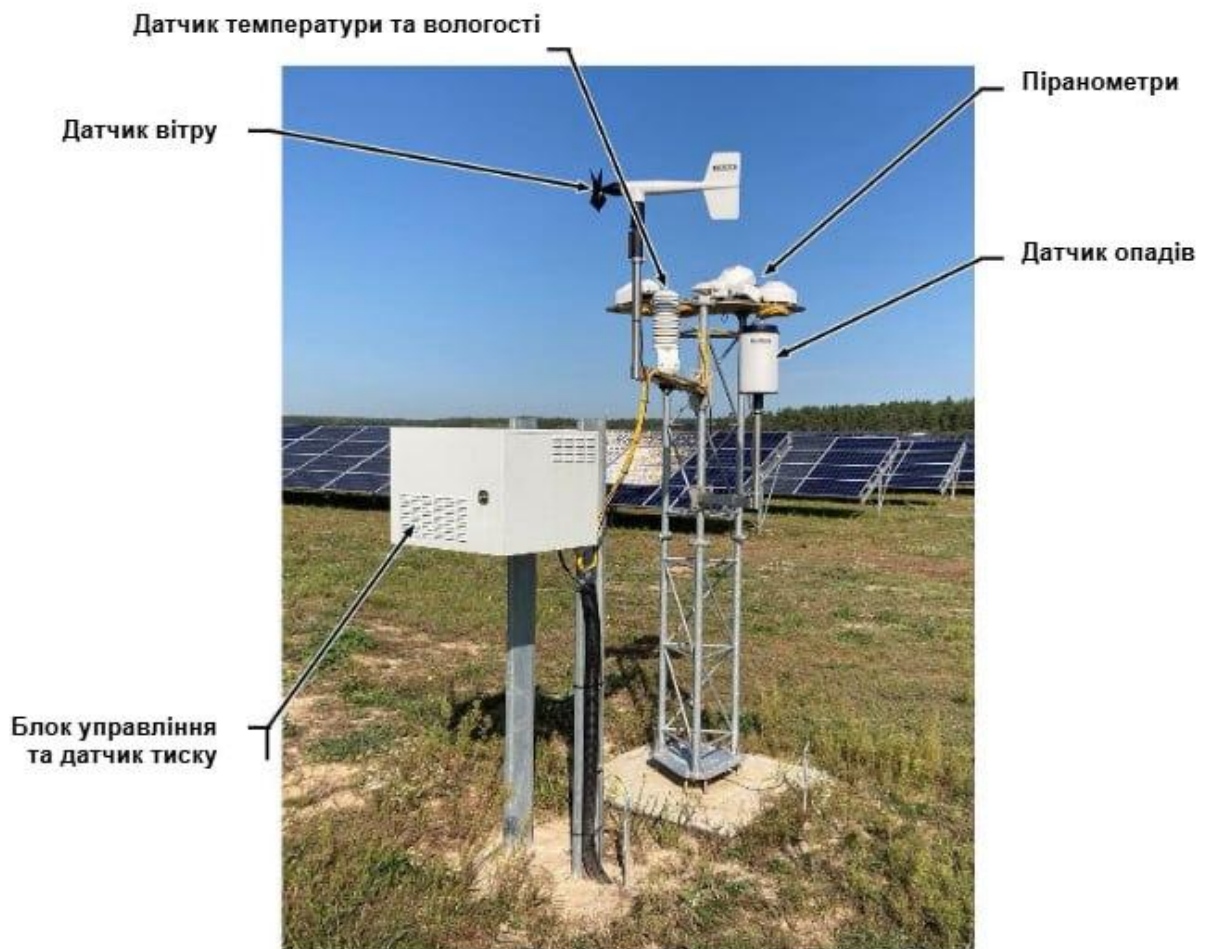


Рис. 2.8 – Метеостанція для проведення досліджень

Для визначення реального рівня опромінення було встановлено та використано три піранометри типу SRM10, розміщені на горизонтальній поверхні, а також один піранометр CUV5, встановлений під робочим кутом нахилу фотоелектричних панелей (рис. 2.9). Така конфігурація дає змогу одночасно вимірювати горизонтальну складову глобальної сонячної радіації (GHI), радіацію на площині масиву (POA) та ультрафіолетову складову, що впливає на деградаційні процеси модулів. Піранометри було попередньо повірено та відкалібровано відповідно до рекомендацій ISO 9060:2018.

Додатково використовувалися калібровані сонячні модулі, встановлені в контрольних точках поля для визначення фактичної щільності потоку енергії

та перевірки коректності показників піранометрів. Це дозволило порівняти виміряну інсоляцію з фактичним струмом і напругою контрольних модулів та скоригувати результати шляхом застосування корекційних коефіцієнтів.



Рис. 2.9 – Розташування піранометрів SRM10 та CUV5

Після збору первинних даних проводилася їх обробка: фільтрування аномальних значень, усереднення за 5-хвилинні та годинні інтервали, а також приведення вимірювань до стандартних умов (STC або NOCT — залежно від завдання). На основі вимірних значень GHI та POA обчислювалися добові та місячні інтеграли інсоляції, середньодобові температури та профілі освітленості, що використовувалися для подальших розрахунків продуктивності.

Для визначення прогнозованих значень виробітку електроенергії застосовувалася модель, що враховувала:

- виміряну інсоляцію;
- температуру модулів (на основі рівнянь NOCT);
- ефективність інверторів GPTech 3MWD3-V560-F;

- втрати в DC- та AC-колах;
- випадки обмеження потужності (curtailment);
- технічну доступність обладнання.

Розрахований теоретичний об'єм генерації порівнювався з фактичними даними SCADA-системи станції. Порівняння виконувалося шляхом визначення відносних відхилень, коефіцієнта кореляції, добових та місячних похибок та коефіцієнта продуктивності (PR). Для підвищення точності використовувався метод ковзного усереднення та згладжування профілю генерації з урахуванням хмарності та температурних коливань.

Також проводився аналіз аварійних подій та вимкнень, пов'язаних з ізоляційними пошкодженнями стрингів, за даними SCADA. Це дозволило встановити кореляцію між технічною доступністю та змінами виробітку. Додатково аналізувалися профілі зниження генерації під час аварій, періоди коригування MPPT-алгоритмів та вихід інверторів на номінальний режим.

Узагальнення вимірних та змодельованих даних забезпечило комплексну оцінку роботи СЕС, дозволило визначити реальні експлуатаційні втрати, ефективність інверторів, рівень відповідності змодельованих показників до фактичних, а також сформулювати висновки щодо стабільності роботи фотоелектричної станції та впливу інсоляції на її продуктивність.

### **2.3. Дослідження динаміки інсоляції на горизонтальну та похилу поверхню протягом року**

#### **2.3.1. Дослідження місячних величин інсоляції на горизонтальну поверхню**

Місячні значення сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню (GlobHor) є одним з ключових параметрів, що визначають потенційний обсяг виробництва електричної енергії фотоелектричною станцією. На основі результатів моніторингу за досліджуваний період було виконано

порівняльний аналіз вимірних величин із розрахунковими значеннями, що наведені на рис. 2.10.

