

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.311.243.2:620.9

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
інженерії енергосистем

\_\_\_\_\_ /Каплун В.В./  
(підпис)

\_\_\_\_\_ /Антипов  
Є.О./  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: «Автономна система електроживлення приватного домогосподарства з ВДЕ»

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

\_\_\_\_\_ проф., д.т.н.  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ Кривонос В. Є.  
(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_ К.т.н. доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ Макаревич С. С.  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ Овсійчук Д. О.  
(ПІБ студента)



## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» виконана у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, Київ, у 2025 році.

Метою дослідження є обґрунтування енергоефективної автономної сонячної електростанції для забезпечення стабільного живлення електрострумоприймачів домогосподарства.

Об'єкт дослідження – об'єктом дослідження є автономна сонячна електростанція як частина автономної системи електроживлення для приватного домогосподарства.

Предмет дослідження - оптимальна конфігурація компонентів автономної сонячної електростанції та їх інтеграція з мережею для забезпечення стабільності й ефективності роботи системи.

У магістерській роботі представлені проєктні рішення щодо створення системи електропостачання приватного домогосподарства на основі автономної сонячної електростанції. Проведено аналіз сучасного обладнання та матеріалів, а також надано детальний опис принципу роботи кожного з пристроїв, що використовуються в системі. На основі проведеного аналізу підібрано необхідне обладнання, пристрої та матеріали для реалізації проєкту. Додатково викладено правила безпечної експлуатації електроустановок і заходи з охорони праці.

Проєкт складається із 81 сторінки друкованого тексту формату А4, до яких входять вступ, основна частина з 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, і презентації у форматі MS PowerPoint.

Ключові слова: автономна сонячна електростанція, фотомодулі, сонячна енергетика, резервне джерело живлення, електробезпека, енергоефективність.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗВИТОК СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В СВІТІ, ЇЇ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ	8
1.1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	8
1.2. ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ В УКРАЇНІ	14
1.3. АНАЛІЗ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНИХ ФОТОМОДУЛІВ ТА ЗМІНА РІВНЯ ГЕНЕРАЦІЇ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СЕЗОННОСТІ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ У НАУКОВІЙ ЛІТЕРАТУРІ	18
1.4. ПРИНЦИП РОБОТИ АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	21
1.5. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ АВТОНОМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	22
1.6. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПОЖИВАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ	32
2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ.	32
2.2. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2	34
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ	35
3.1. РОЗРАХУНОК І ВИБІР АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ	35
3.2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ФОТОМОДУЛІВ	37
3.3. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ІНВЕРТОРІВ	39
3.4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР КОНТРОЛЕРІВ ЗАРЯДУ	41
3.5. ВИБІР РЕЗЕРВНОГО ГЕНЕРАТОРА	44
3.6. ВИБІР СИСТЕМИ КРІПЛЕННЯ	46
3.7. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3	47
РОЗДІЛ 4. ЗАХИСТ І ДОДАТКОВІ КОМПОНЕНТИ	49

	5
4.1. Захист СЕС по постійному та змінному струмі	49
4.2. Облік і панель віддаленого керування	53
4.3. Висновки по розділу 4	55
<b>РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СЕС У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ PVGIS ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ</b>	<b>56</b>
5.1. Загальні відомості про програмне середовище	56
5.2. Визначення оптимального кута нахилу сонячних фотомодулів	57
5.3. Моделювання роботи СЕС у програмному середовищі PVGIS	58
5.4. Техніко-економічне обґрунтування	63
5.5. Висновки по розділу 5	66
<b>РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>	<b>67</b>
6.1. Аналіз виробничих небезпек під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок	67
6.2. Оцінка рівня небезпеки виникнення аварій і травм під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок	68
6.3. Розробка заходів запобігання травм і аварій під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок	70
6.4. Висновки по розділу 6	72
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>74</b>
Додаток А.1	76
Додаток А.2	77
Додаток А.3	78
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>79</b>



