

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: «Підвищення якості електричної енергії в системах електропостачання споживачів із фотоелектричними установками»

Виконав

(підпис)

Олександр КОВГАН

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

Олександр КОВГАНУ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Підвищення якості електричної енергії в системах електропостачання споживачів із фотоелектричними установками»

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, к.т.н., доцент

3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.

4. Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз стану питання; 2. Дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки при паралельному підключенні до розподільчої мережі; 3. Оцінка впливу фотоелектричної установки на показники якості електроенергії при різних режимах роботи електричної мережі; 4. Охорона праці; 5. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

(підпис)

Олександр КОВГАН

(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»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки при паралельному підключенні до розподільчої мережі»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Оцінка впливу фотоелектричної установки на показники якості електроенергії при різних режимах роботи електричної мережі»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Олександр КОВГАН

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Ковган Олександр Григорович. Підвищення якості електричної енергії в системах електропостачання споживачів із фотоелектричними установками.

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

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню впливу сонячної фотоелектричної установки (СФУ) потужністю 5,5 кВт на показники якості електроенергії у системах електропостачання приватного споживача за різних режимів роботи електричної мережі. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності та якості електроенергії у розподільчих мережах, зростанням частки відновлюваних джерел енергії та переходом до децентралізованої моделі енергопостачання.

Метою роботи є оцінка впливу фотоелектричної генерації на параметри якості електроенергії (напруга, частота, коефіцієнт потужності, гармонічні спотворення) при паралельному підключенні СФУ до розподільчої мережі 0,4 кВ. Для досягнення мети проведено експериментальні вимірювання, аналіз параметрів енергопостачання, моделювання різних режимів роботи мережі та економічне обґрунтування впровадження установки.

Робота складається з п'яти розділів. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку розподіленої генерації в Україні та світі, розглянуто типи фотоелектричних систем і нормативну базу (IEC 61000, EN 50160, ДСТУ EN 50160), що регламентує показники якості електроенергії. Визначено актуальні проблеми інтеграції малих СФУ у локальні мережі.

У другому розділі подано опис експериментальної СЕС, змонтованої в с. Діброва Сумської області: використано монокристалічні модулі JA Solar

JAM54S31-405/MR та інвертор DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU. Проведено аналіз добового виробітку, споживання та енергетичного балансу, що засвідчив можливість покриття до 75 % добового навантаження споживача.

Третій розділ присвячено оцінці якості електроенергії при різних режимах роботи мережі. Встановлено, що при підключенні СФУ знижується амплітуда коливань напруги на 5–6 В, а коефіцієнт гармонічних спотворень $\text{THD}_{(U)}$ зменшується на 1,5–1,6 %. У перехідних і аварійних режимах інвертор забезпечує автоматичну компенсацію реактивної потужності та швидке відновлення напруги після короткочасних перевантажень.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці під час експлуатації СЕС у приватному господарстві, проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, розроблено заходи для запобігання ураженню електричним струмом, перегріву елементів і забезпечення пожежної безпеки.

П'ятий розділ містить економічне обґрунтування проєкту: визначено річний виробіток СФУ – 5,8 МВт·год, річну економію коштів – 18,6 тис. грн, собівартість виробленої енергії – 1,6 грн/кВт·год, строк окупності – 9 років.

У результаті дослідження доведено, що сонячна фотоелектрична установка потужністю 5,5 кВт забезпечує покращення показників якості електроенергії, підвищення стабільності напруги, зменшення гармонічних спотворень та є економічно вигідним і екологічно безпечним рішенням для споживачів у сільській місцевості. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження малих СФУ як ефективного інструменту підвищення надійності та енергоефективності локальних систем електропостачання.

Ключові слова: сонячна електростанція, фотоелектрична установка, якість електроенергії, гармонічні спотворення, інвертор, коефіцієнт потужності, енергоефективність, економічна доцільність.

ABSTRACT

Kovhan Oleksandr Hryhorovych. Improving the Quality of Electric Energy in Power Supply Systems of Consumers with Photovoltaic Installations.

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 the study of the impact of a 5.5 kW solar photovoltaic installation (PVI) on the power quality indicators in consumer power supply systems under different operating conditions of the electrical network. The relevance of the topic is determined by the growing need to improve energy efficiency and power quality in distribution networks, the increasing share of renewable energy sources, and the transition toward a decentralized model of energy supply.

The purpose of the work is to assess the influence of photovoltaic generation on power quality parameters—voltage, frequency, power factor, and harmonic distortion—during the parallel operation of a PVI with a 0.4 kV distribution network. To achieve this goal, experimental measurements were conducted, power parameters were analyzed, various network operating modes were modeled, and the economic efficiency of the installation was substantiated.

The thesis consists of five chapters. The first chapter analyzes the current state of distributed generation in Ukraine and worldwide, describes types of photovoltaic systems, and reviews the regulatory framework (IEC 61000, EN 50160, DSTU EN 50160) that governs power quality indicators. Key challenges of integrating small PV systems into local grids were identified.

The second chapter presents a detailed description of the experimental solar power plant installed in Dibrova village, Sumy region, based on JA Solar JAM54S31-405/MR monocrystalline modules and a DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU inverter. The analysis of daily generation, consumption, and energy balance showed that up to 75 %

of daily energy demand can be covered by solar power.

The third chapter focuses on evaluating power quality under different network operating modes. It was found that connecting the PVI reduces voltage fluctuation amplitude by 5–6 V and lowers the total harmonic distortion ($\text{THD}_{(U)}$) by 1.5–1.6 %. In transient and abnormal modes, the inverter automatically compensates for reactive power and quickly restores the voltage after short-term disturbances.

The fourth chapter addresses occupational safety issues during PVI operation in a private household, identifying potential hazards and harmful factors and proposing measures to prevent electric shock, overheating, and fire hazards.

The fifth chapter contains the economic justification of the project. The annual energy generation is estimated at 5.8 MWh, annual savings at UAH 18,600, the cost of generated energy at UAH 1.6 per kWh, and the payback period at 9 years.

The results demonstrate that a 5.5 kW photovoltaic installation improves power quality, stabilizes voltage, reduces harmonic distortion, and proves to be an economically viable and environmentally safe solution for rural consumers. The findings confirm the feasibility of implementing small PV systems as an effective tool to enhance reliability, stability, and energy efficiency of local power supply systems.

Keywords: solar power plant, photovoltaic installation, power quality, harmonic distortion, inverter, power factor, energy efficiency, economic feasibility.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	13
1.1. Сучасний стан розвитку систем розподіленої генерації в Україні та світі.....	13
1.2. Типи фотоелектричних установок для електропостачання споживачів	15
1.3. Аналіз нормативних документів щодо забезпечення якості електричної енергії.....	19
1.4. Показники якості електричної енергії в системах з фотоелектричними установками.....	22
1.5. Висновки до розділу 1.....	24
2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ	26
2.1. Місце розташування експериментальної СЕС.....	26
2.2. Опис електричної схеми та основних елементів експериментальної СФУ	28
2.3. Аналіз експериментальних даних роботи сонячної фотоелектричної установки.....	32
2.4. Аналіз добового графіку навантаження споживача	35
2.5. Порівняльний аналіз виробітку СФУ та споживання електроенергії ...	37
2.6. Висновки до розділу 2.....	39
3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	41
3.1. Режими роботи електричної мережі.....	41

3.2. Показники якості електроенергії за нормальних режимів роботи централізованої мережі.....	42
3.3. Аналіз показників якості електроенергії при тимчасово допустимих режимах роботи.....	49
3.4. Аналіз показників якості електроенергії при аварійних режимах мережі	52
3.5. Висновки до розділу 3.....	54
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	56
4.1. Організація охорони праці при роботі сонячною електростанцією	56
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації сонячної електростанції.....	57
4.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з СЕС	59
4.4. Висновки до розділу 4.....	60
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	61
5.1. Визначення річного виробітку електроенергії	61
5.2. Визначення річної економії	61
5.3. Визначення капіталовкладень	62
5.4. Визначення експлуатаційних витрат.....	62
5.5. Розрахунок строку окупності	62
5.6. Визначення собівартості виробленої електроенергії	63
5.7. Висновки до розділу 5.....	63
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66
ДОДАТКИ	70

ВСТУП

1. Актуальність теми. Перехід до розподіленої генерації з використанням відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних фотоелектричних установок (СФУ), є ключовим напрямом розвитку сучасної енергетики [8, 10, 12]. В Україні, як і у світі, швидко зростає кількість малих СЕС у приватному секторі, що підвищує рівень енергетичної незалежності споживачів [9, 11]. Однак паралельна робота СФУ з мережею 0,4 кВ може спричиняти відхилення параметрів якості електроенергії – коливання напруги, флікер, гармонічні спотворення [1, 3, 7]. Водночас сучасні інвертори здатні компенсувати реактивну потужність і знижувати рівень гармонік, покращуючи стабільність електропостачання [4, 6, 31]. Тому дослідження впливу фотоелектричних установок на якість електроенергії у мережах низької напруги та розроблення технічних рішень для забезпечення їх сумісної роботи з мережею є актуальним завданням сучасної енергетики.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Останнє десятиріччя позначене стрімким зростанням розподіленої генерації на основі СФУ та її інтеграцією в мережі низької напруги, що формує нові виклики для забезпечення показників якості електроенергії – від відхилень напруги та флікера до гармонічних складових і несиметрії фаз [8, 10, 12, 19]. Узагальнюючі огляди підтверджують, що вплив СФУ на ПКЕ неоднозначний: з одного боку, можливі локальні підвищення напруги та інжекція вищих гармонік, з іншого – сучасні інвертори здатні частково фільтрувати гармоніки та підтримувати коефіцієнт потужності в допустимих межах [1, 3, 4, 7, 31].

Емпіричні й модельні дослідження для мереж, насичених СФУ, фіксують характерні ефекти: зміни профілю напруги, коливання у перехідних режимах, поява міжгармонік і взаємодія з нелінійними навантаженнями споживача (зварювальні апарати, перетворювальні пристрої) [2, 5, 6, 28–31]. Для коректної оцінки використовують стандартизовані методи вимірювань за ІЕС 61000-4-30 (класи А/S) та спеціалізовані засоби для оцінки флікера за

IEC 61000-4-15, тоді як граничні відхилення напруги та частоти регламентують EN 50160/ДСТУ EN 50160 та національні норми НПАЕУ 40.1-1.32; вимоги до гармонік – IEEE 519 і IEC 61000-2-2 [21–23, 25–27]. Сумарно ці документи формують рамку електромагнітної сумісності для паралельної роботи СФУ з мережею.

Міжнародні огляди та галузеві звіти (IEA, Global Solar Council) підкреслюють тренд до зростання частки rooftop-СФУ та мікроінверторних систем, що зміщує акцент досліджень із «середньостатистичного» впливу на вузол мережі до високочастотних локальних ефектів та перехідних процесів на клеммах споживача [8, 10]. В українському контексті питання інтеграції розподілених джерел розглядаються переважно на рівні політик та балансування дефіциту генерації; натомість емпіричних досліджень ПЯЕ у сільських мережах 0,4 кВ із малими СФУ поки бракує [9, 11, 14].

Нерозв'язаними лишаються: кількісна оцінка ефектів СФУ у вузлах із вираженою нерівномірністю навантаження та нелінійними приймачами; поведінка гібридних інверторів у тимчасово допустимих і аварійно-перехідних режимах (просідання напруги, квазі-КЗ), включно з динамікою $\cos\varphi$ та реактивної компенсації; зіставлення реальних вимірювань за IEC-процедурами з вимогами EN 50160/НПАЕУ/IEEE 519 у приватних господарствах [4; 5; 21–23; 25–27; 31]. Саме ці прогалини мотивують виконане в роботі експериментальне дослідження СФУ 5,5 кВт у сільській мережі 0,4 кВ із фіксацією ПЯЕ в нормальних, тимчасово допустимих та перехідних режимах і подальшим формуванням практичних рекомендацій для експлуатації.

3. Мета дослідження. Метою дослідження є оцінка впливу сонячної фотоелектричної установки потужністю 5,5 кВт на показники якості електричної енергії у системах електропостачання приватного споживача при паралельній роботі з мережею 0,4 кВ.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання приватного споживача із встановленою сонячною фотоелектричною установкою, що працює паралельно з розподільчою електричною мережею напругою 0,4 кВ.

5. Предмет дослідження – вплив сонячної фотоелектричної установки на показники якості електричної енергії в системі електропостачання приватного споживача.

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

– дослідити роботу сонячної фотоелектричної установки при паралельному підключенні до розподільчої мережі під час електропостачання сільськогосподарських споживачів;

– оцінити вплив мережевої СЕС на параметри якості електроенергії у сільськогосподарського споживача за нормальних, аварійних та тимчасово допустимих режимів роботи розподільчої електричної мережі;

– розглянути питання охорони праці при експлуатації СЕС;

– економічно обґрунтувати доцільність використання мережевої СЕС для підвищення якості та надійності електропостачання сільськогосподарських споживачів.

7. Методи дослідження. У роботі використано експериментальні, аналітичні та розрахунково-моделювальні методи, що базуються на реєстрації параметрів електроенергії за допомогою аналізатора якості Fluke 345 та аналізі даних інвертора DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU. Оброблення результатів здійснювалося з використанням методів спектрального аналізу (FFT), статистичної обробки та порівняння з нормативними вимогами ДСТУ EN 50160:2014 та ІЕС 61000-4-30:2015.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 74 сторінки машинописного тексту, містить 21 рисунок, 11 таблиць, 4 додатки та 38 найменувань джерел у списку літератури.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Сучасний стан розвитку систем розподіленої генерації в Україні та світі

Розподілена генерація на базі фотоелектричних установок сьогодні є одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики. Її поширення обумовлене необхідністю переходу до низьковуглецевої економіки, децентралізації енергопостачання та підвищення гнучкості електроенергетичних систем [8].

За даними International Energy Agency (IEA), у 2024 році загальна встановлена потужність сонячних фотоелектричних установок у світі перевищила 1,6 ТВт, що на 37 % більше порівняно з 2023 роком (рис. 1.1.) [8].

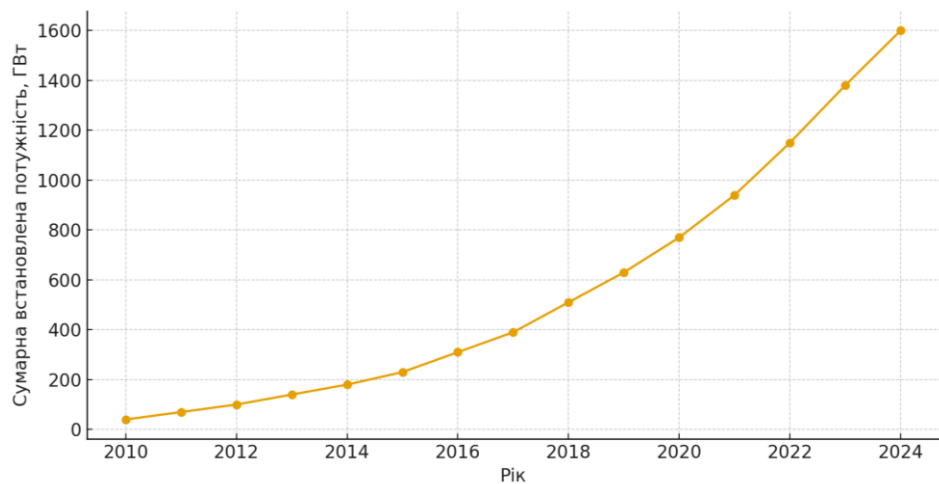


Рис. 1.1 – Динаміка зростання встановленої потужності фотоелектричних установок у світі (2010–2024 рр.)