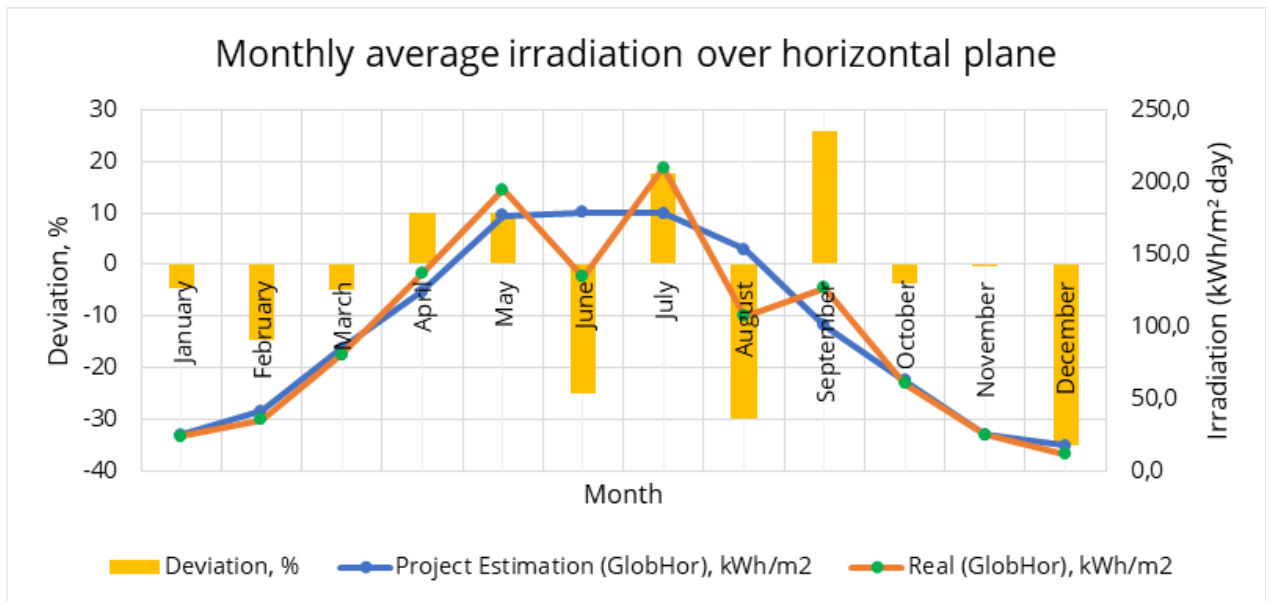


Рис. 2.10 – Середньомісячне опромінення в горизонтальній площині

Згідно з отриманими даними, у зимові місяці (грудень, січень, листопад) спостерігається суттєво нижчий рівень інсоляції порівняно з проєктними величинами, що зумовлено як сезонними особливостями, так і підвищеною хмарністю в окремі періоди. Найбільше відхилення зафіксовано у грудні (–35%), що відповідає характерній для цього місяця мінімальній тривалості світлового дня та низьким кутам підняття сонця над горизонтом.

У весняний та літній періоди ситуація є неоднорідною. У квітні та травні реальна інсоляція перевищила розрахункову на 10%, що свідчить про сприятливі атмосферні умови, зокрема менший рівень хмарності та оптимальну температуру повітря для роботи фотоелектричних модулів. Водночас у червні спостерігається відхилення –25%, ймовірно пов'язане із значною кількістю опадів та підвищеною хмарністю, що часто характерно для кліматичних умов Центральної України.

Найвищі позитивні відхилення зареєстровані у липні (+18%) та вересні (+26%). У ці місяці сонячна активність була суттєво вищою за розрахункову,

що могло бути зумовлено антициклональними погодними умовами та стабільною прозорістю атмосфери.

Покращення показника інсоляції у вересні може також бути пов'язане з відсутністю екстремальних температур. Оскільки надмірне нагрівання модулів негативно впливає на їхню ефективність, відносно помірні температури сприяли максимально ефективній роботі системи.

За підсумками року середньорічне відхилення становить  $-1,89\%$ , що свідчить про загальну відповідність реальних показників інсоляції проектному кліматологічному профілю. Незважаючи на значні коливання між окремими місяцями, річний інтеграл інсоляції практично збігається з очікуваним, що підтверджує коректність проектної сонячної моделі.

Отримані результати дозволяють оцінити сезонні коливання сонячного ресурсу та визначити вплив інсоляції на реальний виробіток електроенергії. Надалі ці дані використовуються для аналізу продуктивності станції (розділи 2.4–2.5), розрахунку коефіцієнта продуктивності (PR) та оцінки збіжності моделювання з показниками SCADA.

### **2.3.2. Дослідження місячних величин інсоляції на площині масиву фотомодулів**

Інсоляція на площині розміщення фотоелектричних модулів (POA – Plane of Array) є ключовим параметром, що визначає потенційну продуктивність сонячної електростанції, оскільки саме цей показник відображає реальну кількість сонячної енергії, яку може перетворювати фотоелектричний масив. На основі даних моніторингу (рис. 2.11) проведено аналіз відповідності реальних значень інсоляції проектним величинам.

У зимовий період (грудень–лютий) спостерігаються значні негативні відхилення реальних даних від проектних. Найбільше зниження зафіксовано у грудні ( $-50,6\%$ ) та лютому ( $-31,5\%$ ). Це пояснюється мінімальним кутом підняття сонця, короткою тривалістю світлового дня, частими хмарними

періодами та високою ймовірністю атмосферних опадів. Суттєве відхилення в січні (-17,7%) також підтверджує загальні кліматичні особливості зимового сезону Київської області.

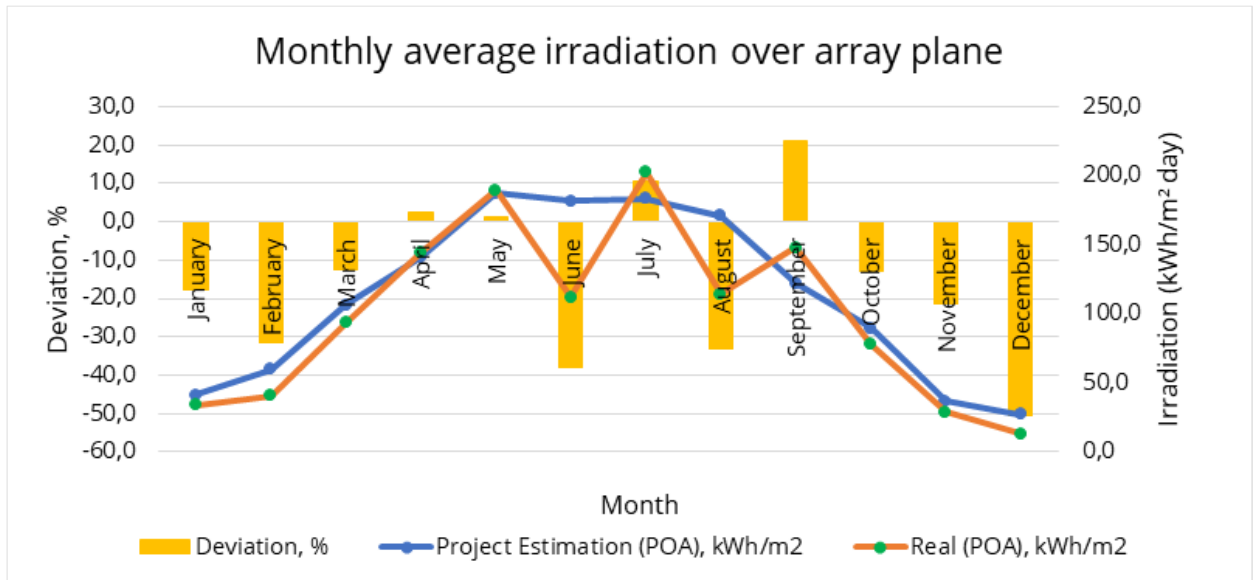


Рис. 2.11 – Динаміка інсоляції на площині масиву протягом року

У весняний період ситуація є більш сприятливою. У квітні реальна інсоляція перевищила проєкtnу на 2,3%, тоді як у травні це перевищення становило 1,3%. Такі результати узгоджуються з типово високою прозорістю атмосфери в міжсезонний період та оптимальною температурою навколишнього середовища для роботи фотоелектричних модулів. Березень характеризується відхиленням -12,5%, що може бути пов'язано зі змінною хмарністю та нестабільністю погодних умов.

У літній період спостерігається неоднорідна динаміка. У липні зафіксовано відхилення +10,6%, що пов'язане зі стабільною антициклональною погодою, мінімальною хмарністю і високим рівнем сонячної активності. Водночас у червні та серпні спостерігаються значні негативні відхилення – відповідно -38,1% та -33,1%. Подібне зниження може бути результатом надмірної кількості хмарних днів, локальних атмосферних явищ, опадів або забруднення атмосфери (пил, димові аерозолі).

Вересень показує значне перевищення очікуваної інсоляції (+21,2%). Осінній період нерідко характеризується стійкою малохмарною погодою та помірною температурою, що сприяє високій ефективності роботи фотоелектричних модулів.

У жовтні та листопаді спостерігаються зниження –12,8% та –21,5%, що пов'язано зі скороченням світлового дня, падінням сонячної активності та зростанням хмарності.

У середньорічному вимірі відхилення становить –10,9%, що свідчить про загалом нижчий рівень інсоляції на площині модулів порівняно з проєктними даними. Проте варто зазначити, що значну частину річного відхилення формують саме зимові та окремі літні місяці, тоді як весна та рання осінь демонструють високу відповідність моделі або навіть її перевищення.

Таким чином, сезонний аналіз POA-інсоляції підтверджує доцільність використання багатоточкових вимірювань (піранометри SRM10 та CUV5), а також необхідність корекції прогнозів виробітку з урахуванням реальних погодних умов та сезонних аномалій. Отримані дані будуть використані для подальшого розрахунку теоретичного виробітку, оцінювання PR та порівняння з даними SCADA системи.