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР	–	пристрій вводу резервного джерела живлення
АКБ	–	акумуляторна батарея
АС	–	змінний струм
ДС	–	постійний струм
ПЗП	–	пристрій захисту від імпульсних перенапруг
СЕС	–	сонячна електростанція
ВДЕ	–	відновлювані джерела енергії
ПЗВ	–	пристрій захисного вимкнення
ВРП	–	відкритий розподільчий пристрій

## ВСТУП

Сучасні реалії дедалі чіткіше окреслюють потребу у надійному, стабільному та екологічно безпечному електропостачанні, особливо в умовах енергетичної нестабільності, що час від часу виникає в Україні. Зношеність централізованих генеруючих потужностей, зростаюча залежність від викопного палива, а також підвищення тарифів на електроенергію змушують як побутових споживачів, так і промисловість шукати альтернативні джерела живлення. У такому контексті все більш актуальним стає використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, яка в нашій країні має хороший потенціал завдяки сприятливим кліматичним умовам.

Сонячна енергія, на відміну від традиційних джерел, є доступною, безпечнішою в експлуатації та не створює додаткового навантаження на довкілля. При цьому технічна база для проектування автономних фотоелектричних систем постійно вдосконалюється — з'являються високоефективні фотомодулі, надійні інвертори, сучасні акумуляторні батареї з тривалим ресурсом роботи. Усе це відкриває широкі можливості для створення повністю автономних систем, які здатні функціонувати незалежно від стану зовнішньої мережі.

У межах цієї магістерської роботи розроблено варіант автономного електропостачання приватного домогосподарства, в основі якого лежить сонячна електростанція трифазного типу. Система проектувалась з урахуванням актуального рівня споживання, сезонних змін генерації, особливостей зберігання енергії та необхідності резервного живлення. Такий підхід дозволяє створити енергонезалежну модель електроживлення, яка не лише відповідає сучасним технічним вимогам, а й здатна адаптуватися до змін навантаження й погодних умов, забезпечуючи надійність і стабільність упродовж усього року.

## РОЗДІЛ 1

### РОЗВИТОК СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В СВІТІ, ЇЇ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

#### 1.1. Тенденції розвитку відновлюваної енергетики

Сфера відновлюваної енергетики переживає стрімкий розвиток через негативний вплив на довкілля, спричинений інтенсивною діяльністю промисловості, транспорту та інших секторів, що здійснюють викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин. Ці викиди сприяють глобальному потеплінню, погіршенню якості повітря, води та ґрунту, що негативно позначається на здоров'ї людей. У відповідь на ці виклики всі розвинені країни реалізують програми з розвитку відновлюваної енергетики. Впровадження таких програм не лише сприяє децентралізації генерації енергії та диверсифікації джерел палива, а й підвищує енергетичну безпеку держави.

Тенденції розвитку відновлюваної енергетики в світі можна проаналізувати за даними Міжнародної організації REN21, яка щорічно публікує дослідження ринків відновлюваних джерел енергії в різних країнах світу GLOBAL STATUS REPORT. Цей звіт відображає динаміку впровадження відновлюваних джерел енергії, їх внесок у світовий енергетичний сектор, а також висвітлює проблеми та перспективи галузі на глобальному рівні.

Економічні та геополітичні події, що тривають, спричинили значні зміни у світовому ландшафті енергопостачання у 2023 році з жорсткішими ринками та підвищеною увагою до енергетичної безпеки. Економічне відновлення після пандемії спричинило високий попит на енергоносії, що напружило ланцюги постачання та спричинило нестабільність цін, тоді як вторгнення Російської Федерації в Україну посилило ці проблеми та ще більше дестабілізувало ринки.

Між 2011 і 2021 роками загальна потреба в енергії зросла на 39 екзаджоулів (ЕJ); викопне паливо та традиційна біомаса покрили 53% збільшення, тоді як сучасні відновлювані джерела енергії покрили лише 45%.



Рис. 1.1. Збільшення попиту на енергію за джерелами 2011-2021 рр.

У 2021 році майже половина загального світового кінцевого споживання енергії була у формі прямого тепла, за яким йшло паливо (включаючи рідке та газоподібне паливо для транспорту) з часткою 29%.