Значна частка зростання припадає саме на об'єкти розподіленої генерації – приватні, комерційні та фермерські сонячні електростанції, які виробляють енергію для власних потреб або з продажем надлишків у мережу [9]. Згідно з аналітичним звітом Global Solar Council, частка розподілених ФЕУ

у світовому обсязі нових потужностей перевищила 45 % (рис. 1.2) і має тенденцію до подальшого зростання [10].

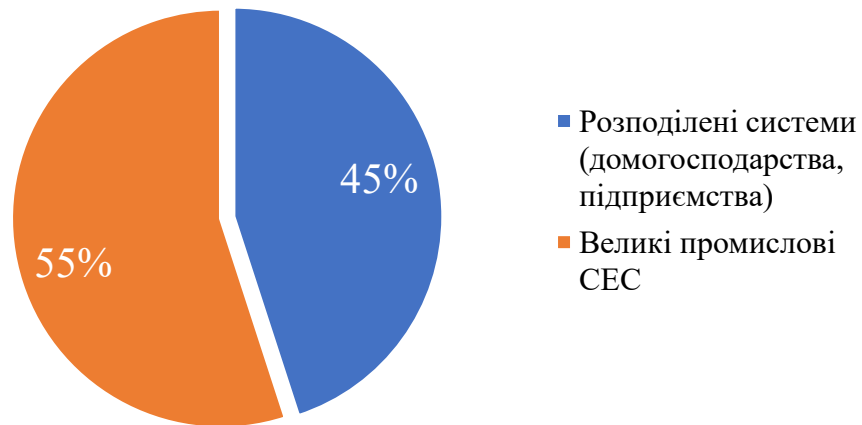


Рис. 1.2 – Частка розподіленої генерації у структурі введених сонячних потужностей у світі (2024 р.)

У країнах ЄС, США та Китаї діють державні програми стимулювання «prosumer»-генерації, які передбачають пільгові тарифи, податкові знижки або механізми нет-мітерингу. Такі заходи дозволяють зменшити навантаження на централізовану енергетику, покращити енергетичну безпеку та скоротити викиди CO₂ [11, 12].

В Україні розвиток розподіленої генерації також є одним із пріоритетних напрямів державної енергетичної політики. Міністерство енергетики України наголошує на необхідності створення умов для активного розвитку малих ФЕУ у приватному секторі та для сільськогосподарських підприємств [9]. За даними Interfax-Україна, протягом 2024 року встановлено близько 850 МВт нових потужностей розподіленої сонячної генерації (рис. 1.3), що становить понад 60 % від загального приросту ВДЕ за рік [9].

Разом із тим інтеграція таких об'єктів у розподільчі мережі супроводжується низкою технічних проблем: двонапрямним потоком енергії, зростанням рівнів напруги в денні години, появою гармонічних спотворень і нестабільністю частоти [8, 13]. Зокрема, дослідження [9] показує, що більшість

українських розподільчих мереж потребують модернізації для коректного підключення розподілених джерел енергії, особливо в сільській місцевості.

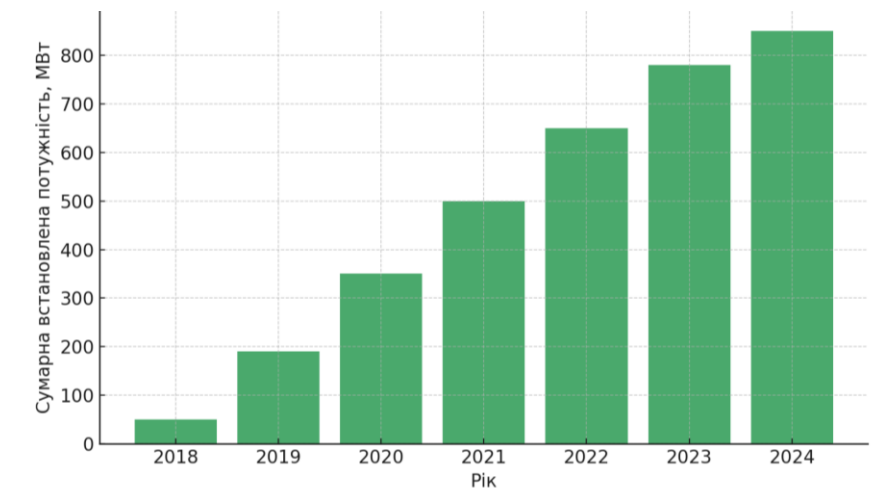


Рис. 1.3 – Розвиток розподіленої сонячної генерації в Україні (2018–2024 рр.)

На глобальному рівні ринок розподіленої генерації характеризується високими темпами зростання. За даними Precedence Research, обсяг ринку у 2024 році оцінювався у 337,4 млрд USD із прогнозом досягнення понад 1,17 трлн USD до 2034 року [12]. Це свідчить про те, що децентралізоване енергопостачання стає стратегічним напрямом розвитку енергетики у світі.

Таким чином, впровадження систем розподіленої генерації, особливо фотоелектричних установок малої потужності для сільськогосподарських споживачів, є не лише економічно доцільним, а й технічно важливим для підвищення стійкості, надійності та якості електропостачання [9, 14].

1.2. Типи фотоелектричних установок для електропостачання споживачів

Фотоелектричні системи (ФЕУ) для електропостачання споживачів за принципом взаємодії з електричною мережею поділяються на три основні типи: мережеві (on-grid), автономні (off-grid) та гібридні (hybrid). Кожен тип має свої особливості архітектури, алгоритмів керування, функцій

забезпечення якості електричної енергії, а також різний рівень енергетичної автономності [15–17].

Мережеві (on-grid) системи (рис. 1.4) – це найбільш поширений тип у промисловому, комерційному та аграрному секторах. Їх основна особливість полягає в тому, що вони працюють паралельно з розподільчою електричною мережею.

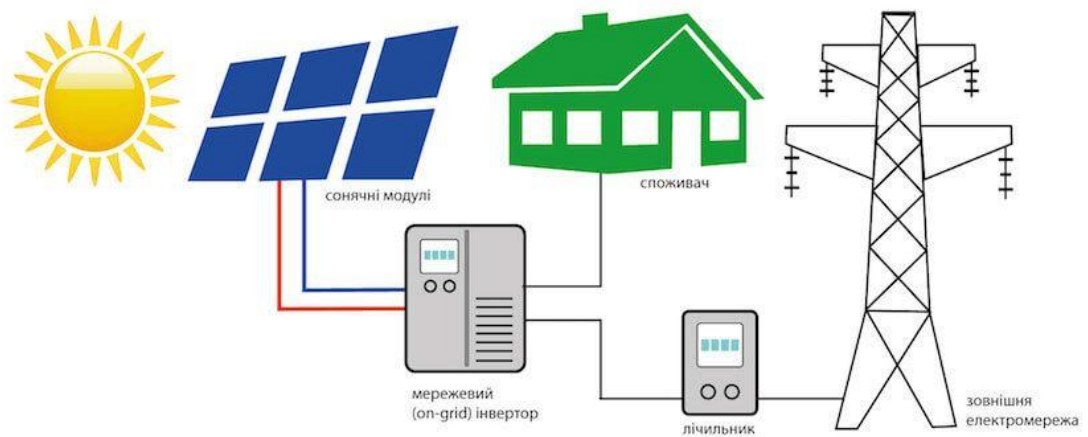


Рис. 1.4 – Принципова схема роботи мережевої (on-grid) фотоелектричної системи

Електрична енергія, яку виробляють фотомодулі, через інвертор перетворюється у змінний струм з параметрами, узгодженими з мережею (220/380 В, 50 Гц). За наявності сонячного випромінювання електроенергія спочатку споживається власними навантаженнями, а надлишок передається до мережі. При нестачі генерації (уночі, при хмарності) споживач отримує енергію з мережі.

Такі системи зазвичай не мають накопичувачів енергії, тому є повністю залежними від стану мережі: якщо живлення з боку оператора припиняється, то інвертор автоматично вимикається (антиострівна функція). Головні переваги – простота, відносно низькі капітальні витрати, швидке встановлення, висока ефективність перетворення. Недоліки – відсутність автономності, необхідність високої якості напруги у точці підключення, а

також потенційні проблеми з напругою і гармонічними спотвореннями при високій долі ФЕУ в локальній мережі [18, 19].

Для сільськогосподарських підприємств такі системи є оптимальними при наявності стабільного мережевого підключення, адже дозволяють зменшити витрати на електроенергію вдень, коли активне споживання збігається з піком генерації. Водночас вони потребують ретельного контролю параметрів якості електроенергії, оскільки в аграрному секторі часто використовується чутливе обладнання – насоси, компресори, холодильні установки тощо [16].

Автономні (off-grid) фотоелектричні системи (рис. 1.5) застосовуються в умовах, коли приєднання до централізованої електромережі є неможливим або економічно недоцільним. Такі системи функціонують повністю незалежно від зовнішнього джерела живлення, забезпечуючи енергопостачання із власного виробництва сонячної енергії. Типова структура автономної системи включає: фотомодулі, контролер заряду, акумуляторну батарею, інвертор, а також систему розподілу навантажень [15, 18].

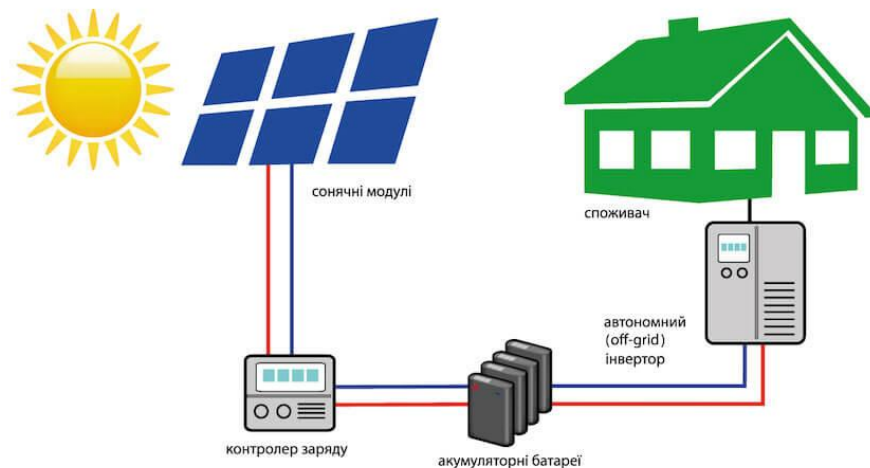


Рис. 1.5 – Принципова схема роботи автономної (off-grid) фотоелектричної системи

Фотомодулі виробляють електричну енергію у вигляді постійного струму (DC), яка через контролер заряду подається до акумуляторної батареї.

Контролер виконує функцію регулювання напруги та струму, запобігаючи перезаряду чи глибокому розряду батарей. Інвертор перетворює постійну напругу на змінну (АС) із параметрами 220/380 В, 50 Гц, необхідними для живлення побутових або промислових споживачів.

Основною перевагою автономних систем є повна енергетична незалежність, що особливо важливо для віддалених фермерських господарств, насосних станцій, теплиць або мобільних установок. Недоліками є висока вартість (через використання акумуляторів значної ємності), обмежений ресурс батарей (3–10 років) і потреба у постійному моніторингу енергетичного балансу. Також ефективність автономних систем залежить від правильного балансування між генерацією, накопиченням і споживанням енергії [17].

Гібридні (hybrid) фотоелектричні системи (рис. 1.6) є найгнучкішим рішенням серед сучасних сонячних електростанцій, оскільки поєднують переваги мережових і автономних систем. Вони здатні працювати як паралельно з електричною мережею, так і в режимі автономного живлення споживача під час аварій або планових відключень. Основними елементами гібридної системи є фотомодулі, гібридний інвертор, акумуляторна батарея та система керування енергопотокami [16–20].

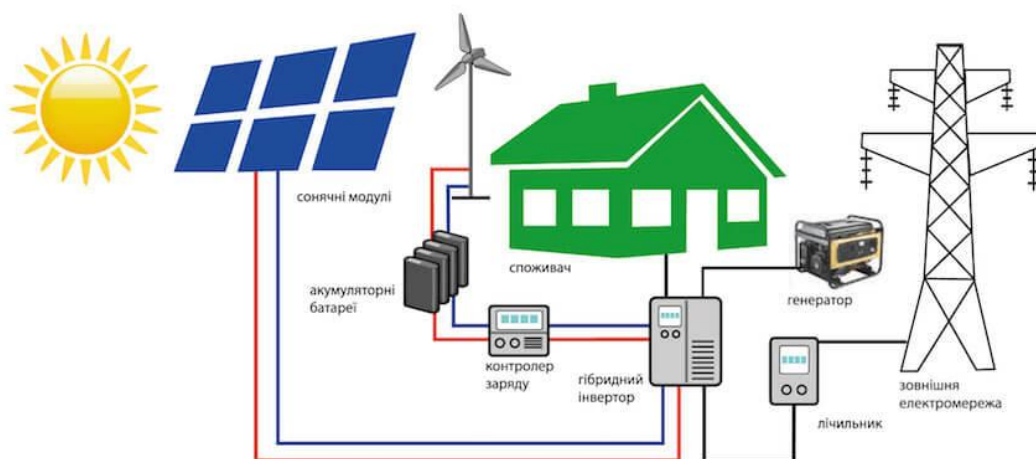


Рис. 1.6 – Принципова схема роботи гібридної (hybrid) фотоелектричної системи

Принцип роботи гібридної системи полягає в тому, що фотомодулі виробляють електричну енергію, яка використовується для живлення навантаження. Якщо виробіток перевищує поточне споживання, надлишкова енергія спрямовується на заряд акумулятора або, за наявності підключення, передається в мережу. У разі зниження генерації або відключення мережі інвертор автоматично перемикає живлення споживача на акумулятор або резервне джерело (дизель-генератор). Таким чином, система підтримує безперервність електропостачання та стабільність напруги, забезпечуючи баланс між генерацією, накопиченням і споживанням [18, 20].

Гібридні системи особливо ефективні для сільськогосподарських підприємств, які мають циклічне або сезонне навантаження – наприклад, роботу холодильних камер, поливних систем чи ферм із вентиляцією. У денний час сонячна енергія живить активне обладнання, а ввечері надлишки з батареї покривають потреби базового навантаження. Це дозволяє зменшити пікове навантаження на мережу, покращити показники якості електроенергії та уникнути втрат через перебої живлення.

Серед технічних переваг гібридних систем – висока надійність, стабільність напруги у точці споживання, можливість корекції коефіцієнта потужності, зниження гармонічних спотворень завдяки активним функціям інверторів. Недоліками є більша вартість порівняно з мережевими або автономними системами, складніша система керування, а також потреба у регулярному моніторингу стану батарей і налаштувань енергетичних потоків [17, 19].

1.3. Аналіз нормативних документів щодо забезпечення якості електричної енергії

Якість електричної енергії є одним із ключових критеріїв надійності систем електропостачання, оскільки від неї залежать працездатність електрообладнання, втрати енергії та безпечність експлуатації мереж. У

контексті розвитку фотоелектричних установок забезпечення належних параметрів якості набуває особливого значення через специфіку перетворювальних пристроїв, які можуть генерувати гармонічні спотворення, флікери або змінювати коефіцієнт потужності. Тому оцінювання та нормування показників якості електроенергії регламентується низкою міжнародних і національних стандартів, кодексів і технічних вимог [21–23].

Базовим міжнародним документом, що визначає допустимі межі параметрів якості напруги, є IEC 61000-2-2:2018 «Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems». Він задає гранично допустимі рівні гармонік напруги до 25-ї гармоніки, коефіцієнт сумарних спотворень THD $\leq 8 \%$ та обмеження несиметрії між фазами $\leq 2 \%$ [21].