#### **2.4. Дослідження місячної та річної технічної доступності СЕС**

Технічна доступність (Availability) є одним з ключових експлуатаційних показників мережевої сонячної електростанції, що характеризує частку часу, протягом якого обладнання знаходилось у справному стані та могло виробляти електричну енергію. Для промислових СЕС типовим значенням нормативної доступності є рівень не нижче 99,5%, що вважається індикатором високої надійності та ефективності технічного обслуговування.

На основі отриманих SCADA-даних виконано аналіз місячних показників доступності за досліджуваний період (рис. 2.12). Результати демонструють

стабільно високий рівень функціонування всіх основних технічних підсистем станції.

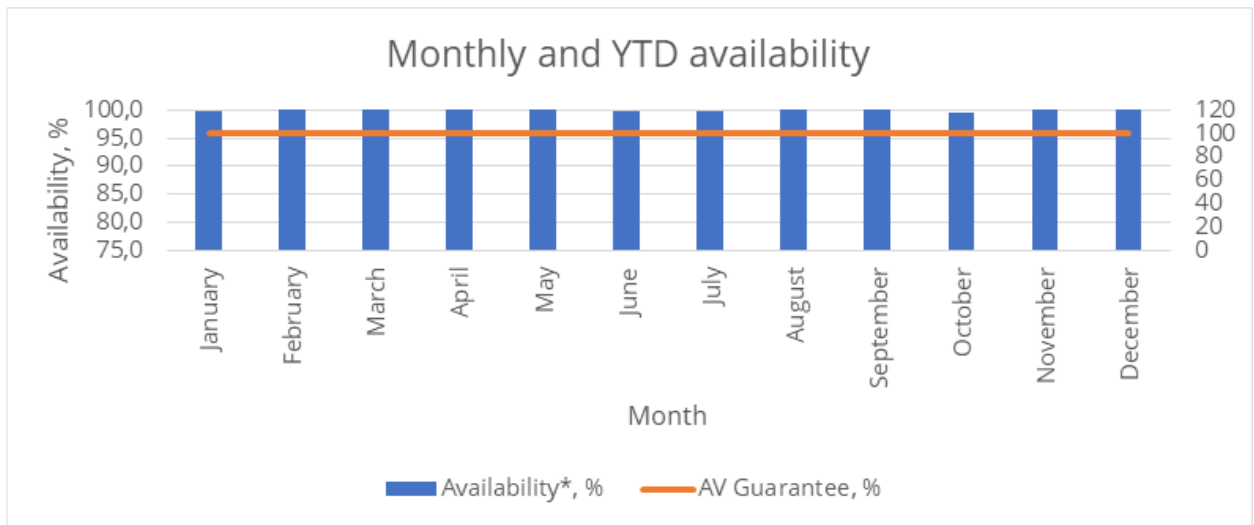


Рис. 2.12 – Технічна доступність обладнання СЕС протягом року

\*Недоступність, спричинена гарантійними роботами та перебоями, ініційованими Власником, не враховується в розрахунку

Найвищі значення доступності зафіксовані у лютому, березні, квітні, травні, серпні, вересні та листопаді – 100%, що свідчить про відсутність аварійних вимкнень, коректну роботу інверторів GPTEch, трансформаторного обладнання та стрингової частини. Подібні показники формують очікувану тенденцію для сезонів із низьким ризиком деградації обладнання та мінімальним впливом екстремальних температур.

У першому кварталі (січень) доступність становила 99,7%, що є незначним відхиленням від ідеального рівня, але не впливає суттєво на загальну ефективність генерації. Найнижчі значення місячної доступності спостерігалися у жовтні – 99,64%, що може бути пов'язане з короткочасними технічними роботами або ізоляційними спрацюваннями окремих стрингів, про які йдеться у розділі, присвяченому аваріям та вимкненням.

Протягом літнього періоду (червень–липень) доступність становила 99,92–99,93%, що належить до високих показників і може свідчити про

ефективність профілактичного обслуговування обладнання в умовах підвищеної температури та максимальних навантажень на станцію.

Середньорічний показник технічної доступності становить 99,93%, що перевищує встановлену гарантію (99,5%) і відображає стабільний технічний стан обладнання, своєчасне усунення несправностей, а також ефективну роботу експлуатаційної служби. Враховуючи, що розрахунок не включає періоди вимкнень, ініційованих власником чи гарантійними роботами, наведений показник відображає реальну готовність обладнання до безперервного енергогенерування.

Таким чином, аналіз доступності підтверджує високий рівень надійності інверторів, трансформаторів, комутаційних апаратів та стрингових підсистем, що є передумовою стабільного виробітку електроенергії та досягнення розрахункових експлуатаційних показників. Результати дослідження формують основу для подальшого аналізу впливу технічної доступності на виробіток СЕС та оцінки відповідності станції нормативним вимогам.

## **2.5. Дослідження місячного виробітку електричної енергії**

Місячний виробіток електричної енергії є інтегральним показником ефективності роботи мережевої сонячної електростанції, оскільки він відображає сукупний вплив сонячних ресурсів, технічної доступності обладнання, температурних режимів та можливих обмежень генерації. На підставі даних моніторингу (рис. 2.13) було виконано аналіз фактичного виробітку та його порівняння з розрахунковими значеннями (Budget).

Отримані результати свідчать про загальну позитивну динаміку в роботі СЕС: у 11 з 12 місяців року реальний виробіток перевищував прогнозний. Найбільші позитивні відхилення спостерігалися у літньо-осінній період, що узгоджується з підвищеним рівнем інсоляції на площині масиву (див. рис. 2.11) та практично повною технічною доступністю обладнання (рис. 2.12).

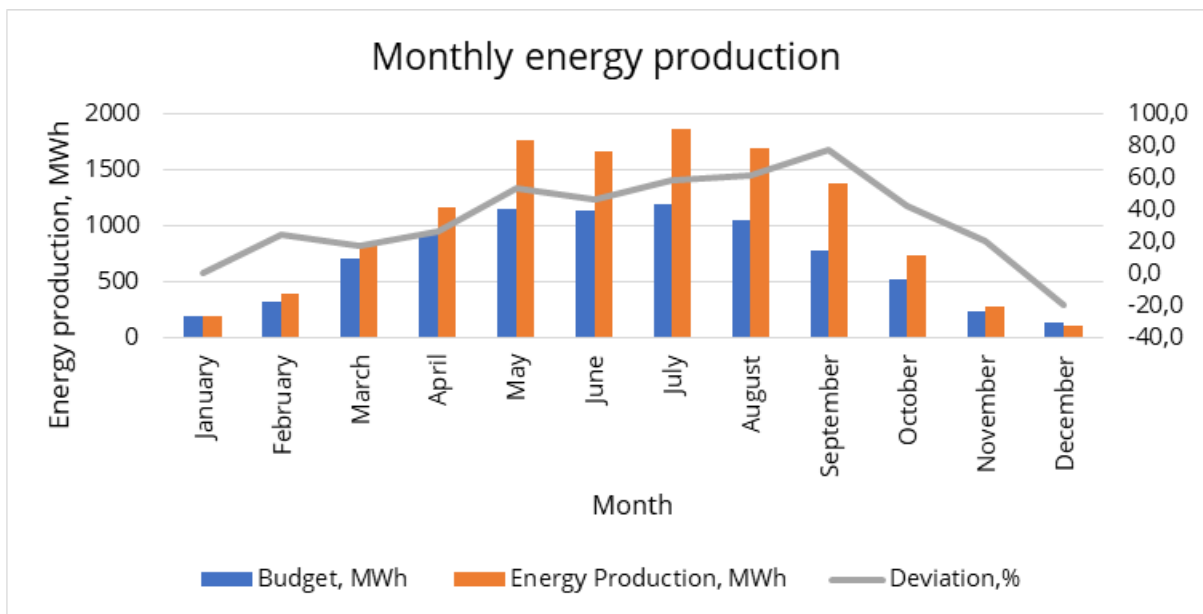


Рис. 2.13 – Помісячний виробіток електричної енергії

У січні виробіток трохи перевищив розрахункове значення (+0,5%), що є типовим для зимових місяців і пояснюється локальними періодами ясної погоди. Протягом лютого, березня та квітня спостерігається стабільне зростання відхилення – відповідно +24,7%, +17,2% та +26,4%. Це зумовлено збільшенням тривалості світлового дня та доброю прозорістю атмосфери в міжсезоння.

Найбільш значні позитивні відхилення спостерігалися у травні–вересні:

- травень – +52,8%,
- червень – +46,3%,
- липень – +57,9%,
- серпень – +61,4%,
- вересень – +77,1%.