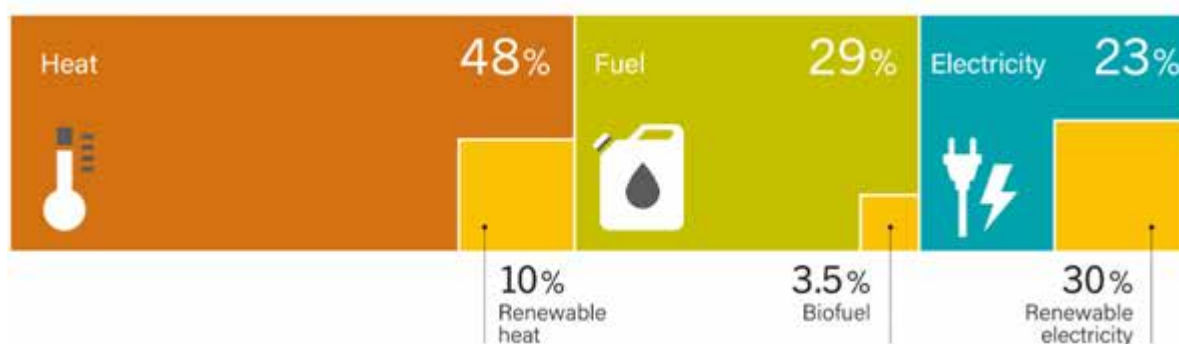


Рис. 1.2. Загальне кінцеве енергоспоживання та частка сучасних відновлюваних джерел енергії за енергоносіями 2021 р.

Частка електроенергії (також використовуваної для опалення та транспортування) у світовому енергопостачанні постійно зростала – досягла

23% у 2021 році порівняно з 19% у 2011 році – із зростаючою залежністю від електроенергії для задоволення попиту в усіх секторах. Частка відновлюваних джерел у виробництві електроенергії незначно зросла з 29,4% у 2022 році до 30,3% у 2023 році, хоча це здебільшого покривало збільшення попиту на електроенергію, а не заміну викопного палива.

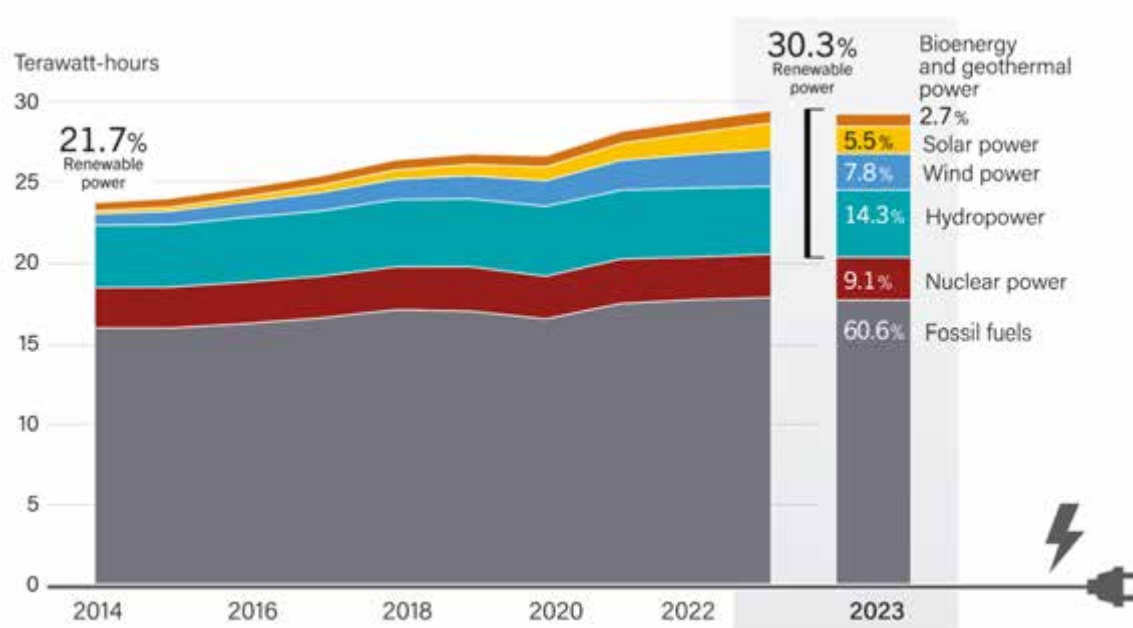


Рис. 1.3 Виробництво електроенергії за джерелами енергії, 2014-2023 рр.