Важливим також є стандарт IEC 61000-4-30:2015 «Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods», який визначає методологію вимірювань показників якості, включаючи короткочасну та тривалу дозу флікера (P_{st} і Plt), частоту, відхилення напруги, перерви живлення й гармоніки [22]. Для мережевих фотоелектричних інверторів застосовується документ IEC 62116:2014 «Test procedure of islanding prevention measures for utility-interactive photovoltaic inverters», що встановлює вимоги до anti-islanding-захисту та стабільності параметрів при переході між режимами роботи.

На європейському рівні чинним є стандарт EN 50160:2014 «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems», який гармонізований в Україні як ДСТУ EN 50160:2014 [23]. Цей документ визначає такі допустимі межі параметрів у мережах низької напруги:

- середнє відхилення напруги – $\pm 10 \%$ від номінального значення (230/400 В);
- частота – 50 Гц $\pm 1 \%$;
- несиметрія фаз – до 2 %;
- коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень THD – не більше 8 %;

- тривалість короткочасних перерв – до 1 с;
- кількість довготривалих перерв – не більше 10 на рік.

Додатково, вимоги до якості електричної енергії у виробників електроенергії з відновлювальних джерел визначені Кодексом систем розподілу України (НКРЕКП, постанова № 310 від 14.03.2018 р.), який передбачає дотримання параметрів якості електроенергії у точці приєднання відповідно до ДСТУ EN 50160, а також наявність системи автоматичного відключення при перевищенні допустимих рівнів напруги, частоти чи фазової несиметрії [24].

Крім того, для оцінки впливу нелінійних споживачів і перетворювачів застосовується міжнародний стандарт IEEE 519-2022 «Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», який задає граничні рівні гармонік для струмів ($\text{THD} \leq 5\%$) та напруг ($\text{THD} \leq 8\%$) у мережах до 69 кВ [25]. Саме цей документ часто використовується при проєктуванні систем з мережевими інверторами, щоб забезпечити сумісність генерації з вимогами енергопостачальних організацій.

Для контролю якості та технічних умов підключення ФЕУ в Україні також діють НПАЕУ 40.1-1.32:2018 «Норми допустимих відхилень параметрів якості електричної енергії в електричних мережах загального призначення», що деталізує вимоги ДСТУ EN 50160 для різних рівнів напруги та видів навантажень [26]. Документ визначає не лише граничні значення параметрів, а й порядок вимірювання, тривалість моніторингу, формати звітності, що особливо актуально для дослідження реальних систем електропостачання із сонячною генерацією.

Аналіз нормативних документів показує, що система стандартів ІЕС, EN, IEEE та ДСТУ формує комплексну нормативну базу для контролю якості електричної енергії у мережах з фотоелектричними установками. Вона встановлює межі допустимих відхилень основних показників – напруги, частоти, симетрії, гармонічних складових і флікера – та методи їхнього вимірювання. Дотримання цих вимог у системах електропостачання

сільськогосподарських споживачів із ФЕУ забезпечує стабільність режимів роботи, продовжує термін служби обладнання та запобігає перевантаженням розподільчих мереж.

1.4. Показники якості електричної енергії в системах з фотоелектричними установками

Якість електричної енергії характеризує ступінь відповідності її параметрів вимогам стандартів та умовам нормальної роботи електроустановок споживачів. Основними нормованими показниками якості є: відхилення напруги, частота, симетрія напруги по фазах, коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), флікер (flicker), коефіцієнт потужності та перерви електропостачання [21–23].

У системах електропостачання, що містять фотоелектричні установки, ці параметри можуть змінюватися через особливості роботи напівпровідникових інверторів і варіації сонячного випромінювання. Інвертор є основним джерелом нелінійності, оскільки він формує змінну напругу шляхом широтно-імпульсної модуляції, створюючи гармоніки в спектрі струму і напруги [3, 5].

Відхилення напруги. Відхилення напруги визначаються як різниця між фактичним і номінальним значенням. У відповідності до ДСТУ EN 50160:2014, у більшості 10-хвилинних інтервалів напруга в мережі низької напруги повинна залишатись у межах $\pm 10\%$ номінального значення (230/400 В). У системах з ФЕУ під час пікової генерації можливе підвищення напруги у точці приєднання до $+6 \dots +8\%$, що призводить до відключення інверторів при досягненні порогу 253 В [24]. У нічні години, навпаки, може спостерігатись зниження напруги через падіння напруги в лініях при високому навантаженні.

Частота мережі. Параметр частоти в системах із ФЕУ зазвичай стабільний, оскільки задається мережею, але у випадку масового відключення або переходу системи в режим «острова» можливі короточасні коливання

частоти до $\pm 0,5$ Гц. Згідно ДСТУ EN 50160:2014, частота повинна залишатись у межах 50 Гц ± 1 % у нормальних умовах [23]. В автономних чи гібридних системах частота формується інвертором, тому її стабільність визначається точністю внутрішнього генератора і алгоритмів керування [25].

Несиметрія напруги. Несиметрія трифазної системи напруг визначається відношенням негативної послідовної складової напруги до прямої. Для мереж низької напруги допустиме значення несиметрії не перевищує 2 % [23]. У системах із великою кількістю однофазних ФЕУ несиметрія може зростати до 3–4 %, особливо коли інвертори підключені нерівномірно до фаз [26]. Це зумовлює додаткові втрати в трансформаторах та двигунах, а також появу пульсацій моменту у трифазних механізмах (насосах, вентиляторах тощо).

Гармонічні спотворення. Гармонічні спотворення напруги та струму є одним із найважливіших показників КЕЕ у системах із ФЕУ. Відповідно до стандарту IEEE 519-2022, для мереж до 69 кВ сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги ($\text{THD}_{(U)}$) не повинен перевищувати 8 %, а струму ($\text{THD}_{(I)}$) – 5 % [25]. У системах із сучасними інверторами на базі ШІМ спотворення переважно зосереджені у діапазоні 2–25-ї гармоніки. Дослідження [3, 5] показують, що при правильному фільтруванні вихідних ланцюгів $\text{THD}_{(U)}$ може бути знижений до рівня 2–3 %, проте у разі неякісного монтажу або зношення фільтрів можливе перевищення нормативу.

Наявність гармонік впливає на додаткові втрати потужності в трансформаторах, нагрівання кабелів, помилкове спрацювання електронного обладнання, підвищення рівня електромагнітних завад. У сільськогосподарських електромережах ці явища особливо небезпечні для систем автоматичного керування та контрольованих пристроїв.

Флікер (мерехтіння). Флікер (Flicker) характеризує суб'єктивне сприйняття змін яскравості освітлення, що викликане коливаннями напруги. Згідно з ІЕС 61000-4-15 та EN 50160, короткочасний флікер (P_{st}) не повинен перевищувати 1,0, а тривалий (P_{lt}) – 0,8 [21, 23]. У системах із ФЕУ причиною

флікера є швидкі коливання сонячного випромінювання (через хмари) і нестабільність інверторів при перехідних процесах. При перевищенні допустимих значень можуть спостерігатись мерехтіння ламп і збільшення навантаження на перетворювачі.

Коефіцієнт потужності. Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) відображає співвідношення активної і повної потужності. Для мереж низької напруги він має бути не нижче 0,9 [23]. У системах із ФЕУ цей параметр може знижуватись через реактивну складову, створювану інверторами, особливо у разі великої кількості однофазних генераторів. Сучасні інвертори підтримують функцію компенсації реактивної потужності, що дозволяє підтримувати $\cos \varphi \approx 1,0 \pm 0,05$ [6].

Перерви електропостачання. Фотоелектричні системи, підключені до мережі, не повинні знижувати рівень надійності живлення споживачів. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, кількість короткочасних перерв не має перевищувати 10 на рік, а тривалість однієї – до 1 с [23]. Для гібридних систем із накопиченням енергії ці показники можуть бути покращені завдяки миттєвому переходу на живлення від батарей.

Таким чином, системи з фотоелектричними установками, особливо при паралельній роботі з мережею, мають істотний вплив на показники якості електроенергії. Впровадження ефективних алгоритмів керування інверторами, систем фільтрації гармонік, компенсації реактивної потужності та активного моніторингу параметрів напруги є необхідною умовою забезпечення нормативного рівня ЯЕЕ у мережах із високою часткою сонячної генерації.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку розподіленої генерації в Україні та світі, визначено місце сонячних фотоелектричних установок (СФУ) у системах електропостачання сільськогосподарських споживачів. Встановлено, що впровадження мережевих СФУ сприяє

підвищенню ефективності енергопостачання, зменшенню втрат потужності, стабілізації напруги та покращенню показників якості електроенергії у локальних мережах.

Розглянуто технічні особливості різних типів фотоелектричних систем – мережевих, автономних та гібридних – і показано, що саме мережеві СФУ є найбільш придатними для інтеграції в системи електропостачання аграрного сектору. Їх використання дозволяє зменшити перевантаження трансформаторів, компенсувати реактивну потужність і знизити коливання напруги в години максимального навантаження.

Проведено аналіз нормативної бази (ІЕС 61000, ІЕЕЕ 519, EN 50160, ДСТУ EN 50160, НПАЕУ 40.1-1.32), що регламентує межі показників якості електроенергії. З'ясовано, що дотримання цих вимог під час проектування і експлуатації СФУ забезпечує відповідність параметрів напруги, частоти, гармонічних складових і несиметрії фаз нормативним значенням.

Виходячи з одержаних результатів аналізу наукових джерел, нормативної документації та сучасних тенденцій розвитку систем електропостачання споживачів із використанням сонячних фотоелектричних установок, сформовано такі задачі дослідження:

- дослідити роботу сонячної фотоелектричної установки при паралельному підключенні до розподільчої мережі під час електропостачання сільськогосподарських споживачів;

- оцінити вплив мережевої СФУ на параметри якості електроенергії у сільськогосподарського споживача за нормальних, аварійних та тимчасово допустимих режимів роботи розподільчої електричної мережі;

- розглянути питання охорони праці при експлуатації СФУ;

- економічно обґрунтувати доцільність використання мережевої СФУ для підвищення якості та надійності електропостачання сільськогосподарських споживачів.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ

2.1. Місце розташування експериментальної СЕС

Експериментальна сонячна фотоелектрична установка розташована в с. Діброва Роменського району Сумської області ($50^{\circ}56'16''$ пн. ш., $33^{\circ}24'17''$ сх. д.). Місцевість належить до східного регіону Лісостепу України з помірно континентальним кліматом, характеризується порівняно високою сонячною радіацією та тривалим фотоперіодом у літній період.

За даними супутникової кліматичної бази NASA POWER (2025) та порталу Global Solar Atlas v2.7 (розробка Світового банку спільно з IRENA), для вказаних координат середньорічна глобальна сонячна радіація на горизонтальну поверхню становить приблизно $1240 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$, а середньорічна кількість ефективних сонячних годин – $1900\text{--}2000$ год. Загальна тривалість денного світла у регіоні досягає приблизно 4350 год на рік [36, 37]. Такі умови відповідають середньому сонячному потенціалу північного сходу України та дозволяють забезпечувати річну генерацію електроенергії на рівні $1000\text{--}1100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ з 1 кВт встановленої потужності СФУ.

Найбільш ефективний період роботи сонячних установок у цьому регіоні триває з квітня до вересня, із піковими показниками генерації в травні–серпні, коли добова опроміненість сягає $5,0\text{--}5,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ і тривалість світлового дня перевищує 14 годин [38].

Дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки проводилися 7 липня 2025 року, що було обрано через рівномірну освітленість території її розташування та плавний характер зміни сонячного випромінювання протягом доби. У цей день спостерігалось стабільне зростання енергетичної освітленості у ранкові години, досягнення максимуму близько полудня та поступове зниження у вечірній період, що забезпечило відтворення типового

добового циклу генерації електроенергії фотоелектричною установкою за сталих погодних умов.

За метеорологічними показниками сервісу NASA POWER для дня 8 липня 2025 року максимальна енергетична освітленість (глобальна радіація на горизонтальну поверхню) становила приблизно 950 Вт/м^2 о 12:00, мінімальна – 0 Вт/м^2 у нічні години. Середня добова температура повітря становила $23 \text{ }^\circ\text{C}$, мінімальна – $16 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальна – $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2.1). Середня швидкість вітру на висоті 10 м була $3,5 \text{ м/с}$, що сприяє природному охолодженню фотомодулів та підвищенню їх ефективності в літній період [36].

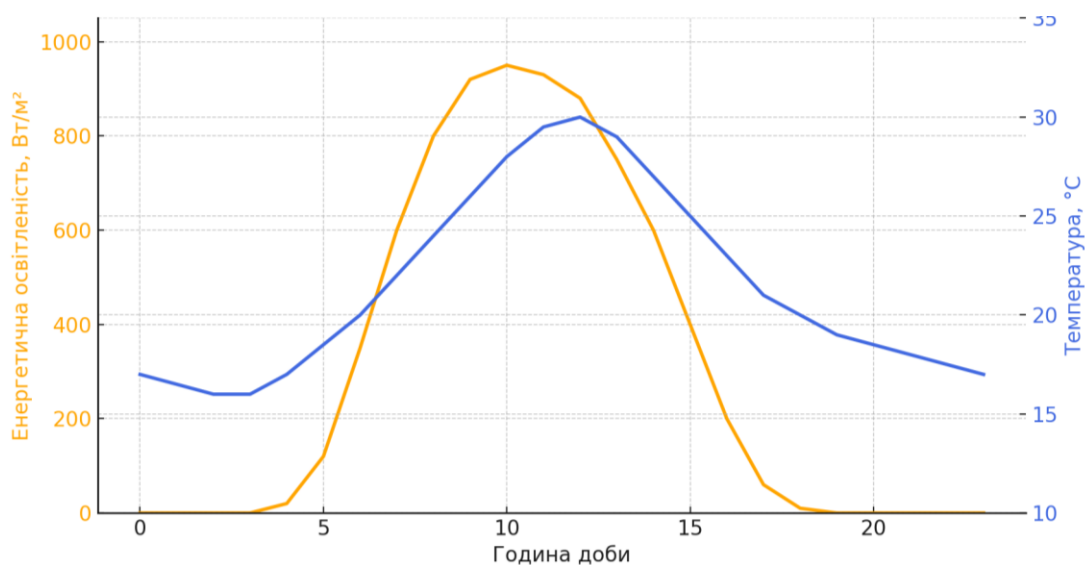


Рис. 2.1 – Динаміка зміни енергетичної освітленості та температури навколишнього середовища 8 липня 2025 року, с. Діброва, Роменський р-н, Сумська область ($50^\circ 56' 16''$ пн. ш., $33^\circ 24' 17''$ сх. д.)

Таким чином, територія села Діброва має сприятливі кліматичні та радіаційні умови для експлуатації сонячних установок малої потужності. Отримані дані підтверджують доцільність проведення експериментальних досліджень у реальних умовах з метою оцінки впливу мережевої СФУ на показники якості електроенергії в системі електропостачання сільськогосподарських споживачів.

2.2. Опис електричної схеми та основних елементів експериментальної СФУ

Експериментальна сонячна фотоелектрична установка змонтована з метою дослідження впливу мережевої генерації на показники якості електроенергії в системі електропостачання сільськогосподарських споживачів. Потужність СФУ становить 5,5 кВт.

Установка побудована на базі монокристалічних кремнієвих модулів JA Solar JAM54S31-405/MR (рис. 2.2) номінальною потужністю 405 Вт кожен, із загальною кількістю 14 шт. Сонячні панелі з'єднані у два стрінги по сім модулів, що формують два незалежні контури постійного струму, підключені до окремих MPPT-входів інвертора. Така конфігурація забезпечує робочу напругу стрінгу близько 260 В та напругу холостого ходу близько 300 В, що відповідає оптимальному діапазону роботи перетворювача.