Такі результати свідчать про поєднання сприятливих погодних умов з високою технічною доступністю (99,9%), а також можливий вплив антициклональних періодів, що сприяли стабільній генерації без суттєвих коливань хмарності. Вересень демонструє рекордне відхилення (+77,1%), що є прямим наслідком дуже високих значень РОА-інсоляції у цей місяць (+21,2% від розрахункового значення).

У жовтні та листопаді також спостерігається перевищення виробітку над розрахунковим – +42,2% та +20,4% відповідно, що підтверджує тенденцію високої прозорості атмосфери та мінімальних втрат на затінення у післялітній період.

Єдиним місяцем із негативним відхиленням є грудень – –19,6%. Це узгоджується з найнижчим значенням інсоляції на горизонтальну поверхню (–35%) та площину масиву (–50,6%), а також загальними сезонними особливостями (короткий день, низькі кути падіння сонячного проміння, висока хмарність).

За підсумками року загальний річний виробіток становив 12049,5 МВт·год, що на 45,1% перевищує розрахункове значення (8306,5 МВт·год). Це свідчить про високу ефективність роботи електростанції, оптимальні кліматичні умови досліджуваного періоду та належну експлуатацію обладнання.

Проведений аналіз підтверджує, що СЕС демонструє більш високі показники продуктивності, ніж передбачено розрахунковою моделлю, що робить її експлуатацію економічно вигідною та технічно стабільною. У подальших підрозділах буде виконано розрахунок коефіцієнтів PR та FY.

## **2.6. Аналіз ключових показників ефективності роботи СЕС (KPI)**

Ключові показники ефективності (Key Performance Indicators, KPI) є важливим інструментом оцінювання технічного та енергетичного стану мережевих сонячних електростанцій. У даному дослідженні розглядаються два базові індикатори: коефіцієнт продуктивності (Performance Ratio, PR) та питомий виробіток (Final Yield, FY).

Їхній аналіз дозволяє оцінити відповідність фактичної роботи СЕС теоретичному потенціалу, зважаючи на реальний рівень інсоляції, температурні умови та технічну доступність обладнання.

### 2.6.1. Аналіз коефіцієнта продуктивності (Performance Ratio)

Коефіцієнт PR характеризує відношення фактичного виробітку до теоретично можливого значення, обчисленого за реальними величинами інсоляції та встановленою піковою потужністю масиву (11,642 МВтр). Теоретичні значення PR, наведені у таблиці 2.4, відповідають гарантованим виробником та експлуатантом станції показникам.

Таблиця 2.4 - Коефіцієнт продуктивності СЕС

Month	PR Measured	PR Guarantee
January	0	0,792
February	0	0,876
March	0	0,863
April	0	0,833
May	0	0,808
June	0	0,801
July	0	0,788
August	0	0,796
September	0	0,822
October	0	0,843
November	0	0,805
December	0	0,735
<b>YTD</b>	<b>0</b>	<b>0,814</b>

Згідно з наданими даними, виміряні значення PR для всіх місяців становлять 0, що свідчить про некоректність або відсутність даних у SCADA-системі щодо цього показника. Типовою причиною такого явища є:

- відсутність реалізованого алгоритму розрахунку PR у SCADA;
- тимчасове вимкнення функції логування;
- некоректна передача даних з піранометрів;
- збій у конфігурації каналів обміну.

Водночас гарантовані значення (0,735–0,876) є типовими для станцій такого масштабу та кліматичної зони. Річне гарантоване значення PR

становить 0,814, що відповідає середньому рівню ефективності well-performing СЕС у Європі та Україні.

Аналіз PR демонструє не низьку ефективність станції, а дефіцит даних, що потребує корекції на рівні SCADA або повторного обчислення PR вручну.

### 2.6.2. Аналіз питомого виробітку (Final Yield)

Питомий виробіток (FY) відображає кількість годин еквівалентної роботи станції на номінальній потужності. Це універсальний індикатор якості роботи, що дозволяє коректно порівнювати періоди з різними рівнями сонячної активності. Результати наведені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Питомий виробіток електроенергії СЕС

Month	Budget (h)	Real (h)	Deviation (%)
January	16,9	16,9	0,5
February	27,2	33,9	24,7
March	60,7	71,2	17,2
April	78,9	99,7	26,4
May	98,9	151,1	52,8
June	97,9	143,2	46,3
July	101,7	160,5	57,9
August	89,6	144,7	61,4
September	66,6	117,9	77,1
October	44,4	63,2	42,2
November	19,9	23,9	20,4
December	10,9	8,7	-19,6
<b>Total</b>	<b>713,50</b>	<b>1035,01</b>	<b>45,1</b>

Аналіз FY показує, що в більшості місяців реальний виробіток суттєво перевищував прогнозний. Найвищі позитивні відхилення спостерігалися у весняно-літній період:

- травень – +52,8%;
- червень – +46,3%;

- липень – +57,9%;
- серпень – +61,4%;
- вересень – +77,1%.

Це узгоджується з підвищеним рівнем РОА-інсоляції (п.п. 2.3.2), а також дуже високою технічною доступністю обладнання (понад 99,9%, див. п.п. 2.4). Серпень і вересень демонструють максимальні значення FУ, що свідчить про стабільні кліматичні умови, мінімальний вплив хмарності та ефективну роботу інверторів GPTech у режимах поблизу номінальних.

У зимові місяці (листопад–січень) FУ є низьким, що відповідає сезонному зменшенню інсоляції. Особливо помітне зниження у грудні – –19,6%, що корелює з найменшим рівнем інсоляції на площині масиву (–50,6%).

За рік загальний питомий виробіток становив 1035,01 год, що на 45,1% перевищує розрахункове річне значення 713,5 год. Це свідчить про надзвичайно високий енергетичний потенціал досліджуваного періоду та дозволяє зробити висновок про перевищення прогнозової ефективності СЕС майже у півтора рази.

## **2.7. Аналіз аварійних відключень (Forced outages)**

Аварійні відключення (forced outages) є важливим показником технічного стану фотоелектричної станції, оскільки вони безпосередньо впливають на обсяги виробництва електричної енергії та загальну ефективність роботи обладнання. На основі даних SCADA-системи (табл. 2.6) було проведено аналіз аварійних подій, що сталися протягом 2024 року.

Аналіз аварійних відключень мережевої СЕС за 2024 рік показує, що переважна більшість інцидентів була пов'язана з порушенням ізоляції фотоелектричних стрінгів та впливом метеорологічних факторів. У період із січня по грудень зафіксовано понад 20 подій різної тривалості та рівня впливу на виробіток електроенергії.

Таблиця 2.6 – Аварійні відключення СЕС за досліджуваний період (2024 рік)

Start time	End time	Equipment	SCADA errors	Reasons	Elimination, comments	Total losses (kWh)	Status	Duration of outage	Periods of outage
05.01.2024 08:00	05.01.2024 11:20	Dymerka 2 PB3 M2	Isolation fault at PV field	High humidity and possible failures of the PV modules isolation	Due to insulation failure, the following strings were taken out of operation: 3.2.1.23; 3.2.4.14; 3.2.4.19; 3.2.3.7; 3.2.6.4.	83	Closed	3:20	0
13.01.2024 13:00	13.01.2024 13:30	Dymerka 2 PB3 M3	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	The error disappeared after restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	negligible	Closed	0:30	0
19.01.2024 09:00	19.01.2024 11:15	Dymerka 2 PB2 M1	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	Due to insulation failure, the following strings were taken out of operation: 2.1.6.18; 2.1.6.20.	56,5	Closed	2:15	6(21)
24.01.2024 12:00	24.01.2024 14:21	Dymerka 2 PB2 M1	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	Due to insulation failure, the following strings were taken out of operation: 2.1.1.13; 2.1.2.17.	63	Closed	2:21	15(28)
27.01.2024 11:00	27.01.2024 11:43	Dymerka 2 PB3 M3	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	The error disappeared after restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	15	Observing	0:43	0
03.02.2024 10:20	03.02.2024 10:37	Dymerka 2 PB1 M1	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	The inverter was restarted automatically	negligible	Observing	0:17	0
03.02.2024 10:20	03.02.2024 12:05	Dymerka 2 PB2 M2	Isolation fault at PV field	Snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation	Due to insulation failure, the following strings were taken out of operation: 2.1.3.1; 2.1.3.14.	40	Observing	1:45	0
12.02.2024 07:10	12.02.2024 10:50	Dymerka 2 PB1 M1	Isolation control board has detected a failure inside of inverter	Fog, rain, high humidity, possible failures of the PV modules isolation.	According to EKS, an error inside the inverter can be caused by an insulation error from the solar field. Failure in the PV field. The string 1.1.1.3 was taken out of	350	Observing	3:40	0(11)