Встановлена потужність відновлюваних джерел енергії продовжувала зростати, особливо вітрової та сонячної енергії, завдяки політичній підтримці та інвестиціям, які досягли рекордного рівня в 622,5 мільярдів доларів США у 2023 році (на 8,1% більше, ніж у 2022 році). Більшість (86%) збільшених потужностей електроенергії протягом року були відновлюваними, з рекордними збільшеннями сонячної фотоелектричної (PV) (407 гігават, ГВт) і вітрової енергії (117 ГВт), на які разом припало 98% додаткових потужностей з відновлюваних джерел. Зростання потужності у 2023 році відбувалося переважно за рахунок Китаю (сонячна фотоелектрична та вітрова енергетика), а також Сполучених Штатів і ЄС (сонячна фотоелектрична енергія), а також Індії та Бразилії (сонячна фотоелектрична та вітрова енергетика).

Загалом у 2023 році глобальний сектор відновлюваної енергетики спостерігав значне зростання, яке ознаменувалося збільшенням потужностей відновлюваної енергетики на 54% і досягло 536 ГВт. [1] Лише сонячні фотоелектричні системи спричинили понад три чверті доповнень. Значні внески надійшли з Європи, Сполучених Штатів, Бразилії та особливо Китаю.

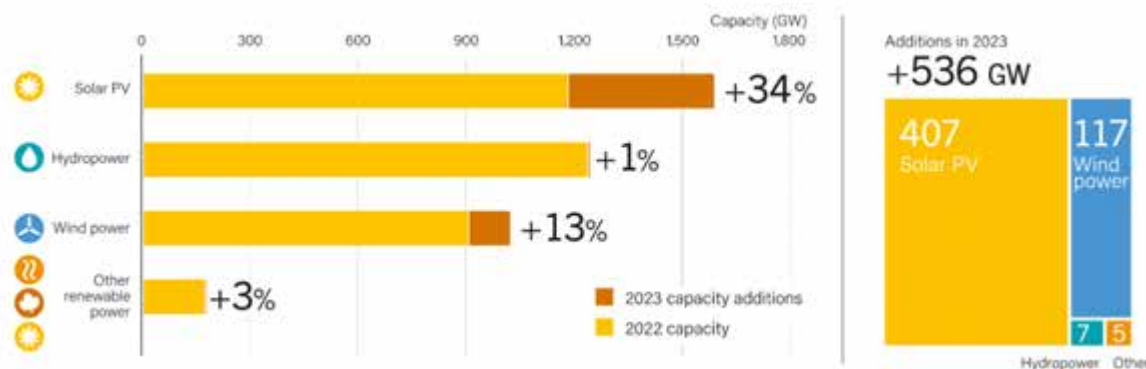


Рис. 1.4. Загальна встановлена потужність відновлюваних джерел енергії та додаткова потужність за технологіями 2023 р.

Технології відновлюваної енергетики пройшли довгий шлях лише за 20 років, особливо завдяки швидкому зростанню сонячної фотоелектричної та вітрової енергії. Однак інтеграція та розширення відновлюваних джерел енергії для досягнення високої частки в комунальних мережах залишається серйозною проблемою, особливо враховуючи, що частка змінної відновлюваної енергії (енергії вітру та сонця) у всьому світі перевищує 13%.