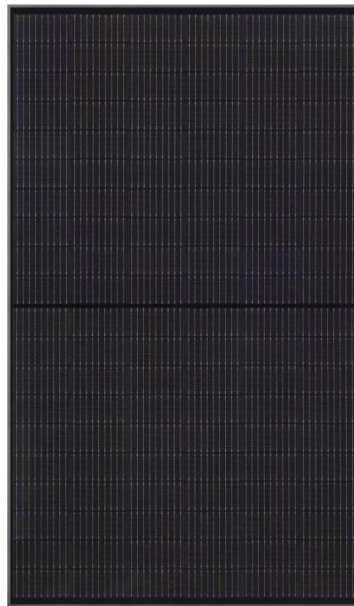


Рис. 2.2 – Монокристалічний кремнієвий модуль
JA Solar JAM54S31-405/MR

Технічні характеристики фотомодуля наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики сонячного модуля JA Solar JAM54S31-405/MR

Параметр	Значення
Тип модуля	Монокристалічний PERC (half-cell, 11BB)
Номинальна потужність (Pmax)	405 Вт
Ефективність модуля	20,7 %
Кількість фотоелементів	108 (2 × 54 половинних)
Напруга холостого ходу (Voc)	37,23 В
Струм короткого замикання (Isc)	13,87 А
Напруга в точці максимальної потужності (Vmpp)	31,21 В
Струм у точці максимальної потужності (Impp)	12,98 А
Максимальна системна напруга	1000 В DC (варіант до 1500 В)
Температурний коефіцієнт потужності (γP_{max})	-0,35 % / °C
Температурний коефіцієнт напруги (γV_{oc})	-0,28 % / °C
Температурний коефіцієнт струму (γI_{sc})	+0,05 % / °C
Номинальна робоча температура елемента (NOCT)	45 ± 2 °C
Робочий діапазон температур	-40 ... +85 °C
Механічне навантаження	5400 Па (сніг) / 2400 Па (вітер)
Габаритні розміри (Д × Ш × Т)	1722 × 1134 × 30 мм
Вага	21,5 кг
Тип з'єднувача	MC4 або сумісний
Скло	3,2 мм загартоване низькозалістисте
Рамка	Алюмінієвий анодований профіль
Клас захисту	IP68
Гарантія на продукт / на потужність	12 / 25 років

Основним елементом системи є мережевий гібридний інвертор DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU (рис. 2.3), розрахований на однофазне підключення до мережі 230 В. Пристрій має два незалежних MPPT-трекери, коефіцієнт

корисної дії понад 97,6 % і забезпечує регулювання коефіцієнта потужності та функції компенсації реактивної енергії.

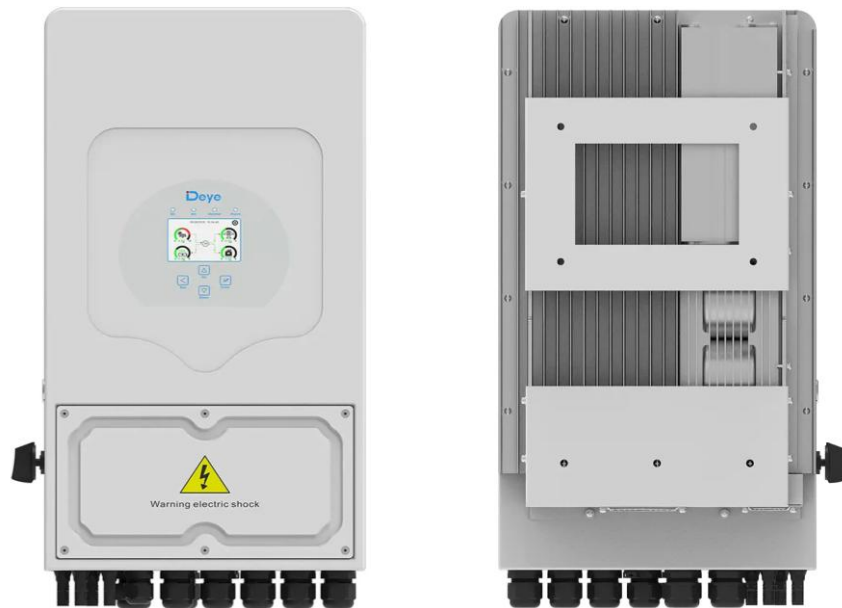


Рис. 2.3. - Мережевий гібридний інвертор DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU

Технічні характеристики інвертора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики інвертора DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU

Параметр	Значення
Тип інвертора	Гібридний мережевий (1-фазний, 2 MPPT)
Номінальна потужність змінного струму (AC)	6 кВт
Максимальна вхідна потужність постійного струму (DC)	7,8 кВт
Кількість MPPT-трекерів / входів	2 / 2
Максимальна вхідна напруга DC	500 В
Робочий діапазон напруги MPPT	150 – 425 В
Номінальна вхідна напруга	360 В
Максимальний струм MPPT	13 А × 2
Максимальний короткочасний струм DC	18 А × 2
Діапазон напруги виходу (AC)	220–240 В (однофазна мережа 50 Гц)

Номинальний вихідний струм	26,1 А
Максимальний коефіцієнт корисної дії	97,6 %
Європейський ККД (EU efficiency)	97,2 %
Споживання у режимі очікування	< 2 Вт
Допустимий $\cos \varphi$	від 0,8 (індуктивний) до 0,8 (ємнісний)
Функції захисту	антиострівна, перевантаження, перегрів, перенапруга, зворотна полярність
Інтерфейси зв'язку	Wi-Fi / RS485 / CAN / USB
Клас захисту корпусу	IP65
Діапазон робочих температур	-25 ... +60 °C
Вага	20 кг
Габаритні розміри (В × Ш × Г)	458 × 425 × 193 мм
Охолодження	Природне (конвекційне)
Рівень шуму	< 25 дБ
Гарантія	5 років (з можливістю розширення до 10 р.)

Інвертор підтримує функцію anti-islanding, що унеможливорює зворотну подачу енергії в разі відсутності напруги з боку мережі, а також дозволяє обмежувати експорт надлишкової потужності згідно з технічними умовами оператора системи розподілу.

На постійному боці кола встановлено комутаційно-захисне обладнання, яке включає ізолятори, плавкі запобіжники та пристрої захисту від імпульсних перенапруг типу 2 на напругу до 100 В серії E.NEXT e.pro.spd.2DC.1000, 2P, DC. На змінному боці використовується автоматичний вимикач ABB SH202-S32 на 32 А, пристрій захисту від перенапруг типу 2 на 500 В серії E.NEXT e.pro.spd.2DC.500, а також двонапрямний лічильник електроенергії для обліку виробітку та споживання Teletec MTX 1G10.DH.2L2-DOG4.

Вихід інвертора підключено до головного розподільчого щита 0,4 кВ через автоматичний вимикач і пристрій захисного відключення типу А/В.

Заземлення виконано через контур із питомим опором не більше 4 Ом, який з'єднаний із шинами РЕ та N у розподільчому щиті.

На рисунку 2.2 наведено однолінійну електричну схему експериментальної сонячної установки потужністю 5,5 кВт.

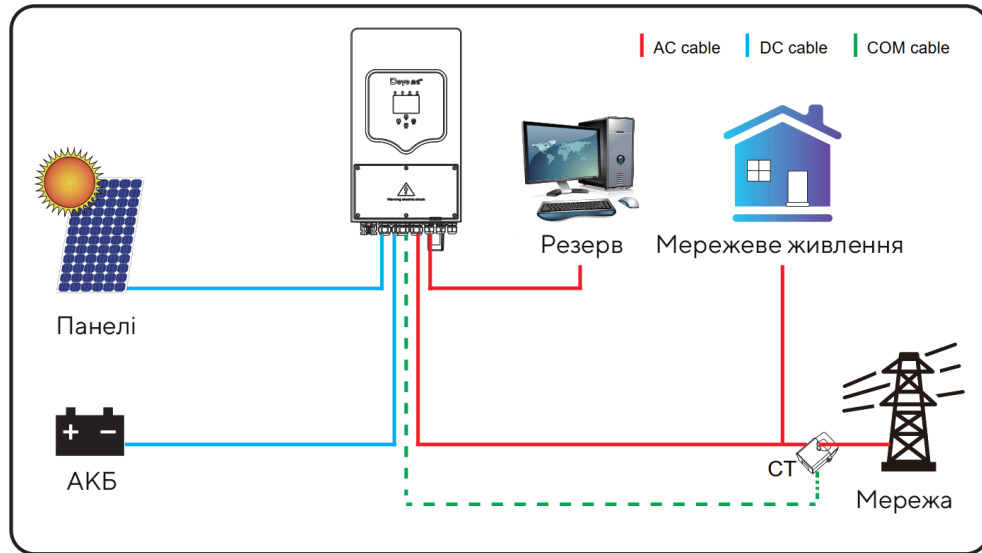


Рис. 2.4 – Однолінійна схема експериментальної СЕС

Схема містить два стрінги фотомодулів, два контури постійного струму з елементами комутації та захисту, інвертор із двома МРРТ-входами, систему змінного струму із захисними пристроями, двонапрямний лічильник та підключення до головного розподільчого щита споживача. Така конфігурація відповідає технічним вимогам ІЕС 60364-7-712:2017 та чинним нормам проектування електроустановок, забезпечує безпечну експлуатацію, надійний захист від перенапруг і стабільну роботу СФУ у складі локальної мережі.

2.3. Аналіз експериментальних даних роботи сонячної фотоелектричної установки

Встановлена потужність досліджуваної СЕС становить 5,5 кВт. Середньодобове виробництво електроенергії протягом року становить

7,8 кВт·год, максимальне значення генерації за добу спостерігалось в липні та становило 17,5 кВт·год.

Для оцінки ефективності функціонування мережевої сонячної фотоелектричної установки (СФУ) проведено аналіз реальних добових показників виробітку електроенергії за липень 2025 року. Дані знято безпосередньо з інвертора DEYE SUN-6K-G03, встановленого на об'єкті в с. Діброва Роменського району Сумської області. Встановлена потужність СФУ становить 5,5 кВт, система працює в паралелі з мережею 0,4 кВ, забезпечуючи електропостачання сільськогосподарських споживачів. За результатами аналізу експериментальних даних роботи сонячної фотоелектричної установки 8 липня 2025 р. побудовано графік добової зміни потужності (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Виробіток електроенергії СЕС протягом одного дня (08.07.2025 р.)

Аналіз добових даних підтверджує стабільну роботу СФУ без суттєвих відхилень або відключень. Крива добової генерації має симетричну форму з плавним зростанням потужності у ранкові години (з 04:30) і спадом після 18:30, що свідчить про правильну орієнтацію панелей і оптимальний кут

нахилу. Максимальна потужність у середині дня досягала 2,2–2,3 кВт, що відповідає близько 37–38 % номінальної потужності установки з урахуванням втрат на інверторі, кабельних лініях і при нагріванні фотоелементів.

Аналіз місячних даних також свідчить, що близько 60 % усієї виробленої енергії припадає на період з 10:00 до 15:00, що визначає оптимальний інтервал добового навантаження споживача при паралельній роботі з мережею. Це забезпечує стабілізацію напруги на шинах 0,4 кВ і зменшення струмового навантаження трансформатора під час денних піків енергоспоживання.

Результати вироблення електроенергії протягом липня 2025 року наведено на рисунку 2.6.

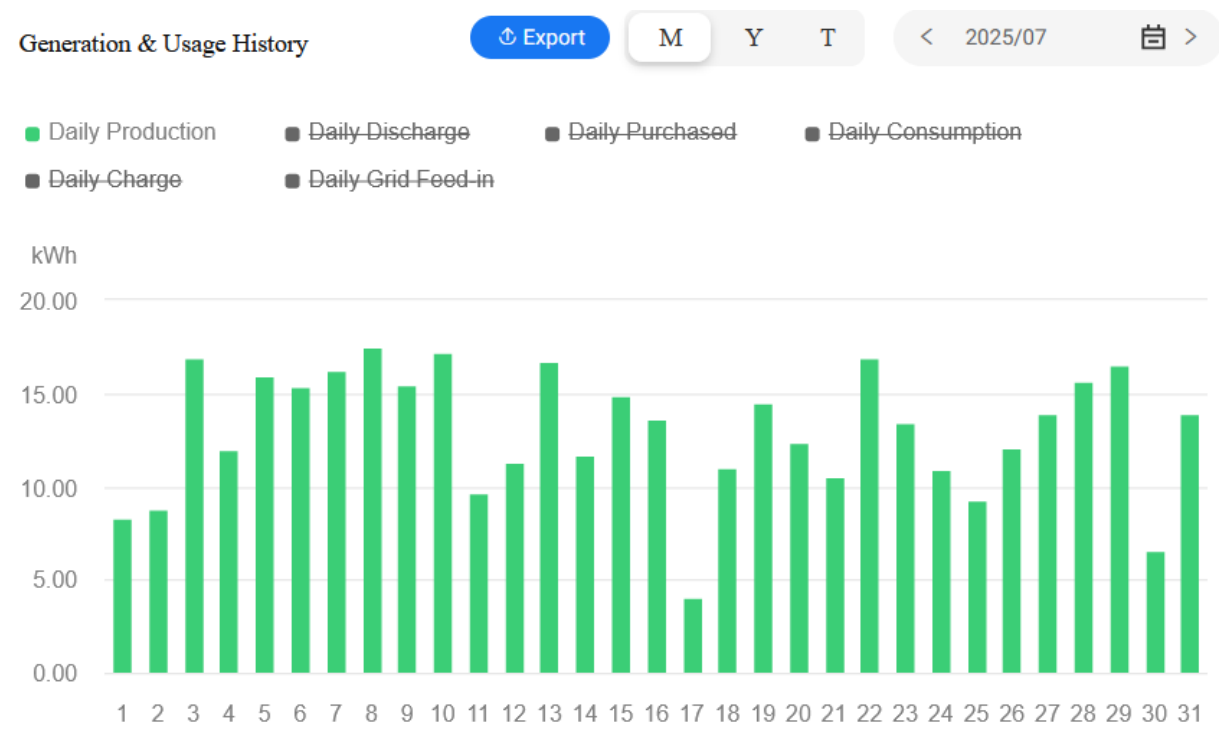


Рис. 2.6 – Щоденний виробіток електроенергії СЕС у липні 2025 року

За результатами аналізу рис. 2.6. встановлено, що загальний виробіток електроенергії за липень становив 404 кВт·год. Середньодобове значення генерації – 13,0 кВт·год, при максимальному виробітку 17,5 кВт·год (08.07.2025) та мінімальному – 4,1 кВт·год (17.07.2025). Такі коливання

пояснюються варіацією погодних умов, зокрема періодичними опадами й хмарністю середини місяця.

Для сонячної установки потужністю 5,5 кВт питомий показник виробітку за місяць становить близьк 67,3 кВт·год/кВт, що відповідає коефіцієнту використання встановленої потужності (CF) $\approx 22,6\%$. Це значення є типовим для літніх місяців у кліматичних умовах Сумської області, де середня денна тривалість сонячного саява у липні становить близько 8,5 год, а середня добова інсоляція – 5,4–5,6 кВт·год/м².

Отримані результати засвідчують, що навіть у реальних умовах експлуатації СФУ демонструє стабільний рівень генерації, а також позитивно впливає на якість електроенергії у споживача – зменшує просідання напруги в денний час і сприяє більш рівномірному навантаженню трансформатора в системі електропостачання.

2.4. Аналіз добового графіку навантаження споживача

Дослідження добового профілю навантаження проведено за реальними експериментальними даними вимірювань активної потужності споживача, який живиться від мережі 0,4 кВ у поєднанні з мережевою сонячною фотоелектричною установкою потужністю 5,5 кВт. Вимірювання здійснювались 8 липня 2025 року з інтервалом 5 хвилин (рис. 2.7).

Аналіз графіка рис. 2.7. показує, що у нічний період (з 00:00 до 04:00) споживання перебувало на рівні 0,2–0,3 кВт, що відповідає базовому навантаженню – освітлення, холодильні установки та незначне побутове обладнання.