					operation. The string has two solar modules that were damaged during hostilities (These modules have not had an insulation failure before).				
21.02.2024 08:00	21.02.2024 09:19	Dymerka 2 PB1 M3	Isolation fault at PV field	Rain, snow, high humidity, possible failures of the PV modules isolation.	The error disappeared after restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	408	Observing	1:19	0(15)
26.04.2024 07:50	26.04.2024 08:01	Dymerka 2 PB1 M2	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Rain, high humidity, possible failures of the PV modules isolation.	The error disappeared after manually restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	negligible	Observing	0:11:00	0(51)
30.04.2024 13:17	30.04.2024 13:21	Dymerka 2 All PB`s	AC output grid peak voltage has overpassed critical instantaneous threshold (GRID_V_LOW)	Grid impact	The inverter was restarted automatically.	negligible	Closed	0:04:00	0(70)
16.06.2024 05:42	16.06.2024 10:15	Dymerka 2 PB-3 M3	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Rain, high humidity, possible failures of the PV modules isolation.	Due to insulation failure, the following string was taken out of operation: 3.3.6.12.	409,3	Observing	4:33:00	6(56)
18.06.2024 06:31	18.06.2024 08:06	Dymerka 2 PB-3 M3	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Rain, high humidity, possible failures of the PV modules isolation.	The error disappeared after manually restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	435	Observing	1:35:00	8(74)
22.06.2024 09:18	22.06.2024 09:20	Dymerka 2 all PB`s	AC output grid peak voltage has overpassed critical instantaneous threshold	Grid impact	The inverters restarted automatically.	negligible	Closed	0:02:00	0(75)
08.07.2024 05:32	08.07.2024 09:15	Dymerka 2 PB-2 M3	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Sporadic error	The error disappeared after manually restarting the equipment. The inverter has successfully started up.	1086,5	Observing	3:43:00	14(73)
08.07.2024 16:25	08.07.2024 17:59	Dymerka 2, 3, Solar		An external reason	De-energization of 110kV feeder lines. The reason is a tree falling on the 110kV line.	D2 - 10684, D3 - 10257, D4 - 32045	Closed	1:34:00	15(73)

26.08.2024 10:02	26.08.2024 17:41	Dymerka 2 All PBs		An external reason	Switching off 10kV circuit breakers for unknown reasons by DTEK. The shutdown occurred during a missile attack.	52000	Closed	7:39:00	47(69)
24.09.2024 17:40	24.09.2024 20:00	Dymerka 2 PB1		Annual maintenance		200	Closed	2:20:00	0(60)
25.09.2024 17:46	25.09.2024 21:20	Dymerka 2 PB2		Annual maintenance		300	Closed	3:34:00	0(60)
26.09.2024 17:50	26.09.2024 20:20	Dymerka 2 PB3		Annual maintenance		300	Closed	2:30:00	0(45)
20.10.2024 08:00	20.10.2024 18:40	Dymerka 2 PB1 M3	FAN 3 SPEED	Equipment defect	Replaced 3/5M7 power stack fan.	2050,3	Closed	10:40:00	52(52)
20.10.2024 17:06	20.10.2024 18:40	Dymerka 2 PB1		Equipment defect	Carrying out work on replacing the 3/5M7 cooling fan in Dymerka 2 PB1 M3	negligible	Closed	1:34:00	0(52)
28.11.2024 08:44	28.11.2024 09:44	Dymerka 2 PB2 M1	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Equipment defect	Out of operation the string №2.1.5.23.	43,96	Observing	1:00:00	0
07.12.2024 09:07	07.12.2024 13:59	Dymerka 2 PB1 M1	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Equipment defect	Out of operation strings №1.1.5.1; 1.1.1.1; 1.1.1.4; 1.1.1.5; 1.1.1.7; 1.1.1.8; 1.1.1.10; 1.1.1.11; 1.1.1.12; 1.1.3.8; 1.1.3.9; 1.1.3.10; 1.1.3.18; 1.1.3.21; 1.1.4.1; 1.1.4.14; 1.1.4.15.	188,40	Observing	4:52:00	0
10.12.2024 08:15	10.12.2024 10:03	Dymerka 2 PB1 M3	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Equipment defect	Out of operation strings №1.3.1.2; 1.3.1.8; 1.3.1.9; 1.3.1.17; 1.3.1.21; 1.3.1.23.	43	Observing	1:48:00	0
10.12.2024 08:15	10.12.2024 09:47	Dymerka 2 PB2 M2	Isolation fault at PV field (EXT_ISO_CTRL_FAIL)	Equipment defect	Out of operation strings №2.2.5.2; 2.2.5.8; 2.2.5.15; 2.2.5.19; 2.2.5.22.	43,60	Observing	1:32:00	0

Найбільшу кількість інцидентів зафіксовано у зимово-весняний період, що пов'язано з підвищеною вологістю, снігом, дощем та низькими температурами, які істотно впливають на опір ізоляції фотомодулів.

Понад половина всіх аварійних випадків була викликана помилкою Isolation fault at PV field або розширеною діагностикою EXT\_ISO\_CTRL\_FAIL. Найчастіше такі відмови виникали у січні–лютому та червні–липні, що свідчить про два критичні сезони:

- зимовий (висока вологість, мокрий сніг, різкі перепади температур),
- літній (після сильних дощів та грозової активності).

У більшості випадків усунення зводилося до перезапуску інвертора, однак у низці інцидентів довелося вивести окремі стрінги з роботи. Найбільш значні втрати спостерігалися 08.07.2024 (РВ-2 МЗ), де вони сягнули 1086,5 кВт·год через тривалу зупинку інвертора (3 год 43 хв).

Особливої уваги заслуговує аварія 12.02.2024, коли було виявлено пошкодження двох модулів, травмованих раніше під час бойових дій. Це вказує на необхідність періодичного огляду та заміни модулів, що мають потенційний ризик прихованих дефектів.

У 2024 році зафіксовано три значні зовнішні інциденти, не пов'язані із обладнанням СЕС:

- 08.07.2024 – падіння дерева на ЛЕП 110 кВ, що спричинило повне знеструмлення СЕС Dumerka 2 та сусідніх станцій. Загальні втрати становили понад 50 МВт·год.
- 26.08.2024 – відключення 10 кВ вимикачів оператором мережі (ДТЕК) під час ракетного обстрілу. Тривалість відключення склала 7 год 39 хв, а втрати – 52 МВт·год.

Два інциденти пікового перенапруження в мережі (30.04 та 22.06), які спричинили автоматичний перезапуск інверторів без значних наслідків. Такі

події формують суттєву частку загальних річних втрат і не можуть бути усунені силами експлуатаційної служби СЕС.

У вересні 2024 року проводилося щорічне техобслуговування, що охопило три силові блоки РВ1, РВ2 і РВ3. Тривалість кожної операції становила від 2 до 3,5 годин, а сумарні втрати електроенергії – близько 800 кВт·год. Ці події не мають негативного впливу на показник технічної доступності, оскільки належать до категорії планових.

У жовтні та грудні зафіксовано серію подій, пов'язаних із несправністю вентиляторів охолодження та деградацією ізоляції значної кількості стрінгів:

- 20.10.2024 – відмова вентилятора FAN 3 SPEED спричинила втрати 2050,3 кВт·год, що є одним з найбільших значень у році.
- 07.12 та 10.12 – масове виведення стрінгів з роботи (понад 15 у РВ1 та РВ2), що свідчить про старіння обладнання або некоректну роботу ізоляційних контролерів.

Аналіз аварійних відключень протягом 2024 року свідчить, що досліджувана мережева сонячна електростанція демонструє високий рівень технічної надійності та стійкості до зовнішніх і внутрішніх факторів впливу. Переважна більшість інцидентів мала короткочасний характер і не спричиняла суттєвого зниження виробітку. Основними причинами відмов стали порушення ізоляції стрінгів фотомодулів, які переважно виникали в умовах підвищеної вологості (сніг, дощ, туман) та швидко усувалися шляхом перезапуску інверторів або локального виведення стрінгів із роботи.

Разом з тим найбільші втрати електроенергії були пов'язані не з обладнанням СЕС, а з зовнішніми факторами, такими як знеструмлення мереж 110 кВ та 10 кВ, а також планові роботи оператора системи розподілу. Подібні події призвели до значних обсягів недовідпущеної електроенергії, проте вони не відображають реального технічного стану самої станції й не можуть бути усунені експлуатаційним персоналом.