У 2023 році кілька країн спостерігали набагато вищу частку змінної відновлюваної генерації, ніж у середньому по світу. Данія лідирувала з 67% валової електроенергії від відновлюваних джерел енергії (57% вітру, 10% сонця), а п'ять інших країн досягли частки понад 40%: Литва (46% вітру, 12% сонця), Греція (22% вітру, 19% сонце), Нідерланди (24% вітру, 17% сонця), Іспанії (24% вітру, 17% сонця) і Португалії (29% вітру, 10% сонця). Найбільші країни з високою часткою змінної відновлюваної енергії в основному

зосереджені в Європі, за винятком Уругваю (36% вітру, 3% сонця), Чилі (12% вітру, 20% сонця) та Австралії (12% вітру, 17% сонячний).

Технології накопичення енергії можуть допомогти впоратися з мінливістю вітрової та сонячної енергії, зберігаючи надлишок енергії, що виробляється під час високої продуктивності, але низького попиту на електроенергію, а потім роблячи її доступною в періоди меншої потужності, але високого попиту на електроенергію. Інтеграція систем накопичення енергії (таких як насосні накопичувачі та батареї) зі змінною відновлюваною енергією може забезпечити кращий баланс загальної системи, залежно від вимог оператора мережі.

У 2023 році світова ємність накопичувачів енергоспоживання зросла на 65% і досягла 29,2 ГВт. Інвестиції в акумуляторні батареї в усьому світі продовжували суттєво зростати, збільшившись на 76,8% до 36,3 мільярдів доларів США у 2023 році.



Рис. 1.5. Акумуляторні батареї для акумулювання електроенергії згенерованої сонячною електростанцією

На Конференції ООН зі зміни клімату у 2023 році в Дубаї, Об'єднані Арабські Емірати, уряди домовилися потроїти потужності відновлюваної електроенергії та подвоїти покращення енергоефективності до 2030 року. За нинішніх темпів збільшення потужностей світ не досягне потроєння цілі, досягнувши лише 8 000 ГВт до 2030 року, що менше ніж 11 000 ГВт, що було поставлено за ціль. Оскільки країни готуються оновити свої національно визначені внески у скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької угоди, з'являється вікно можливостей взяти на себе чіткі зобов'язання та підвищити амбіції. Станом на початок 2023 року лише 14 країн мали чіткі цілі щодо відновлюваної потужності до 2030 року, а зобов'язання між національно визначеними внесками становили лише близько 1300 ГВт.