Після 04:30 спостерігається різке зростання потужності до 1–1,2 кВт, що пов'язано з початком робочого процесу в господарстві (включення насосів, систем вентиляції або кормоприготування).

Найбільші пікові навантаження зафіксовано у проміжках 06:00–08:00 та 16:30–18:00, де миттєва споживана потужність досягала 2,6–3,7 кВт. Це

типовий режим для сільськогосподарських споживачів, у яких виробничі цикли синхронізуються з ранковими і вечірніми годинами роботи персоналу.

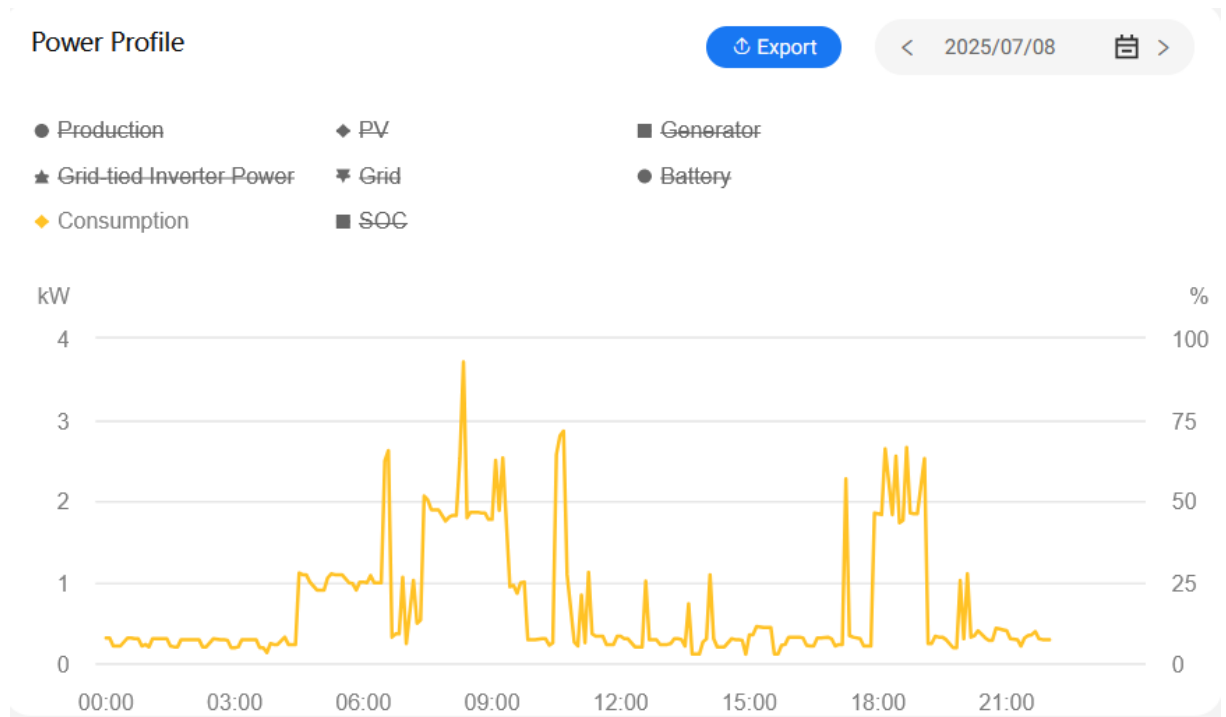


Рис. 2.7 – Добовий графік навантаження споживача (08.07.2025 р.)

У денний період (09:00–15:00) навантаження залишається стабільним у межах 0,2–0,5 кВт, оскільки частина споживаної енергії компенсується роботою фотоелектричної станції.

У вечірній період після 18:00 відбувається поступове зниження споживання до 0,3–0,4 кВт, а після 21:00 – повернення до базового рівня близько 0,2–0,3 кВт.

Сумарне споживання електроенергії за добу склало приблизно 25,4 кВт·год, при середній споживаній потужності 1,06 кВт.

Профіль навантаження має виражену двогорбу форму з ранковим і вечірнім піками, що є характерним для об'єктів аграрного типу з нерівномірною структурою споживання. У періоди максимальної генерації сонячної установки (10:00–14:00) спостерігається зменшення енергопотоків з мережі, що сприяє стабілізації напруги в системі живлення та зниженню втрат у лініях 0,4 кВ.

Отже, можна зробити висновок, що використання мережевої СФУ ефективно компенсує частину споживаної активної потужності саме в денні години, коли вироблення енергії сонячними модулями є максимальним, тим самим забезпечуючи покращення енергетичного балансу об'єкта та зниження навантаження на мережу.

2.5. Порівняльний аналіз виробітку СФУ та споживання електроенергії

Для оцінки енергетичної ефективності роботи мережевої сонячної фотоелектричної установки виконано порівняння добових обсягів споживання електроенергії об'єктом (рис. 2.8) і закупленої енергії з розподільчої мережі (рис. 2.9) протягом липня 2025 року.

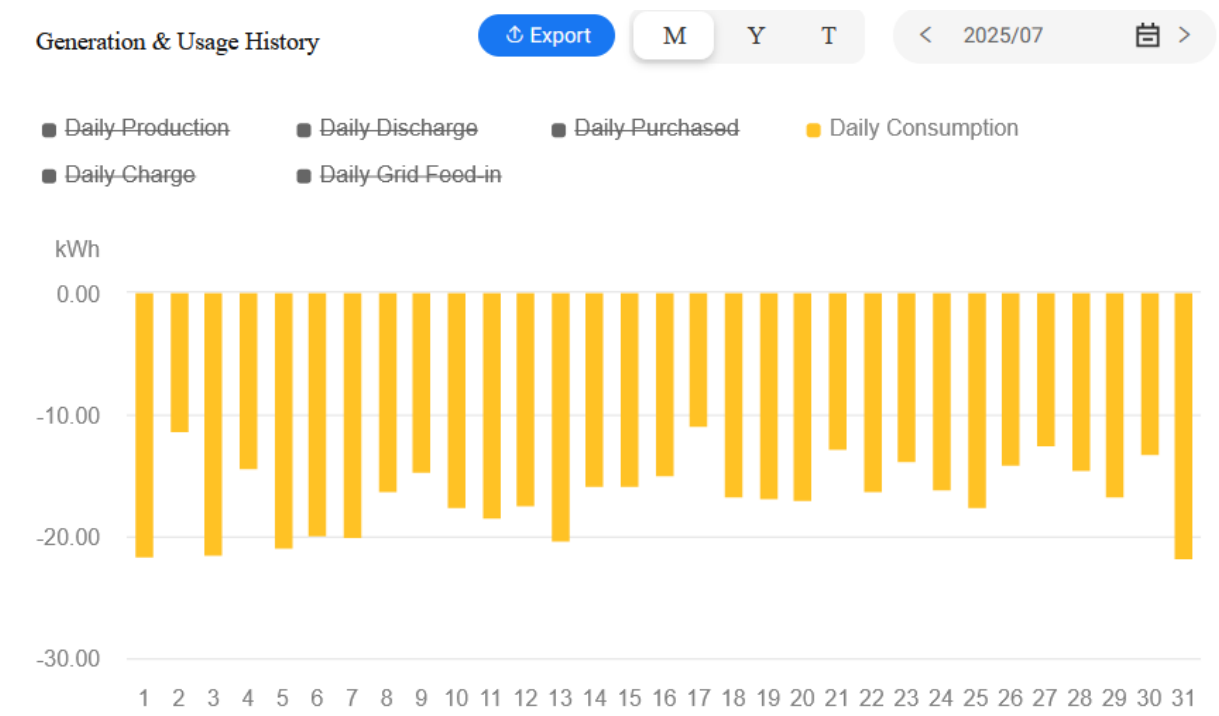


Рис. 2.8. Добові обсяги споживання електроенергії об'єктом (липень 2025 р.)

Загальне місячне споживання електроенергії становило 506 кВт·год, у тому числі 121 кВт·год закуплено з мережі. Отже, частка енергії, забезпеченої за рахунок власної генерації СФУ, становить близько 76 % від загального споживання.

Середньодобові показники:

- споживання – 16,3 кВт·год/добу;
- закуплена енергія з мережі – 3,9 кВт·год/добу;
- енергія, покрита СФУ – 12,4 кВт·год/добу.

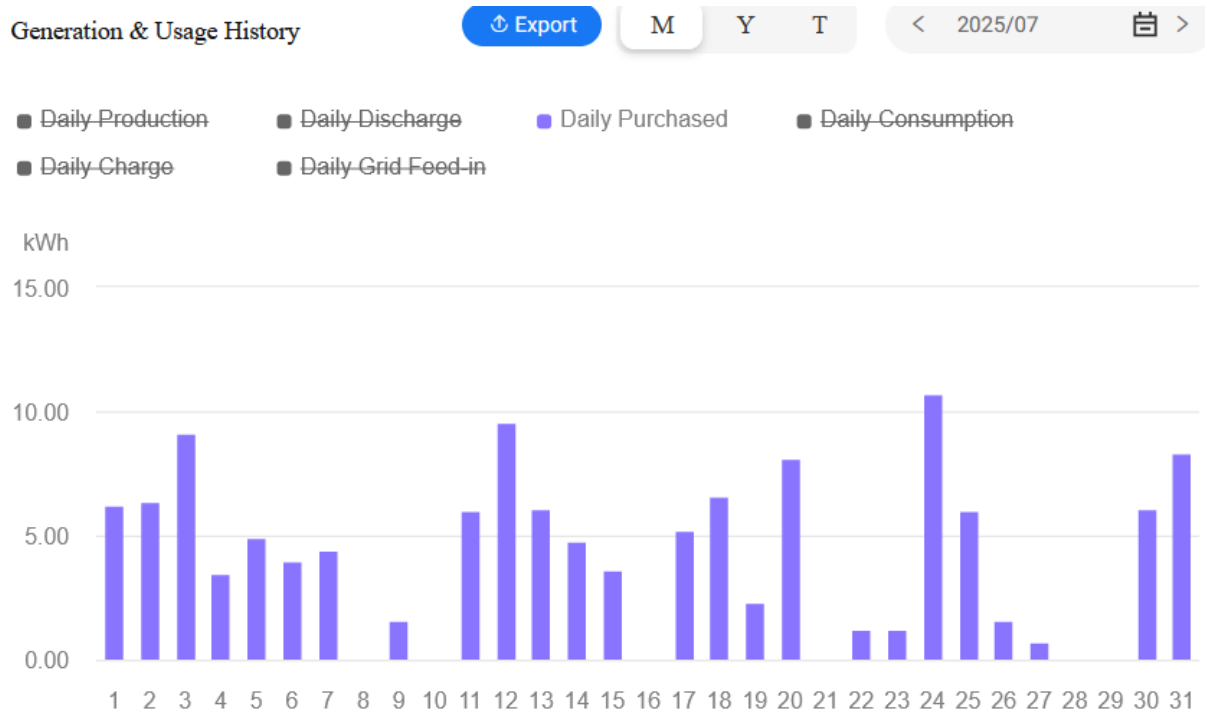


Рис. 2.9 – Обсяги закупленої енергії з розподільчої мережі (липень 2025 р.)

Найвищі показники енергетичної незалежності спостерігались 8, 10, 16, 28 і 29 липня, коли вся споживана енергія забезпечувалась повністю за рахунок СФУ (0 кВт·год закупленої з мережі) (рис. 2.9). Найнижчий рівень самозабезпечення зафіксовано 24 липня, коли закуплено 10,7 кВт·год, що становить понад 65 % від добового споживання – через знижену генерацію внаслідок хмарності.

Отже, середній коефіцієнт самозабезпечення (Self-Consumption Ratio, SCR) становить 0,76, а коефіцієнт покриття власних потреб (Self-Sufficiency Ratio, SSR) – близько 0,70, що свідчить про високий рівень використання виробленої СФУ електроенергії без втрат у мережу.

Порівняння з виробітком показує, що в періоди максимальної сонячної активності (з 10:00 до 15:00) СФУ повністю покриває споживання, а надлишки

енергії короткочасно експортуються в мережу, стабілізуючи напругу в системі 0,4 кВ.

Таким чином, використання СФУ потужністю 5,5 кВт дозволяє зменшити щомісячні витрати на закупівлю електроенергії влітку на 70–75 %, а також покращити показники якості електроенергії (зменшення перепадів напруги, струмових перевантажень та реактивних втрат).

2.6. Висновки до розділу 2

У результаті експериментальних досліджень мережевої сонячної фотоелектричної установки (СФУ) потужністю 5,5 кВт, змонтованої в с. Діброва (Сумська обл.), встановлено таке. Схема СФУ, виконана на монокристалічних модулях JA Solar JAM54S31-405/MR та інверторі DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU з двома MPPT-входами, відповідає вимогам безпечної паралельної роботи з мережею 0,4 кВ і забезпечує коректну компенсацію активної потужності у денні години.

Добовий профіль генерації 08.07.2025 має типовий симетричний характер: плавний вихід на робочу потужність від світанку, плато в полуденні години та спад увечері; максимальна миттєва потужність сягає 2,2–2,3 кВт (з урахуванням реальних експлуатаційних втрат). За підсумками липня 2025 року сумарний виробіток становить 404 кВт·год, середньодобове значення – 13,0 кВт·год, мінімальне/максимальне – 4,1/17,5 кВт·год відповідно, що підтверджує сталість роботи СФУ за різних погодних умов.

Місячне споживання електроенергії об'єктом у липні – 506 кВт·год, з яких 121 кВт·год закуплено з мережі; отже, 76 % потреб покрито власною генерацією СФУ, а середній добовий енергетичний баланс становить 12,4 кВт·год/добу, що заміщується сонячною енергією.

Найвищі рівні енергетичної незалежності зафіксовано 8, 10, 16, 28 і 29 липня (закупівля з мережі – 0 кВт·год); найнижчий – 24 липня у зв'язку з несприятливою погодою. Профілі «генерація– навантаження» свідчать, що

60 % і більше місячного виробітку припадає на інтервал 10:00–15:00, коли СФУ переважно повністю покриває поточне навантаження; це зменшує відбір потужності з мережі, знижує струмове навантаження ліній 0,4 кВ і сприяє стабілізації напруги у шинах споживача. Сукупно в літній період застосування СФУ дає змогу зменшити закупівлю електроенергії на 70–75 %, не погіршуючи показників якості електроенергії в точці приєднання.

На підставі проведених експериментів і аналізу отриманих даних у подальших розділах роботи доцільно: деталізувати вплив СФУ на показники якості електроенергії (відхилення та коливання напруги, флікер, гармоніки THD) у нормальних, аварійних і тимчасово допустимих режимах мережі; сформулювати рекомендації з налаштування інвертора ($\cos \varphi$, обмеження експорту, захисти від перенапруг/частоти) для забезпечення нормативних показників якості; провести техніко-економічну оцінку із врахуванням зниження витрат на закупівлю електроенергії та можливого впровадження систем накопичення для підвищення коефіцієнтів самоспоживання і самозабезпечення.

3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Режими роботи електричної мережі

Під час експлуатації електричних мереж можуть реалізовуватися різні стани їх функціонування, які відрізняються рівнем відхилення електричних величин від установлених норм. До нормального режиму належать умови, за яких параметри якості електроенергії перебувають у межах нормативів, а відхилення напруги, частоти, несинусоїдальності та несиметрії не перевищують довготривало допустимих значень.

Тимчасово допустимий режим – це ситуація, коли окремі показники виходять за робочі межі, але на обмежений інтервал часу, що не спричиняє неприпустимих наслідків для мережі та підключених приймачів. Типові приклади – короткочасні перевантаження силових трансформаторів, епізодичні відхилення напруги чи частоти, помітна нерівномірність навантаження по фазах, а також вплив нелінійних споживачів, які підвищують рівень гармонічних складових. Такі умови можуть виникати як окремо, так і одночасно, сумуючи свій вплив.