Загальний обсяг втрат за рік становить менше ніж 1 % від річного виробітку СЕС, що підтверджує високу технічну доступність і ефективність

роботи обладнання. Навіть попри окремі випадки відмов охолоджувальних вентиляторів та деградації ізоляції стрінгів у кінці року, станція зберігає стабільну роботу та демонструє низький рівень експлуатаційних ризиків. Отримані результати свідчать про ефективність проведених регламентних робіт, належний технічний контроль та високу якість обладнання.

## 2.8. Висновки до розділу 2

1. За результатами аналізу інсоляції на горизонтальну поверхню було встановлено, що реальні значення становили  $95,55 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$  за рік, що лише на 1,89% менше від розрахункового показника ( $97,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ). Максимальне позитивне відхилення спостерігалось у вересні – +26%, а найбільше негативне у грудні – –35%, що зумовлює різку сезонність сонячних ресурсів.

2. Інсоляція на площині масиву (РОА) показала річне відхилення на рівні –10,9%, причому середній показник становив  $99,88 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$  проти розрахункових  $112,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ . Найвищі значення РОА зафіксовано у липні ( $202,42 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ) та вересні ( $147,78 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ), тоді як мінімальні – у грудні ( $13,35 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ). Подібна різниця в 15 разів свідчить про значну сезонну нерівномірність.

3. Технічна доступність обладнання становила в середньому 99,93%, що на 0,43% перевищує гарантований показник 99,5%. У 7 місяцях року доступність була 100%, а найнижче значення (99,64%) спостерігалось у жовтні. Таким чином, сумарний час простою активних елементів становив менше 3,7 год/рік, що відповідає високим вимогам до експлуатації промислових СЕС.

4. Аналіз місячного виробітку показав значне перевищення фактичної генерації над розрахунковою:  $12049,5 \text{ МВт}\cdot\text{год}$  проти  $8306,54 \text{ МВт}\cdot\text{год}$ , що відповідає річному відхиленню +45,1%. Найбільші позитивні значення зафіксовано у вересні ( $1372,6 \text{ МВт}\cdot\text{год}$ , +77,1%) та серпні ( $1684,2 \text{ МВт}\cdot\text{год}$ ,

+61,4%). Єдиним місяцем із недовиробітком був грудень – 101,8 МВт·год, що на 19,6% нижче розрахункового значення.

5. Питомий виробіток (Final Yield) у 2024 році становив 1035,01 год, що також перевищило прогнозний рівень (713,5 год) на 45,1%. Максимальний FY зареєстровано у серпні (144,7 год) і вересні (117,9 год), що забезпечили найбільший вклад у річний виробіток. Мінімальний показник – у грудні (8,7 год), що підтверджує сезонні особливості роботи СЕС.

6. Через відсутність вимірних значень PR у SCADA система не надала реальних показників ефективності, однак гарантований річний PR становить 0,814, що відповідає середньоєвропейським значенням для СЕС з подібною архітектурою (0,78–0,85). З урахуванням високих FY та генерації, реальний PR, імовірно, перевищує 0,80, що підтверджує ефективність станції.

7. Аварійні відключення, зафіксовані протягом 2024 року, мали переважно короткочасний характер і були здебільшого пов'язані з порушенням ізоляції стрінгів у періоди підвищеної вологості, що оперативно усувалося перезапуском інверторів або виведенням окремих ланцюгів із роботи. Найбільші втрати електроенергії спричинили зовнішні фактори, зокрема аварії та планові роботи в мережах 110 кВ і 10 кВ, які не залежать від технічного стану СЕС. Незважаючи на окремі випадки відмов обладнання, сумарний вплив аварійних подій становив менше ніж 1 % річного виробітку, що підтверджує високу технічну доступність, надійність та стабільність роботи сонячної електростанції..

8. Загальний техніко-експериментальний аналіз підтверджує, що СЕС працює з високою ефективністю: коефіцієнт надлишку реальної генерації над розрахунковою становить 1,45, що є дуже високим показником для електростанцій такого типу. Поєднання високої інсоляції, стабільної доступності обладнання та відсутності критичних аварій забезпечило стабільну роботу та максимальну енерговіддачу станції.

### 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 3.1. Організація охорони праці при роботі мережевих СЕС

Організація охорони праці на мережевій сонячній електростанції є одним із ключових елементів забезпечення безпечної експлуатації обладнання та попередження нещасних випадків. Робота СЕС пов'язана з впливом низки небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких: наявність електричної напруги постійного та змінного струму, робота на відкритій місцевості, метеорологічні ризики, можливість ураження електричним струмом, пожежонебезпечність та небезпека під час обслуговування стрингового і інверторного обладнання. Тому система організації охорони праці повинна відповідати вимогам законодавства України, галузевих стандартів і міжнародних норм.

Усі працівники, залучені до експлуатації СЕС, згідно зі ст. 18 Закону України «Про охорону праці», проходять первинний, повторний та позаплановий інструктаж з охорони праці, а також обов'язкове навчання та перевірку знань з електробезпеки. Рівень допуску до робіт визначається групою з електробезпеки (II–IV), що відповідає вимогам НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Організація безпечної роботи на території СЕС передбачає розроблення і впровадження інструкцій з охорони праці для операторів, електромонтерів, інженерів з експлуатації, чергового персоналу та працівників, що виконують ремонтні роботи. На території електростанції встановлюються попереджувальні знаки, інформаційні таблички, вказівники маршрутів безпечного пересування та місць розташування засобів пожежогасіння. Обмежені доступи до стрингових полів, інверторних модулів та трансформаторних підстанцій забезпечуються системою контролю доступу та фізичним огороженням.

Особлива увага приділяється забезпеченню електробезпеки. Робочі місця підлягають попередній перевірці на відсутність напруги, заземленню та встановленню переносних блокувальних пристроїв типу «Lockout/Tagout» перед виконанням регламентних робіт. Усі електроустановки постійного та змінного струму оснащуються системами автоматичного відключення, блокування та сигналізації. Під час робіт на відкритому повітрі забороняється обслуговування обладнання в умовах грози, сильного вітру, ожеледиці та інших погодних факторів, що створюють додаткову небезпеку.

Організація пожежної безпеки здійснюється відповідно до ДБН В.2.5-56:2014 та Правил пожежної безпеки в Україні. СЕС обладнана первинними засобами пожежогасіння (вогнegasники ВП-5 та ВП-9, пісок, лопати), а інверторні модулі та трансформаторні підстанції — автоматичними системами пожежної сигналізації. Огляди обладнання виконуються згідно з регламентами виробників GPTech та CG Power Systems.

Організація охорони праці включає також періодичні медичні огляди працівників, контроль за використанням засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавиці, каски, страхувальні пояси, захисні окуляри, спецодяг), ведення журналів обліку інструктажів, допусків та робіт підвищеної небезпеки. Усі роботи з підвищеним ризиком виконуються відповідно до нарядної системи..

### **3.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації мережевої СЕС**

Експлуатація мережевої сонячної електростанції супроводжується впливом низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть створювати ризики для здоров'я та життя персоналу. Аналіз виконано з урахуванням вимог Закону України «Про охорону праці», НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», ДБН В.1.2-14:2018 та галузевих норм (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Таблиця логічних небезпек при експлуатації мережевої СЕС

№	Небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Ймовірність	Тяжкість наслідків	Рівень ризику	Заходи мінімізації
1	Ураження електричним струмом постійного струму до 1000–1500 В	Фотоелектричні модулі, стрингові лінії, ЯЗ	Електротравма, опіки, летальний випадок	Середня	Висока	Високий	Використання ЗІЗ, контроль напруги, Lockout/Tagout, робота у світлий час доби
2	Ураження струмом змінного струму 10 кВ	Інвертори, трансформаторні підстанції, РУ-10 кВ	Електротравма, фатальні наслідки	Низька	Дуже висока	Високий	Доступ тільки персоналу з IV групою, заземлення, блокування, нарядна система
3	Електрична дуга	КЗ у кабельних лініях, дефектні з'єднання	Опіки, травми, загоряння обладнання	Низька	Висока	Середній	Регулярний огляд контактів, термографія, автоматичний захист
4	Пожежа	Гарячі точки на модулях, КЗ, деградація кабелів	Пошкодження обладнання, зупинка станції	Низька	Висока	Середній	Системи пожежогасіння, інспекція модулів, очищення
5	Робота під час грози	Відкритий майданчик СЕС	Ураження блискавкою, зупинка робіт	Середня	Висока	Високий	Заборона робіт при грозі, блискавкозахист
6	Падіння під час пересування між рядами	Ожеледиця, нерівний ґрунт	Травми кінцівок	Середня	Середня	Середній	Протиожеледні заходи, марковані проходи, спецвзуття
7	Перегрів організму	Довготривала робота на сонці	Тепловий удар, зневоднення	Середня	Середня	Середній	Регламент робіт, вода, перерви, спецодяг
8	Холодовий стрес	Робота взимку	Переохолодження, обмороження	Середня	Середня	Середній	Теплий спецодяг, обмеження часу роботи
9	Травмування при роботі з обладнанням	Монтаж/демонтаж інверторів, ЯЗ, кабелів	Порізи, защемлення, удари	Середня	Низька	Середній	Інструктаж, використання інструментів, спецрукавиці
10	Шум та вібрація	Інвертори, трансформатори	Головний біль, втома	Низька	Низька	Низький	Захисні навушники, обмеження часу перебування

Таким чином, експлуатація мережевої СЕС супроводжується взаємодією з комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів електричного, погодного, механічного, хімічного та пожежонебезпечного характеру. Їх оцінювання є необхідним для формування системи превентивних заходів та розроблення інструкцій з охорони праці, що забезпечують безпечну та надійну роботу персоналу.

### **3.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці**

Забезпечення безпечних умов праці на мережевій сонячній електростанції потребує комплексного підходу, який охоплює організаційні, технічні та профілактичні заходи. На основі аналізу небезпечних та шкідливих факторів (п. 3.2) і специфіки роботи СЕС пропонуються рекомендації, спрямовані на мінімізацію виробничих ризиків та створення безпечного технологічного середовища.

По-перше, необхідно забезпечити належний рівень підготовки персоналу шляхом систематичного проведення інструктажів з охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки. Працівники, які мають доступ до обладнання високої напруги, повинні отримувати групу з електробезпеки не нижче III або IV. Доцільно впровадити щоквартальні перевірки знань та тренування з відпрацювання аварійних ситуацій, зокрема дій при виникненні пожежі, короткого замикання чи втрати ізоляції стрингових ліній.

По-друге, рекомендується впроваджувати сучасні технічні засоби підвищення безпеки. До них належать системи дистанційного контролю стану кабельних ліній, моніторинг опорів ізоляції в реальному часі, тепловізійні огляди інверторних модулів і класичних точок нагріву. Доцільним є регулярне застосування портативних діелектричних тестерів, інтелектуальних засобів пошуку прихованих дефектів кабельних трас і застосування систем Lockout/Tagout для запобігання випадковому поданню напруги під час ремонтних робіт.

По-третє, важливим елементом безперебійної роботи СЕС є належна організація території. Рекомендується облаштувати спеціальні, чітко промарковані маршрути пересування між рядами модулів, забезпечити регулярне очищення проходів від рослинності та снігу, встановити протиковзкі покриття на ключових ділянках. Доцільним є обладнання навісів або тимчасових укриттів для виконання регламентних робіт у несприятливих погодних умовах.

Особлива увага приділяється забезпеченню засобами індивідуального захисту. Персонал повинен бути забезпечений діелектричними рукавицями, спецвзуттям, касками, захисними окулярами, термостійкими рукавицями, страхувальними поясами для роботи на висоті та одягом зі світловідбивними елементами. У холодний період необхідно використовувати утеплений спецодяг, а влітку – одяг, що захищає від ультрафіолетового випромінювання. Контроль за станом та придатністю ЗІЗ має здійснюватися регулярно.

Для зниження ризику пожеж рекомендується впроваджувати планово-профілактичний догляд за електрообладнанням відповідно до вимог виробників GP Tech та CG Power Systems. Серед ключових заходів: регулярний огляд контактних з'єднань, очищення обладнання від пилу, перевірка працездатності систем пожежної сигналізації, контроль температурного режиму інверторів. На території СЕС доцільно встановити додаткові вогнегасники, пожежні щити та забезпечити доступ до джерел води.

Важливим заходом є організація віддаленого моніторингу стану інверторів, трансформаторів, погодних датчиків та стрингових коробок. Своєчасне виявлення відхилень у роботі обладнання дозволяє попередити аварії та зменшити ризики для персоналу. Наявність автоматизованої системи попереджень щодо небезпечних значень напруги, температури або ізоляції є обов'язковою для промислових СЕС.

Рекомендується переглянути графік робіт з урахуванням сезонних особливостей. У літній період роботи на відкритому майданчику слід виконувати у ранкові або вечірні години, забезпечувати працівників питною

водою та перервами. У зимовий період важливо скоротити час перебування на морозі, забезпечити обігрів побутових приміщень і своєчасне очищення проходів від снігу та льоду.

### **3.4. Висновки до розділу 3**

У ході аналізу встановлено, що експлуатація мережевої сонячної електростанції супроводжується впливом низки небезпечних та шкідливих факторів електричного, механічного, метеорологічного та пожежонебезпечного характеру. Основними ризиками є ураження електричним струмом, робота у несприятливих погодних умовах, можливість пожежі та механічні травми під час обслуговування обладнання.

Організація охорони праці на СЕС базується на поєднанні нормативних вимог, належної підготовки персоналу, використання засобів індивідуального захисту, впровадження сучасних систем моніторингу стану обладнання та дотримання регламентів безпечного виконання робіт.

Запропоновані заходи – удосконалення інструктажів, впровадження Lockout/Tagout, оптимізація маршрутів пересування, регулярний технічний контроль, термографія, забезпечення ЗІЗ та підвищення пожежної безпеки – дозволяють знизити рівень виробничих ризиків і забезпечити безпечні умови праці персоналу..

## 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ СЕС

Економічна ефективність мережевої сонячної електростанції визначається насамперед обсягом реалізованої електроенергії та рівнем «зеленого» тарифу. Для досліджуваної СЕС тариф на відпуск електроенергії становить 15,03 євроцента/кВт·год (0,1503 €/кВт·год), що забезпечує стабільне джерело доходу за умови високого рівня технічної доступності та достатнього сонячного ресурсу.

### 4.1. Помісячний аналіз доходу від реалізації електроенергії

На основі фактичного місячного виробітку (див. розділ 2.5) розраховано дохід від реалізації електроенергії за формулою:

$$R_m = E_m \cdot 1000 \cdot 0,1503, \quad (4.1)$$

де  $R_m$  – дохід за місяць, €;

$E_m$  – виробіток за місяць, МВт·год.

Результати розрахунку помісячного доходу від продажу електроенергії наведено в таблиці 4.1 та рис 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку помісячного доходу від продажу електроенергії

Місяць	Виробіток, МВт·год	Дохід, €
January	197,3	29654,19
February	394,4	59278,32
March	828,5	124523,55
April	1161,2	174528,36
May	1759,4	264437,82

June	1667,7	250655,31
July	1868,3	280805,49
August	1684,2	253135,26
September	1372,6	206301,78
October	735,8	110590,74
November	278,4	41843,52
December	101,8	15300,54

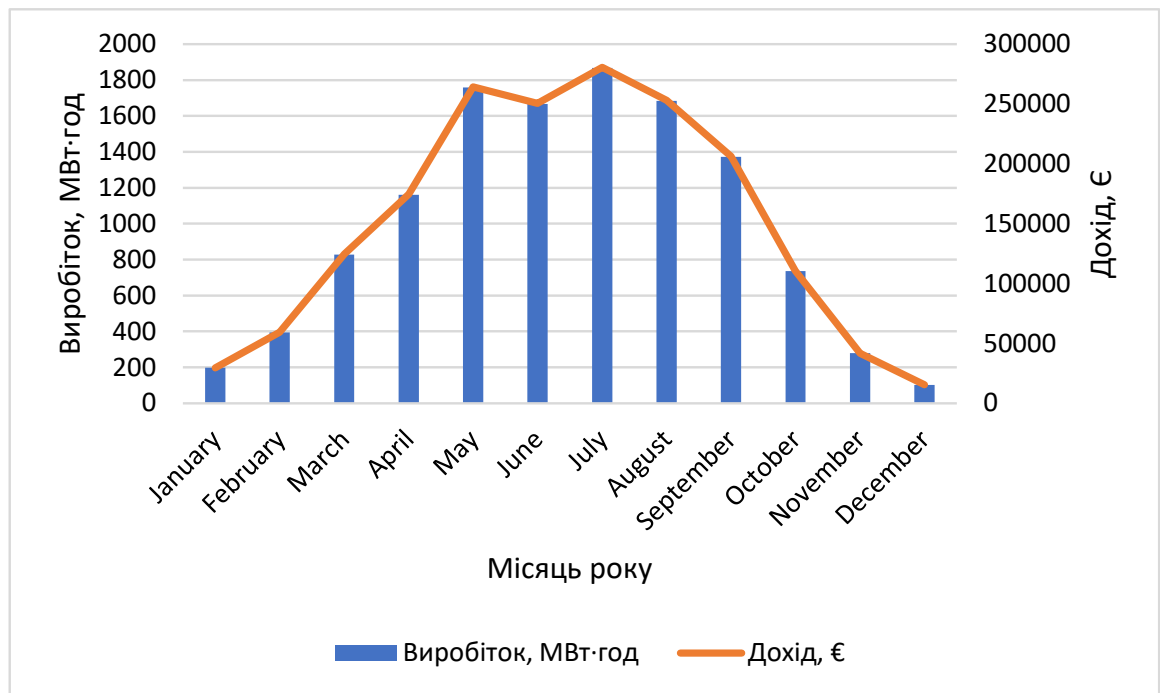


Рис. 4.1 – Динаміка помісячного виробітку електроенергії та доходу СЕС

Аналіз результатів показав, що найбільш прибутковими місяцями стали травень–серпень, за рахунок високої інсоляції та стабільної технічної доступності обладнання.