Аварійний режим характеризується небезпечними для елементів системи процесами – надструмами, неприпустимими перенапругами або іншими порушеннями, що, як правило, мають перехідний, неусталений характер. До найпоширеніших причин належать різні види коротких замикань (однофазні, двофазні, трифазні, замикання на землю), обриви провідників, а також імпульсні перенапруги, зокрема грозові впливи на повітряні лінії чи підстанційне обладнання.

Після ліквідації первинної події мережа переходить у післяаварійний режим. У ньому протікають як перехідні процеси (наприклад, одночасний самозапуск значної кількості електродвигунів), так і новий усталений стан за

змінених умов живлення, часто з обмеженнями за пропускнуою здатністю або резервом потужності.

Усі перелічені режими впливають на показники якості електроенергії та на умови паралельної роботи фотоелектричних установок з централізованою мережею: від рівня напруги й частоти до флікера та гармонічних спотворень. Коректне прогнозування можливих відхилень, вибір параметрів захистів і налаштувань інверторів є необхідними для забезпечення надійності, ресурсу та стабільності СФУ.

З метою кількісної оцінки впливу зазначених режимів на роботу сонячної фотоелектричної установки, що працює паралельно з мережею, у подальших підрозділах подано результати випробувань на змонтованому об'єкті.

3.2. Показники якості електроенергії за нормальних режимів роботи централізованої мережі

Під час дослідження режимів роботи мережевої сонячної фотоелектричної установки виникла необхідність оцінити її вплив на якість електроенергії у сільського споживача.

До складу схеми, окрім самої фотоелектричної установки, було включено аналізатор якості електроенергії Fluke 345, підключений на шинах інвертора. Він використовувався для фіксації показників якості електроенергії під час роботи СФУ у нормальних умовах централізованої мережі. Додатково до схеми підключався зварювальний апарат для створення навмисних спотворень та аналізу поведінки системи в умовах відхилень від нормального режиму.

Оскільки стабільність параметрів енергії, що генерується СФУ, безпосередньо залежить від характеристик мережі, до якої вона приєднана, виникла потреба визначити допустимі межі відхилення показників якості електроенергії, за яких забезпечується ефективна робота сонячної установки. Ці межі були встановлені на основі вимірних даних та відповідних положень нормативних документів (ДСТУ EN 50160:2014, IEC 61000-3-2).

У таблиці 3.1 наведено фрагмент експериментальних даних, отриманих від інвертора під час нормальної роботи мережі.

Таблиця 3.1 – Параметри якості електроенергії на виході інвертора

Час	Напруга на виході інвертора, В	Частота, Гц
12:00	234,7	49,97
12:30	228,9	49,96
13:00	235,5	50,02
13:30	236,6	49,97
14:00	231,7	49,98
14:30	230,8	49,98

Для підвищення достовірності результатів проведено також незалежні вимірювання якості електроенергії на виході інвертора за допомогою приладу Fluke 345. Трансформатор струму (струмові кліщі) приладу підключався до фазного провідника, а вимірювальні контакти напруги – паралельно між фазним і нульовим проводами.

Експеримент складався з кількох етапів. На першому етапі реєструвалися зміни струму, напруги, активної, реактивної та повної потужності, а також рівень гармонічних спотворень напруги й струму під час паралельної роботи фотоелектричної установки з мережею. У межах цього дослідження було розглянуто два основні режими функціонування:

- робота СФУ з передачею енергії виключно споживачу;
- робота СФУ з одночасною подачею енергії як споживачу, так і в розподільчу мережу.

Отримані результати дозволили оцінити вплив фотоелектричної генерації на основні показники якості електроенергії – напругу, частоту, коефіцієнт потужності та гармонічні спотворення, а також визначити допустимі межі відхилень для забезпечення стабільної роботи системи при паралельному підключенні до централізованої електромережі.

Розглянемо докладніше режими роботи сонячної фотоелектричної установки. Їх умовно можна класифікувати за напрямом потоку енергії. Якщо в певний момент потужність, що генерується СФУ, є меншою від потужності, необхідної для покриття споживання об'єкта (наприклад, у ранкові або вечірні години, коли освітленість панелей ще недостатня), то установка працює лише на внутрішнє навантаження споживача. Такий режим також виникає тоді, коли фактичне споживання перевищує максимальний рівень генерації СФУ.

Інший випадок – паралельна робота СФУ з мережею, коли потужність, вироблена фотоелектричною системою, перевищує поточне навантаження об'єкта. У цьому разі надлишкова енергія спрямовується не тільки на власні потреби споживача, а й частково експортується до розподільчої мережі.

На другому етапі експерименту були зафіксовані показники напруги та рівні гармонічних спотворень у точці приєднання споживача за умов відключеної СФУ, що дозволило визначити базовий стан якості електроенергії без впливу генератора.

Дослідження показників напруги та гармонічних спотворень. Аналіз експериментальних вимірювань показав, що під час роботи фотоелектричної установки відбувається помітна зміна параметрів якості електроенергії. Зокрема, спостерігається зменшення коливань напруги у години максимальної генерації та незначне підвищення рівня гармонічних складових у струмі, що пояснюється імпульсним характером роботи інвертора.

Для подальшої оцінки впливу СФУ проведено порівняльний аналіз напруги та гармонічних спотворень. На основі графіків, отриманих за допомогою приладу Fluke 345, які наведено в додатках А і Б, сформовано таблиці з основними параметрами якості електроенергії, що відображають зміни показників у нормальних і навантажених режимах роботи.

Таке порівняння дає змогу визначити, наскільки інтеграція СФУ у локальну електромережу впливає на стабільність напруги, симетрію фаз та рівень гармонічних спотворень, а також сформулювати висновки щодо

відповідності параметрів вимогам стандартів ДСТУ EN 50160:2014 і ІЕС 61000-3-2.

На підставі аналізу експериментальних графіків встановлено, що під час роботи сонячної електростанції відбувається помітне згладжування пікових коливань напруги у точці приєднання споживача. Це свідчить про позитивний вплив фотоелектричної генерації на стабільність параметрів електропостачання.

У таблиці 3.2 наведено діапазони зміни напруги в різних режимах функціонування системи – коли СФУ працює тільки на внутрішнє навантаження, одночасно на споживача і мережу, а також у разі її відключення.

Таблиця 3.2 – Відхилення напруги у споживача в різних режимах роботи сонячної фотоелектричної установки

Режим роботи	U_{\min} , В	U_{\max} , В	f_{\min} , Гц	f_{\max} , Гц
СЕС працює лише на споживача	214,9	234,3	49,9	50,0
СЕС працює на споживача та в мережу	216,6	235,4	49,9	50,0
СЕС відключена	212,1	240,3	49,9	50,0

Як видно з таблиці, при роботі сонячної установки напруга на шинах споживача стає більш стабільною, а амплітуда її коливань зменшується приблизно на 5–6 В у порівнянні з режимом без генерації. Частота мережі в усіх випадках залишається практично сталою, відхилення не перевищують 0,1 Гц, що відповідає вимогам стандарту ДСТУ EN 50160:2014.

Дані спектрального аналізу, наведені в таблиці 3.3, демонструють зменшення коефіцієнта гармонічних спотворень напруги ($THD_{(U)}$) на приблизно 1,6 % під час роботи СФУ. Це стосується як парних, так і непарних гармонік, що підтверджується графіками, які наведені в додатках В і Г.

Отримані результати свідчать, що підключення сонячної установки сприяє покращенню гармонічного складу напруги, особливо у діапазоні

нижчих порядків гармонік (2–5). Це пояснюється тим, що інвертор сучасного типу з активним фільтром компенсує частину нелінійних спотворень у точці спільного підключення.

Таблиця 3.3 – Гармонічні складові напруги у споживача

Показник	При працюючій СФУ (min–max)	При відключеній СФУ (min–max)
THD _(U)	0,1 % – 4,0 %	1,2 % – 4,5 %
2 гармоніка	0 % – 4 %	0 % – 1,6 %
3 гармоніка	0,5 % – 3 %	0 % – 4,4 %
4 гармоніка	0 % – 0,7 %	0 % – 0,8 %
5 гармоніка	1,4 % – 3,6 %	0,9 % – 2,9 %
6 гармоніка	0 % – 0,2 %	0 % – 0,5 %
7 гармоніка	0 % – 1,7 %	0 % – 1,5 %
8 гармоніка	0 % – 0,4 %	0 % – 0,4 %
9 гармоніка	0 % – 1,2 %	0 % – 0,9 %
10 гармоніка	0 % – 0 %	0 % – 0 %
11 гармоніка	0 % – 0,6 %	0 % – 0,5 %

Таким чином, робота СФУ зменшує рівень гармонічних коливань і стабілізує напругу у споживача, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики електрообладнання та знижує ризик перегріву мережевих елементів.

Крім результатів, отриманих під час вимірювань аналізатором якості електроенергії, було проведено додаткове дослідження форми напруги у споживача при різних режимах живлення – як лише від централізованої електромережі, так і від мережі спільно з сонячною фотоелектричною установкою.

Під час запису осцилограм напруги було використано крок дискретизації 5 мікросекунд, а тривалість одного періоду становила 20 мілісекунд, що дало

змогу детально відтворити зміну миттєвих значень сигналу протягом повного циклу синусоїди.

Для оцінки відмінностей між двома зареєстрованими сигналами проведено спектральний аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), реалізованого у середовищі Microsoft Excel. Цей метод дозволив визначити енергетичний розподіл гармонічних складових напруги та оцінити їхню частотну структуру.

Результати аналізу були отримані для одного періоду синусоїдального сигналу в діапазоні від 50 Гц (основна, перша гармоніка) до 1250 Гц (двадцять п'ята гармоніка). Побудована спектральна характеристика відображає амплітудний склад сигналу та дозволяє виявити вплив СФУ на гармонічний спектр напруги. Узагальнений результат цього дослідження подано на рисунку 3.1.

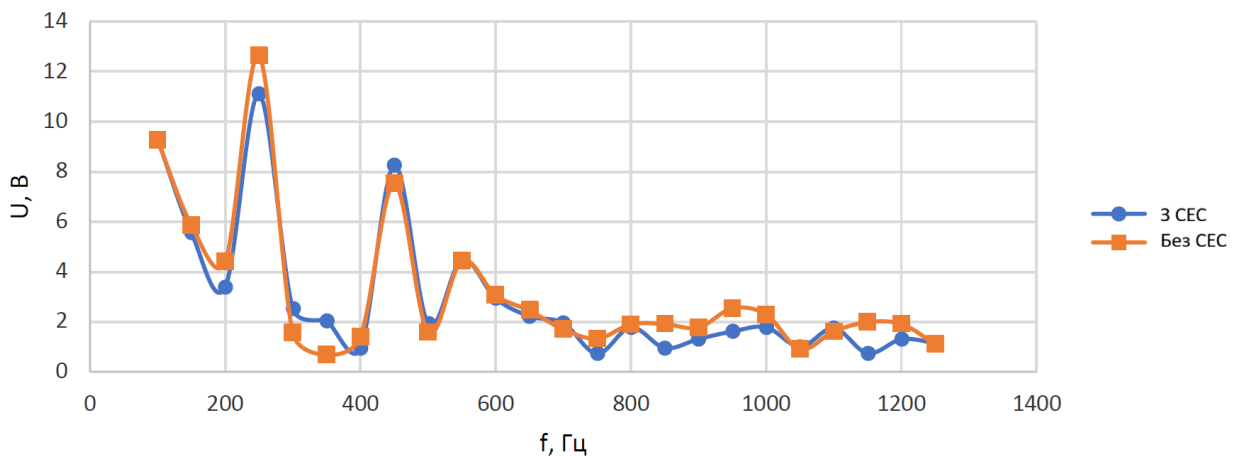


Рис. 3.1 – Результати спектрального аналізу напруги на клеммах споживача

Аналіз отриманих даних рис. 3.1. показує, що під час роботи сонячної фотоелектричної установки спостерігається зниження амплітуд гармонічних складових напруги у діапазоні 3–5, 12, 13, 15–20 та 23–24 гармонік, а також незначне зростання амплітуд для 6, 7 і 10 гармонік. Таке зменшення свідчить про більш чисту форму напруги у точці спільного приєднання споживача.

Загальний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги знизився приблизно на 1,5 %, що узгоджується з результатами, отриманими за допомогою аналізатора якості електроенергії. Це підтверджує позитивний вплив СФУ на параметри електропостачання, зокрема на зменшення рівня нелінійних спотворень у мережі.

Аналіз потужності на виході СЕС. Вимірювання активної, реактивної та повної потужності сонячної фотоелектричної установки (СФУ) проведено 8 липня 2025 року з інтервалом в одну годину у період із 08:00 до 17:00. Отримані результати наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри потужності на виході сонячної фотоелектричної установки (08.07.2025 р.)

Час	P, кВт	Q, кВАр	S, кВА	cosφ
08:00	0,96	0,10	0,97	0,987
09:00	1,46	0,15	1,47	0,993
10:00	1,82	0,19	1,83	0,995
11:00	2,10	0,22	2,12	0,992
12:00	2,22	0,25	2,23	0,987
13:00	2,21	0,24	2,22	0,995
14:00	2,04	0,23	2,06	0,990
15:00	1,71	0,18	1,73	0,987
16:00	1,33	0,14	1,34	0,992
17:00	0,82	0,09	0,83	0,986

З аналізу добових даних видно, що активна потужність плавно зростає від 0,9–1,0 кВт у ранкові години до максимальних значень 2,2 кВт у полудень (близько 12:00–13:00), після чого поступово знижується до 0,8 кВт у вечірній період. Така форма графіка відповідає типовому добовому профілю генерації сонячних установок при ясній погоді.

Реактивна потужність (Q) протягом дня залишається незначною – у межах 0,09–0,25 кВАр, що вказує на високий рівень узгодження інвертора з мережею. Значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ коливаються в межах 0,986–0,995, що свідчить про практично активний характер споживання та мінімальну фазову різницю між струмом і напругою.

Таким чином, у процесі роботи СТС спостерігається стабільна передача активної енергії до мережі без помітних реактивних складових. Це свідчить про ефективну роботу інвертора DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU, який забезпечує високий коефіцієнт корисної дії (>97 %) і стабільний коефіцієнт потужності при змінних рівнях сонячної радіації.

Результати підтверджують, що експериментальна сонячна фотоелектрична установка забезпечує якісну синусоїдальну форму струму, не створює суттєвих гармонічних спотворень і не впливає негативно на якість електроенергії в точці підключення, що відповідає вимогам стандартів ДСТУ EN 50160:2014 та IEC 61000-3-2:2019.

3.3. Аналіз показників якості електроенергії при тимчасово допустимих режимах роботи

Для оцінки впливу сонячної фотоелектричної установки на параметри якості електроенергії було проведено експериментальні дослідження її роботи за ненормальних режимів функціонування централізованої електричної мережі.

Такі умови імітувалися шляхом штучного створення динамічних навантажень із використанням зварювального трансформатора, який формує короткочасні перепади струму та напруги, що дозволяє змоделювати аварійні коливання у мережі.

Результати вимірювань напруги при працюючій та відключеній СЕС наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Відхилення напруги при ненормальних режимах роботи електричної мережі

Режим роботи	U_{\min} , В	U_{\max} , В	f_{\min} , Гц	f_{\max} , Гц
СЕС працює на споживача	191,3	234,5	49,9	50,0
СЕС відключена	158,7	225,4	49,9	50,1

З аналізу даних таблиці видно, що при працюючій СФУ амплітуда відхилень напруги у споживача значно менша – близько 33 В, навіть у момент роботи зварювального апарата. Це свідчить про стабілізувальний вплив фотоелектричної системи на напругу живлення.