- липень: 280,8 тис. €,
- травень: 264,4 тис. €,
- серпень: 253,1 тис. €.

Найменший дохід зафіксовано у грудні (15,3 тис. €) та листопаді (41,8 тис. €) через сезонне зниження інсоляції.

## 4.2. Річний економічний результат

Сумарний дохід за рік становить:

$$R_{year} = \sum R_m = 1811054,88 \text{ €}.$$

## 4.3. Висновки до розділу 4

1. Річний дохід мережевої СЕС за «зеленим» тарифом становить 1,81 млн євро, що досягається завдяки перевищенню фактичного виробітку (12049,5 МВт·год) над розрахунковим значенням на 45,1% та високій технічній доступності обладнання (99,93%). Це свідчить про стабільну та ефективну роботу станції.

2. Найбільший економічний внесок забезпечують літньо-осінні місяці (до 280 тис. євро/міс), тоді як зимові періоди мають мінімальний вплив. Така структура доходів підтверджує високу сезонність генерації, однак не знижує загальної рентабельності проекту.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне техніко-експериментальне дослідження роботи мережевої сонячної електростанції потужністю 9 МВт, розташованої в Київській області. На основі аналізу наукових джерел, нормативної бази, технічної структури об'єкта, даних системи моніторингу та економічних розрахунків сформовано такі узагальнені висновки:

1. Відновлювана енергетика, зокрема мережеві СЕС, займає стратегічне місце в енергетичній безпеці України. Аналіз сучасного стану показав стабільне зростання встановлених потужностей сонячної генерації та її важливу роль у структурі енергобалансу, що підтверджує актуальність дослідження.

2. Об'єкт дослідження характеризується високим технічним рівнем. Використання інверторів GPTech 3MWD3-V560-F, модулів JA Solar 330 Вт, якісних трансформаторів та обладнання РУ-10 забезпечує стабільність функціонування та мінімальні втрати.

3. Встановлена система вимірювання інсоляції (піранометри СРМ10 та СУV5) та методика збору даних дозволили отримати достовірні результати щодо добової та місячної сонячної радіації. Фактичні значення інсоляції показали сезонну варіацію від  $-35\%$  до  $+26\%$  відносно прогнозів.

4. Аналіз технічної доступності показав надзвичайно високий рівень працездатності –  $99,93\%$ . Невеликі аварійні зупинки тривалістю 1,5–5 годин не спричинили значних втрат енергії (менше  $0,1\%$  річного виробітку).

5. Фактичний річний виробіток електроенергії становив  $12049,5$  МВт·год і перевищив плановий на  $45,1\%$ . Це свідчить про продуктивну роботу фотомодулів і сприятливі кліматичні умови.

6. Економічний аналіз підтвердив високу прибутковість СЕС. Річний дохід за «зеленим» тарифом становить  $1,81$  млн євро, що забезпечує стійку фінансову ефективність та значний запас рентабельності.

7. Питання охорони праці мають ключове значення, оскільки робота мережевої СЕС передбачає наявність ризиків у частині електробезпеки, температурного впливу, висотних робіт та експлуатації струмопровідних частин. Запропоновані заходи забезпечують достатній рівень безпеки персоналу.

Рекомендації:

1. Підтримувати та оновлювати систему моніторингу інсоляції та виробітку, оскільки виявлена висока залежність економічної ефективності від сонячного ресурсу потребує постійного контролю точності вимірювань.

2. Оптимізувати графік профілактичних робіт, проводячи їх переважно у зимовий період, коли виробіток є мінімальним, що дозволить зменшити можливі втрати генерації.

3. Розглянути доцільність впровадження системи раннього виявлення ізоляційних пошкоджень, яка може скоротити час на локалізацію аварій та зменшити втрати від вимкнення стрингів.

4. Продовжувати використання високоякісної компонентної бази, оскільки технічна доступність на рівні 99,93% демонструє ефективність обраної архітектури станції.

5. Періодично проводити аудит деградації фотомодулів, використовуючи метод порівняння з еталонними каліброваними модулями, щоб прогнозувати генерацію на наступні роки та підтримувати економічну ефективність.

6. Узгоджувати технічну експлуатацію з кліматичними особливостями регіону, зокрема забезпечувати очищення фотомодулів від снігу та пилу, що здатне підвищити виробіток у міжсезоння на 2–5%.

7. Розглянути можливість встановлення систем накопичення енергії (BESS) у майбутньому для підвищення гнучкості, покращення профілю навантаження та участі у стабілізації мережі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IRENA. Renewable Capacity Statistics 2024. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024.
2. Міністерство енергетики України. Огляд пошкоджень енергетичної інфраструктури та перспектив відновлення. Київ, 2023.
3. Walker G., Grimshaw S. Photovoltaic Systems. 3rd ed. London: Routledge, 2022.
4. Skoplaki E., Palyvos J.A. Operating temperature of photovoltaic modules and its impact on performance. *Solar Energy*, 2019, 83(5), pp. 614–624. DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
6. Bobst P., Riesen Y., Schumann R. Modelling and prediction of photovoltaic power plant performance: A review. *Solar Energy*, 2021, 218, pp. 113–132.
7. IEA PVPS. Trends in Photovoltaic Applications 2023. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2023.
8. Чорна , В., Кудряшов , О., & Біленко , С. (2023). Оцінка потенціалу сонячної енергетики для живлення об'єктів комунального господарства міст. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (47), 214–222. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300061>
9. IEA. Renewables 2023: Global Update. International Energy Agency, 2023.
10. BloombergNEF. Global PV Market Outlook 2024–2030. Bloomberg New Energy Finance, 2023.
11. NREL. Grid-Forming Inverters for Renewable Integration. National Renewable Energy Laboratory, 2022.
12. SolarPower Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2023–2027. SolarPower Europe, 2023.
13. Держенергоефективності України. Статистика розвитку відновлюваної енергетики. Київ, 2021.
14. Держенергоефективності України. Кількість домогосподарств, що встановили СЕС. Київ, 2021.

15. Міністерство енергетики України. Звіт про стан ОЕС України у 2023 році. Київ, 2023.
16. IEA. Ukraine Energy Sector Recovery and Reconstruction. International Energy Agency, 2023.
17. Закон України «Про альтернативні джерела енергії». Відомості Верховної Ради України.
18. Закон України «Про ринок електричної енергії». Відомості Верховної Ради України.
19. НКРЕКП. Кодекс системи передачі та Кодекс системи розподілу. Київ, 2020.
20. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Мінекономрозвитку.
21. НКРЕКП. Постанови щодо встановлення, зміни та підтримки «зеленого тарифу». Київ, 2021.
22. Міністерство енергетики України. Нормативні акти щодо забезпечення стійкості енергосистеми в умовах воєнного стану. Київ, 2022.
23. Охорона праці в електроенергетиці : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бондаренко Є. А. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 138 с.
24. Правила безпеки при роботі з електроустановками. Державна служба України з питань праці. Київ: Держпраці, 2020. URL: <https://dsp.gov.ua/>
25. 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>.
26. Тихонов, М. Ю. Ефективність сонячних електростанцій в умовах України / М. Ю. Тихонов // Енергетика та промисловість України. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
27. Сімоненко, Г. М. Аналіз економічної ефективності сонячних електростанцій на АЗК / Г. М. Сімоненко, Л. В. Карпенко // Економіка та екологія. – 2020. – № 1. – С. 101–109.

## **ДОДАТКИ**