Під час зниження напруги в централізованій мережі СЕС не вимикається, а продовжує виробляти електроенергію, підтримуючи споживача в межах допустимих значень параметрів якості.

Для подальшого аналізу було досліджено гармонічні спотворення напруги під час одночасної роботи сонячної установки та зварювального апарата, результати яких наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Гармонічні спотворення напруги у споживача

Показник	Станція працює (min–max)	Станція відключена (min–max)
THD_U	2,2 % – 3,4 %	2,7 % – 4,5 %
2 гармоніка	0 % – 7,2 %	0 % – 8,7 %
3 гармоніка	1 % – 5,9 %	1,1 % – 5,3 %
4 гармоніка	0 % – 1,4 %	0 % – 3,2 %
5 гармоніка	1,8 % – 4,4 %	2,3 % – 4,0 %
6 гармоніка	0 % – 2,1 %	0 % – 1,0 %
7 гармоніка	0,4 % – 1,4 %	0,5 % – 2,0 %
8 гармоніка	0 % – 0,9 %	0 % – 0,4 %
9 гармоніка	1 % – 1,4 %	0,5 % – 0,9 %
10 гармоніка	0 % – 0 %	0 % – 0 %
11 гармоніка	0 % – 0,4 %	0,4 % – 0,7 %

Проведений аналіз демонструє, що вмикання СЕС зменшує сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень THD_U приблизно на 0,8–1,1 % порівняно з роботою без неї. Найбільший позитивний ефект спостерігається для парних гармонік (2, 4, 6, 8), що свідчить про здатність інвертора компенсувати частину вищих гармонік, зокрема в умовах нелінійного навантаження.

Згідно з даними, наведеними у таблиці 3.6, під час одночасної роботи сонячної фотоелектричної установки та зварювального трансформатора спостерігається зменшення коефіцієнта гармонічних спотворень напруги приблизно на 1,6 %, що свідчить про покращення електромагнітної сумісності системи в умовах нестабільного навантаження.

Для оцінки енергетичних параметрів при таких умовах було зафіксовано зміни активної, реактивної та повної потужності на виході СЕС, результати яких наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Зміна потужності сонячної фотоелектричної установки при ненормальних режимах роботи мережі

Час	P, Вт	Q, ВАр	S, ВА	Cos φ
11:19:39	2136	154	2142	0,997
11:19:49	1346	440	1416	0,951
11:19:59	1650	495	1723	0,958
11:20:19	1434	488	1515	0,947
11:20:29	1758	97	1761	0,998

Отримані експериментальні дані (табл. 3.7) демонструють реакцію сонячної фотоелектричної установки потужністю 5,5 кВт на коливання напруги та струму в електричній мережі, що виникають під час роботи зварювального трансформатора.

При навантаженнях, що викликають миттєві перепади струму, активна потужність СЕС зменшується з 2136 Вт до 1346 Вт, а реактивна потужність

зростає з 154 ВАр до 495 ВАр. Це свідчить про появу реактивної складової внаслідок зміни фазного зсуву між струмом і напругою.

Одночасно спостерігається зниження коефіцієнта потужності $\cos\phi$ з 0,997 до 0,947, що є типовою реакцією інверторного обладнання на нелінійні навантаження. Після стабілізації режиму (11:20:29) $\cos\phi$ знову наближається до 1, що вказує на автоматичну компенсацію реактивної потужності інвертором DEYE і повернення системи до оптимального енергетичного балансу.

Загалом, сонячна електростанція виконує роль активного стабілізатора мережі:

- зменшує амплітуду коливань напруги при раптових змінах навантаження;
- частково компенсує реактивну потужність, покращуючи $\cos\phi$;
- підтримує подачу активної потужності навіть у режимах короткочасних просідань напруги.

Таким чином, для установки потужністю 5,5 кВт вплив ненормальних режимів мережі не призводить до її відключення, а лише короткочасно змінює співвідношення активної та реактивної складових потужності. Це підтверджує стабільну роботу інвертора та доцільність використання мережевих СЕС як елементів підвищення енергетичної стійкості локальних систем електропостачання.

3.4. Аналіз показників якості електроенергії при аварійних режимах мережі

Для дослідження показників якості електроенергії при аваріях було зімітовано аварійний режим роботи, наближений до однофазного короткого замикання.

Як режим, подібний до однофазного короткого замикання, можна розглядати ситуацію, коли електрод зварювального апарата випадково

прилипає до металевої поверхні, що зварюється. Такий процес супроводжується різким зростанням струму і миттєвим падінням напруги в електричній мережі.

Оцінювання впливу цього режиму на роботу сонячної фотоелектричної установки здійснювалось експериментальним шляхом, використовуючи ту ж установку, що і в попередніх дослідженнях. Результати експерименту відображено на рисунках 3.2 та 3.3.

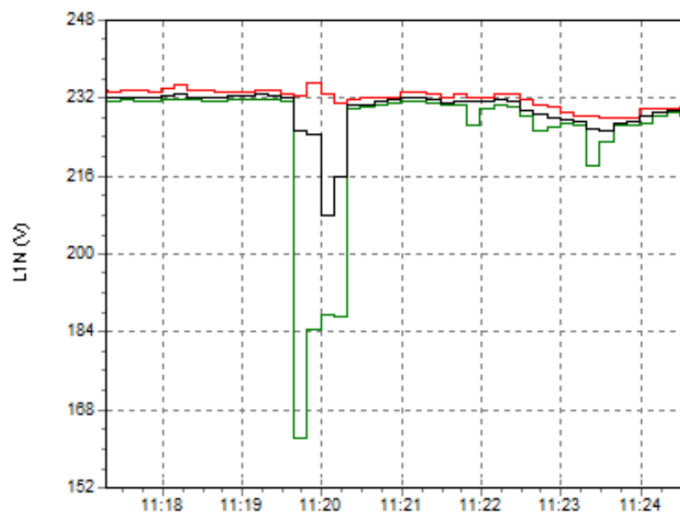


Рисунок 3.2 – Результати експерименту: напруга на шині інвертора

На рисунку 3.2 показано характер зміни напруги на виході інвертора під час виникнення короткого замикання. Під час моменту прилипання електрода до зварювальної поверхні спостерігається різке зниження вихідної напруги СФУ, що свідчить про короткочасне перевантаження інвертора. Після усунення контакту напруга швидко повертається до номінального рівня, що підтверджує ефективну роботу системи захисту та стабілізації напруги.

На графіку струму (рис. 3.3) помітно короткочасний перехідний процес, який виникає в момент прилипання електрода. У цей момент струм різко зростає, формуючи імпульсне перевантаження на стороні інвертора, після чого поступово стабілізується впродовж кількох мілісекунд.

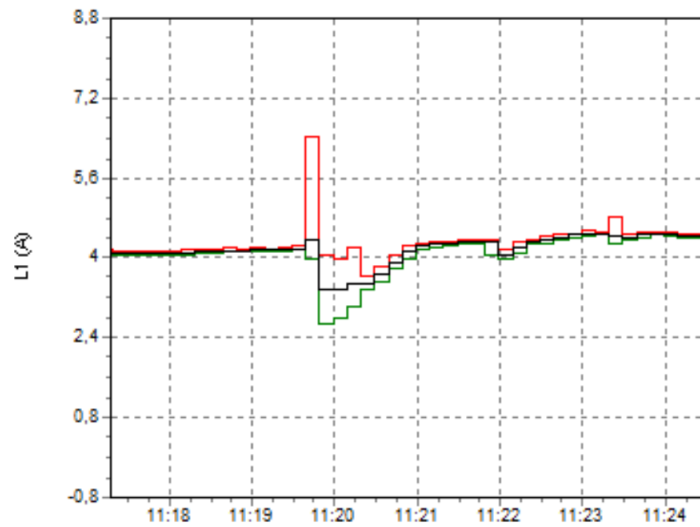


Рисунок 3.3 – Результати експерименту: струм на шинах інвертора

Такі коливання є типовими для переходу мережі в режим, наблизений до короткого замикання, однак сонячна установка зберігає працездатність, не відключається від мережі й автоматично відновлює параметри вихідної напруги після завершення процесу.

3.5. Висновки до розділу 3

У результаті проведених досліджень впливу мережевої сонячної фотоелектричної установки (СФУ) на показники якості електроенергії при різних режимах роботи електричної мережі встановлено таке:

1. При нормальних режимах роботи мережі СФУ забезпечує стабільну генерацію активної потужності, підтримуючи високі значення коефіцієнта потужності ($\cos\phi$ 0,98–0,995). Робота інвертора сприяє зменшенню гармонічних спотворень напруги на 1,5–1,6 %, що покращує якість електроенергії у точці приєднання споживача.

2. Робота СФУ позитивно впливає на стабільність напруги, знижуючи амплітуду її коливань на 5–6 В у порівнянні з режимом без генерації. Частота залишається в межах нормативних відхилень ДСТУ EN 50160:2014.

3. За умов тимчасово допустимих режимів (робота зварювального трансформатора) сонячна установка пом'якшує перепади напруги у мережі та

обмежує ріст гармонійних складових. Зменшення $\text{THD}_{(U)}$ становить у середньому 0,8–1,1 %, що підтверджує компенсувальну здатність інвертора.

4. При раптових змінах навантаження відзначено короткочасне зростання реактивної складової та зниження $\cos\varphi$, проте система автоматично відновлює параметри енергопостачання завдяки функціям динамічної компенсації реактивної потужності інвертора.

5. В аварійно-перехідних режимах, наближених до однофазного короткого замикання, СФУ зберігає працездатність. Падіння напруги та імпульсне збільшення струму носять короткочасний характер, після чого параметри інвертора оперативно повертаються до номінальних значень, не допускаючи апаратного відключення.

6. Результати підтверджують, що мережеві фотоелектричні установки підвищують енергетичну стійкість локальних мереж, забезпечують покращення якості електроенергії та не створюють негативних впливів на споживачів та мережеву інфраструктуру за умови коректного налаштування інвертора.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Організація охорони праці при роботі сонячною електростанцією

Організація охорони праці під час експлуатації сонячної фотоелектричної установки, розташованої у приватному домогосподарстві, спрямована на запобігання нещасним випадкам, ураженню електричним струмом, виникненню пожеж та пошкодженню обладнання. Безпечне обслуговування такої установки здійснюється відповідно до вимог нормативних документів, зокрема Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, ДСТУ EN 50110-1:2014, Правил улаштування електроустановок та інструкцій виробників обладнання.

Власник сонячної електростанції несе відповідальність за її технічний стан, правильність експлуатації та дотримання заходів електробезпеки. Усі операції, що пов'язані з підключенням, перевіркою, ремонтом чи налагодженням інвертора та електричних кіл, мають виконуватись тільки спеціалістами, які мають відповідну групу з електробезпеки не нижче III. Роботи, що стосуються обслуговування або огляду сонячних панелей, дозволяється проводити лише після повного відключення установки як з боку постійного, так і змінного струму з обов'язковою перевіркою відсутності напруги.

Під час експлуатації електростанції необхідно забезпечити заземлення усіх металевих частин конструкцій, рам фотоелектричних модулів та корпусу інвертора. Для захисту від грозових і комутаційних перенапруг у схемі передбачаються пристрої захисту від імпульсних перенапруг на стороні постійного та змінного струму. Роботи проводяться у світлу пору доби за сприятливих погодних умов, без дощу, ожеледиці або сильного вітру. Забороняється доторкатись до відкритих струмоведучих частин, виконувати з'єднання під напругою, використовувати металеві предмети для обслуговування та проводити очищення панелей у момент роботи установки.

У місці розміщення інвертора необхідно встановити попереджувальні таблички з написами «ОБЕРЕЖНО! НАПРУГА DC» та «НЕ ВМИКАТИ – ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ». Обладнання має бути встановлене у сухому, добре вентиляваному приміщенні, захищеному від прямого сонячного випромінювання та вологи. Для запобігання пожежам на території, де розміщене обладнання, повинен бути вогнегасник порошкового або вуглекислотного типу.

Під час роботи з фотоелектричними модулями потрібно використовувати засоби індивідуального захисту – діелектричні рукавиці та взуття, захисні окуляри, каску, а при виконанні робіт на даху – страхувальну систему або запобіжний пояс. Усі роботи повинні виконуватися обережно, без різких рухів, з урахуванням ризику падіння чи ковзання.

Для членів родини, які мають доступ до обладнання, рекомендується провести короткий інструктаж щодо правил безпечного користування сонячною установкою, порядку її ввімкнення та вимкнення, а також дій у разі виникнення аварійної ситуації або ураження електричним струмом. Дотримання вимог охорони праці та технічних норм забезпечує безпечну експлуатацію сонячної електростанції у приватному господарстві, підвищує надійність її роботи та мінімізує ризики для здоров'я людини і стану електрообладнання.

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації сонячної електростанції

Під час експлуатації сонячної фотоелектричної установки у приватному господарстві можуть виникати різні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з дією електричного струму, кліматичних умов, висоти, а також з механічними та термічними впливами. Для їх систематизації складено таблицю логічних небезпек (таблиця 4.1), у якій наведено основні фактори ризику, можливі наслідки та заходи захисту.

Таблиця 4.1 – Таблиця логічних небезпек при експлуатації СЕС

Небезпечний або шкідливий фактор	Ймовірна причина виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту та профілактики
Електричний струм постійного або змінного напрямку	Дотик до струмоведучих частин під напругою, порушення ізоляції кабелів, відсутність заземлення	Ураження електричним струмом, опіки, летальний випадок	Відключення установки перед обслуговуванням, перевірка відсутності напруги, використання діелектричних рукавиць, взуття та інструментів, наявність заземлення всіх металевих частин
Перенапруга та імпульсні розряди (грозові, комутаційні)	Влучання блискавки у панелі або лінії, імпульсні перенапруги при роботі мережі	Вихід з ладу інвертора, пошкодження панелей, займання	Установка пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (УЗІП), монтаж блискавкозахисту, регулярний контроль стану заземлення
Нагрів і пожежонебезпека	Перегрів з'єднань, поганий контакт, пошкодження ізоляції, коротке замикання	Займання кабелів або обладнання, пожежа	Використання сертифікованих матеріалів, перевірка контактів, забезпечення вентиляції інвертора, наявність вогнегасника (СО ₂ або порошкового), відсутність горючих матеріалів поблизу
Вплив ультрафіолетового випромінювання, температурних перепадів	Робота на відкритому повітрі, тривале перебування під сонцем	Перегрів організму, опіки шкіри, тепловий удар	Робота у ранкові години, використання головного убору, легкого одягу, питного режиму
Падіння з висоти при монтажі або очищенні панелей	Робота на даху без страхування, слизька поверхня, вітер	Травми, переломи, смертельний випадок	Використання страхувальної системи, запобіжного пояса, взуття з неслизькою підошвою, заборона робіт під час вітру чи опадів
Механічні ушкодження	Ненавмисне падіння інструментів, рухомі частини при монтажі	Травми рук і ніг, забої, порізи	Використання рукавиць, організація робочого місця, утримання інструментів у справному стані
Шум і вібрація при роботі інвертора	Несправність охолоджувальних вентиляторів або кріплень	Шумове навантаження, вібраційний вплив	Регулярний технічний огляд інвертора, очищення вентиляторів, надійне кріплення обладнання
Хімічні фактори (електроліт, пари, пил)	Пошкодження корпусу акумулятора (у гібридних системах), забруднення пилом	Подразнення дихальних шляхів, опіки шкіри, корозія контактів	Герметичність акумуляторів, провітрювання приміщень, використання засобів індивідуального захисту
Психофізіологічне перевантаження	Робота в екстремальних умовах, недотримання режиму праці	Втома, неухважність, підвищення ризику помилки	Раціональний розподіл робочого часу, дотримання відпочинку, проведення інструктажів

Таким чином, під час експлуатації сонячної фотоелектричної установки у приватному секторі основними небезпеками залишаються електричні ризики, робота на висоті та пожежонебезпека. Своєчасне технічне обслуговування, дотримання вимог безпеки, використання індивідуальних засобів захисту й належна організація робочого місця дозволяють мінімізувати вплив шкідливих і небезпечних факторів, забезпечуючи безпечну експлуатацію СЕС протягом усього строку її служби.

4.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з СЕС

Забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації сонячної фотоелектричної установки у приватному господарстві передбачає реалізацію комплексу організаційних, технічних і профілактичних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків ураження електричним струмом, травмування, пожеж і виходу з ладу обладнання.

Насамперед необхідно створити систему контролю технічного стану електроустановки. Регулярний огляд СЕС має проводитися не рідше одного разу на шість місяців із перевіркою цілісності кабельних з'єднань, контактів, заземлення, стану ізоляції та корпусів інвертора й панелей. Рекомендується вести журнал технічного обслуговування, де фіксуються всі проведені перевірки, зауваження та виконані ремонтні роботи.

Особлива увага приділяється дотриманню електробезпеки. Усі струмоведучі частини мають бути надійно ізольовані, а обладнання – заземлене. Роботи з обслуговування дозволяється виконувати лише після повного зняття напруги на стороні постійного та змінного струму. Перед початком робіт необхідно переконатися у відсутності залишкової напруги, використовуючи справний вимірювальний прилад.

Для запобігання ураженню електричним струмом при випадкових несправностях необхідно встановити пристрої захисного вимкнення (ПЗВ) та автоматичні вимикачі відповідного номіналу. Це забезпечить миттєве

відключення живлення у випадку перевантаження, короткого замикання або витоку струму. У разі виникнення перенапруги, спричиненої грозовими розрядами, систему захищають пристрої захисту від імпульсних перенапруг (УЗІП), встановлені на стороні постійного та змінного струму, а також на вході в будинок. Важливо забезпечити справність блискавкозахисту та регулярну перевірку опору заземлення.

Всі роботи на даху або підвищених поверхнях мають виконуватися у страхувальному спорядженні. Поверхня даху повинна бути сухою, неслизькою, а працівники – у взутті з протиковзкою підошвою. Забороняється виконувати монтажні чи очищувальні роботи під час опадів або сильного вітру.

Рекомендується проводити періодичні інструктажі для власника та членів родини, які мають доступ до елементів установки. У ході інструктажів необхідно ознайомлювати з правилами безпечної експлуатації, послідовністю дій у разі аварії, місцем розташування вимикачів, засобів пожежогасіння та основних елементів системи. Для запобігання займанням у приміщенні, де розташований інвертор, мають бути вогнегасники вуглекислотного або порошкового типу. Забороняється зберігати поруч із обладнанням легкозаймисті матеріали.

4.4. Висновки до розділу 4

Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, пов'язані з дією електричного струму, висотою, погодними умовами, механічними та термічними впливами, а також запропоновано заходи їх усунення або мінімізації. Обґрунтовано необхідність регулярного технічного контролю, заземлення, використання засобів індивідуального захисту, пристроїв захисного вимкнення та блискавкозахисту. Дотримання вимог безпеки й реалізація запропонованих рекомендацій забезпечують безаварійну роботу сонячної електростанції, збереження здоров'я людини та підвищення надійності системи електропостачання.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічна доцільність встановлення сонячної фотоелектричної установки потужністю 5,5 кВт у приватному господарстві визначається шляхом розрахунку річного виробітку електроенергії, капітальних витрат, економії коштів та строку окупності.

5.1. Визначення річного виробітку електроенергії

Річний виробіток СЕС обчислюється за формулою:

$$E_{річн} = P_{вст} \cdot k_{нит}, \quad (5.1)$$

де $E_{річн}$ – річний виробіток електроенергії, кВт·год;

$P_{вст}$ – встановлена потужність СЕС, кВт;

$k_{нит}$ – питомий виробіток електроенергії (для Сумської області – 1050 кВт·год/кВт).

$$E_{річн} = 5,5 \cdot 1050 = 5775 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

5.2. Визначення річної економії

Економія від роботи СЕС визначається залежно від частки самоспоживання:

$$S = E_{річн} \cdot K_{сам} \cdot C_{ел}, \quad (5.2)$$

де S – річна економія, грн;

$K_{сам}$ – частка самоспоживання (приймаємо 0,7);

$C_{ел}$ – ціна електроенергії з мережі (4,6 грн/кВт·год).

$$S = 5775 \cdot 0,7 \cdot 4,6 = 18596 \text{ грн / рік.}$$

5.3. Визначення капіталовкладень

Розрахунок капіталовкладень наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Капіталовкладення на встановлення СЕС

№	Стаття витрат	Орієнтовна вартість, грн
1	Сонячні панелі JA Solar 405 Вт (14 шт)	67000
2	Інвертор DEYE SUN-6K-SG04LP1-EU	48000
3	Монтажні конструкції, кабелі, автоматика, УЗІП	25000
4	Монтажні роботи, пусконаладження, документи	30000
	Загальні капіталовкладення	170000

5.4. Визначення експлуатаційних витрат

Річні витрати на обслуговування становлять близько 1 % від капіталовкладень:

$$C_{\text{обсл}} = 0,01 \cdot 170000 = 1700 \text{ грн / рік.}$$

5.5. Розрахунок строку окупності

Строк окупності визначається як:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{C_{\text{кап}}}{S}. \quad (5.3)$$

$$T_{\text{окуп}} = \frac{170000}{18596} = 9,1 \text{ років.}$$

5.6. Визначення собівартості виробленої електроенергії

Для 25-річного строку експлуатації з урахуванням деградації модулів (0,5 %/рік) сумарний виробіток становитиме близько:

$$E_{\text{житт}} = 5775 \cdot 23,5 = 135700 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Повні витрати за життєвий цикл:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{кап}} + (C_{\text{обсл}} \cdot 25) = 170000 + 42500 = 212500 \text{ грн} \quad (5.4)$$

$$C_{\text{заг}} = 170000 + 42500 = 212500 \text{ грн}$$

Тоді собівартість виробленої електроенергії:

$$LCOE = \frac{C_{\text{заг}}}{E_{\text{житт}}} = \frac{212500}{135700} = 1,57 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год.} \quad (5.5)$$

$$LCOE = \frac{212500}{135700} = 1,57 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год.}$$

5.7. Висновки до розділу 5

Встановлення сонячної фотоелектричної установки потужністю 5,5 кВт у приватному господарстві є технічно та економічно доцільним. Очікуваний річний виробіток становить близько 5,8 МВт·год, що забезпечує економію 18,6 тис. грн/рік при вартості електроенергії 4,6 грн/кВт·год. Орієнтовний строк окупності становить 9 років, після чого установка працює з чистим прибутком протягом ще понад 15 років. Собівартість виробленої електроенергії складає 1,6 грн/кВт·год, що у три рази нижче за тариф на мережеву електроенергію, що підтверджує ефективність і фінансову доцільність проєкту.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи «Оцінка впливу фотоелектричної установки на показники якості електроенергії при різних режимах роботи електричної мережі» отримано низку важливих науково-практичних результатів, які підтверджують ефективність використання сонячних фотоелектричних систем у приватному секторі та сільських громадах.

Проведений аналітичний огляд показав, що розвиток систем розподіленої генерації на основі відновлюваних джерел енергії є глобальним трендом сучасної енергетики. Умови України, зокрема Сумської області, характеризуються достатнім сонячним потенціалом для ефективного використання фотоелектричних установок у системах електропостачання побутових і фермерських господарств. Аналіз нормативної бази (ІЕС, ІЕЕЕ, EN, ДСТУ) підтвердив, що за правильного проектування та налаштування інверторів СЕС не лише відповідають вимогам до якості електроенергії, але й покращують її параметри.

Експериментальні дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки потужністю 5,5 кВт, встановленої в приватному господарстві, показали, що СЕС здатна забезпечити до 75 % потреб електроенергії у літній період, зменшити навантаження на трансформатор і стабілізувати напругу в мережі 0,4 кВ. При паралельній роботі з мережею відзначено зниження коефіцієнта гармонічних спотворень ($\text{THD}_{(U)}$) на 1,5–1,6 %, покращення коефіцієнта потужності до 0,99–1,00, а також зменшення коливань напруги на 5–6 В. Під час ненормальних режимів (робота зварювального апарата, короткочасні коливання навантаження) установка залишалася працездатною, автоматично відновлюючи стабільність напруги та частоти, що свідчить про її високу електромагнітну сумісність з мережею.

Економічні розрахунки підтвердили доцільність впровадження СЕС потужністю 5,5 кВт. При вартості електроенергії 4,6 грн/кВт·год щорічна

економія становить понад 18,5 тис. грн, а строк окупності проєкту – 9 років. Собівартість виробленої електроенергії (1,6 грн/кВт·год) утричі нижча за тариф на електроенергію з централізованої мережі. Це свідчить про високу ефективність та стабільність таких систем у довгостроковій перспективі.

З точки зору безпеки праці, експлуатація сонячної електростанції в приватному секторі не створює підвищених ризиків за умови дотримання стандартів охорони праці: ізоляції електричних елементів, заземлення обладнання, регулярного контролю стану контактів, очищення панелей та застосування засобів індивідуального захисту під час обслуговування.

За результатами дослідження можна зробити наступні рекомендації:

1. Доцільно інтегрувати до системи акумуляторні батареї ємністю 5–10 кВт·год, що дозволить накопичувати надлишкову денну генерацію і використовувати її у вечірній період. Це зменшить закупівлю енергії з мережі та підвищить коефіцієнт автономності.

2. Для підвищення економічного ефекту рекомендовано використовувати денне навантаження (пральні машини, насоси, вентиляцію, кондиціонування) у період максимальної генерації СЕС. Це дозволить скоротити термін окупності до 7–8 років і зменшити викиди CO₂ приблизно на 2,6 т/рік.

3. Доцільно розглянути можливість подальшої модернізації СЕС до гібридної системи із двонаправленим інвертором і системою «розумного» енергоменеджменту, що дозволить балансувати споживання, накопичення та генерацію з урахуванням погодних умов і тарифних зон.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Baptista J. (ed.) Power Quality of Renewable Energy Source Systems. – Energies, 2022, Vol. 15, № 9. DOI: 10.3390/en15093075.
2. Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H. Power Quality Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Distribution Networks. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2018, Vol. 89, № 2a, pp. 45–52.
3. Ahsan S.M., Al-Adhaileh M.H., Ullah I. et al. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, № 7, 3709. DOI: 10.3390/su13073709.
4. Mallappa P.K.B., Singh S.N., Srivastava S.C. Power Quality Improvements in Grid Connected PV System. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2019.
5. Atsu D., Addo E., Kyei A. Power Quality Assessment and Compliance of Grid-Connected PV Microinverters. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-32269-4.
6. Alwaeli M.F., et al. Addressing Power Quality Challenges in Hybrid Renewable Energy Systems. *Energy Reports*, 2025, Vol. 11, pp. 11345–11357.
7. Sandi Z. Examining Power Quality Challenges in Photovoltaic-Grid Integration: A Critical Review. *Renewable Energy Reviews*, 2024, Vol. 180, 112538.
8. International Energy Agency (IEA). *Snapshot of Global PV Markets – 2025*. Paris: IEA PVPS Task 1, April 2025.
9. Hrytsiuk I. Перспективи інтеграції розподілених джерел енергії в електромережу України // *Technical Science and Innovation*. 2025. Vol. 16, № 1. P. 45–57.
10. Global Solar Council. *Scaling-up Distributed Solar Generation: Strategic Action for People and Climate*. Global Solar Council, 2024.
11. Meissner F., et al. *Modelling the Electricity Deficit in Ukraine and Potential Policy Responses*. Kyiv: GreenDealUkraine, 2024.

12. Precedence Research. Distributed Energy Generation Market Size, Share and Trends 2024–2034. Precedence Research, 2024.
13. OECD. Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Paris: OECD Publishing, 2022.
14. Teslenko O. I. Energy Potential of Distributed Generation with Use of CGPU at Existing Boiler Houses // ETARS Journal. 2024. Vol. 7, № 1. P. 112–120.
15. Hyder Z. Solar System Types Compared: Grid-Tied, Off-Grid, and Hybrid. SolarReviews Blog, 2025. URL: <https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-vs-off-grid-vs-hybrid-solar-systems>
16. Sungrow Power. Inverter Technologies: Compare Off-Grid, On-Grid and Hybrid Systems. Sungrow Blog, 2024. URL: <https://en.sungrowpower.com>
17. Enphase Energy. How to Choose the Right System: Grid-Tied, Off-Grid, or Hybrid? Enphase Blog, 2024. URL: <https://www.enphase.com/blog>
18. Kumar N., Singh A. A Review on the Classifications and Applications of Solar Photovoltaic (PV) Technology. ResearchGate, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.16457.54884.
19. Ganegodage L.H., Waidyasekara K.G.A.S. Overview of Grid-Tied PV Technology: A Review // Proceedings of IEOM International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dubai, 2020.
20. Mandal P., Chakraborty S., et al. Comprehensive Review of Hybrid Energy Systems (HESs). Energies, 2023, Vol. 18, № 10, p. 5123. DOI: 10.3390/en18105123.
21. IEC 61000-2-2:2018. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems. – International Electrotechnical Commission, Geneva, 2018.
22. IEC 61000-4-30:2015. Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. – International Electrotechnical Commission, 2015.
23. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії, що постачається в електричні мережі загального призначення. – К.: МІНЕКОНОМПРОЗВИТКУ України, 2015.

24. Кодекс систем розподілу електричної енергії України. – Постанова НКРЕКП № 310 від 14 березня 2018 р. (із змінами).
25. IEEE Std 519-2022. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE Power & Energy Society, 2022.
26. НПАЕУ 40.1-1.32:2018. Норми допустимих відхилень параметрів якості електричної енергії в електричних мережах загального призначення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
27. IEC 61000-4-15:2010. Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications. – International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010.
28. Ahsan S.M., Ullah I., Al-Adhaileh M.H. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems // Sustainability, 2021, 13(7), 3709. DOI: 10.3390/su13073709.
29. Sandi Z. Examining Power Quality Challenges in Photovoltaic-Grid Integration: A Critical Review // Renewable Energy Reviews, 2024, Vol. 180, 112538.
30. Baptista J. (ред.) Power Quality of Renewable Energy Source Systems. – Energies, 2022, Vol. 15, № 9. DOI: 10.3390/en15093075.
31. Alwaeli M.F. et al. Addressing Power Quality Challenges in Hybrid Renewable Energy Systems // Energy Reports, 2025, Vol. 11, pp. 11345–11357.
32. Mandal P., Chakraborty S., et al. Comprehensive Review of Hybrid Energy Systems (HESs) // Energies, 2023, Vol. 18, № 10, p. 5123. DOI: 10.3390/en18105123.
33. NASA Langley Research Center. NASA POWER: Prediction Of Worldwide Energy Resources Data Sets (User Guide Release 2025.01). Hampton, VA, 2025.
34. Global Solar Atlas v2.7. Solar Resource Data for Ukraine [Electronic resource]. – World Bank Group / ESMAP / Solargis, Washington DC, 2024.

35. Укргідрометцентр. Кліматичний огляд Сумської області за період 2010–2024 рр. – Київ, 2025.

36. Хворост Т.В, Василенко О.О., Семерня О.В., Шандиба О.Б. (2021). Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентами інженерно-технологічного факультету Ступінь вищої освіти: магістр. - Суми: СНАУ, 2021. – 10 с.

37. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид.- К.: Центр учбової літератури, 2019. - 280 с.

38. Економіка енергетики : підручник / Є. Г. Скловська [та ін.] ; НТУУ “КПІ”. – 2-ге вид., випр. та доп. – Київ : Каравела, 2019. – 492 с.

ДОДАТКИ