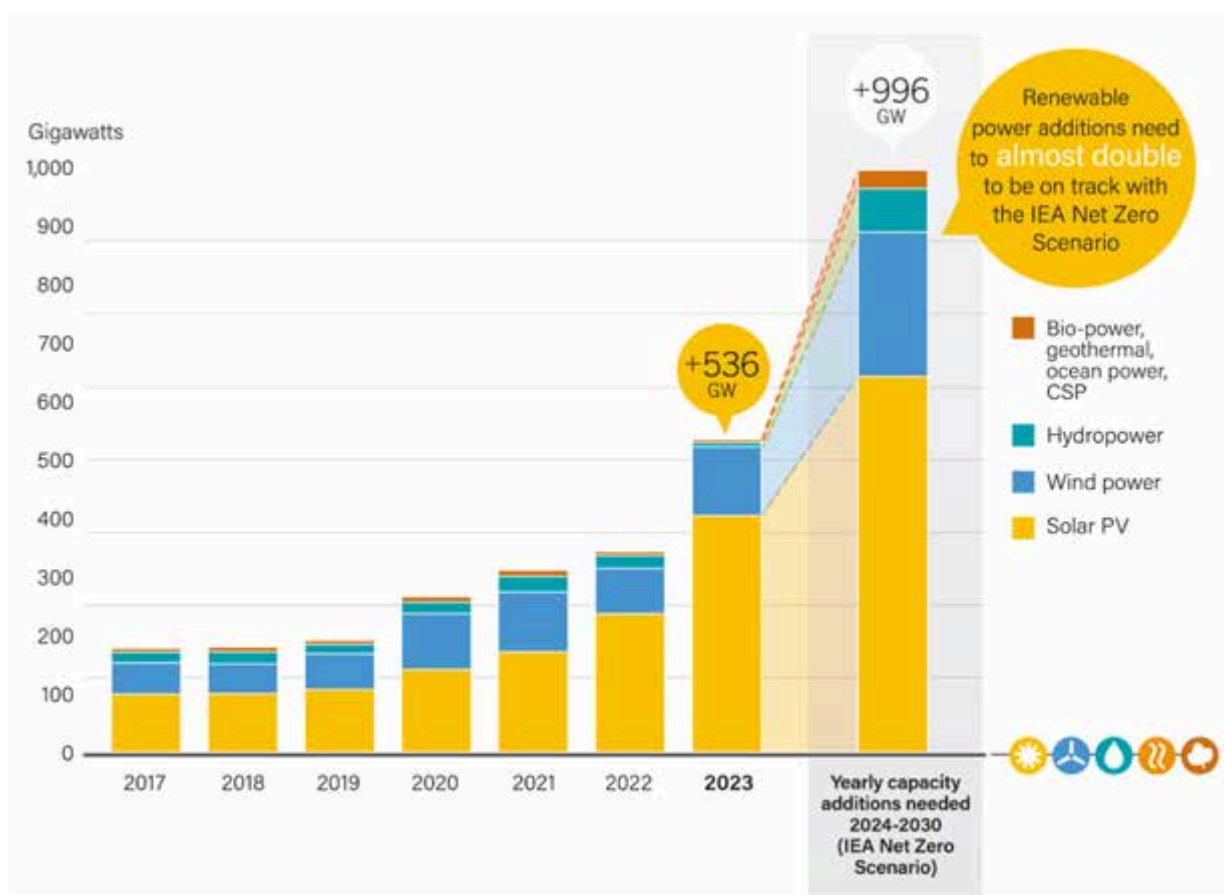


Рис. 1.6. Діаграма щорічного збільшення потужності відновлюваної електроенергії за технологіями 2017-2023 рр.

Сучасна сонячна енергетика досягла нового історичного рубежу. Як свідчать дані, оприлюднені на виставці Intersolar Europe 2022 у травні, загальна встановлена потужність сонячних установок у світі перевищила 1 ТВт. Це вражаюче досягнення, якщо врахувати, що 20 років тому, у 2002 році, цей показник становив лише 2 ГВт — тепер він зріс у 500 разів. Досягнення рівня 500 ГВт зайняло 16 років, до 2018 року, але вже за трохи більше ніж три роки цей показник подвоївся, досягнувши 1000 ГВт.

Прогнози на 2022 рік також свідчать про значні досягнення: вперше у світі планується встановити понад 200 ГВт сонячних потужностей за рік (приблизно 228 ГВт). Це додаткове зростання еквівалентне загальній світовій сонячній потужності, досягнутій у 2015 році.

Україна також активно долучається до глобального переходу на відновлювані джерела енергії, щорічно збільшуючи потужності у цій галузі. Сонячна енергетика набула значної популярності в країні за останні роки, і Україна має великі перспективи для подальшого розвитку цього напрямку.

Сонячна енергетика є відносно новою галуззю для України, однак її розвиток вражає швидкістю, особливо у порівнянні з іншими секторами економіки. За підсумками 2021 року частка сонячної енергетики у виробництві електроенергії країни перевищила 5%. Усі регіони України є придатними для встановлення сонячних електростанцій, проте найбільш сприятливими є південні області, такі як Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька, частина Донецької області та АР Крим, де сконцентровано понад 60% промислових сонячних електростанцій. На кінець 2021 року загальна потужність сонячних електростанцій в Україні становила 6320 МВт, не враховуючи об'єкти на тимчасово окупованих територіях.

Упродовж останніх років Україна демонструвала одні з найвищих темпів зростання сонячної енергетики в Європі. Однак війна суттєво вплинула на цю галузь. Дві третини сонячних електростанцій розташовані на південному заході країни, де тривають активні бойові дії. За оцінками, понад 30% сонячних

електростанцій на окупованих територіях (приблизно 1120–1500 МВт потужності) зазнали руйнувань. Крім того, більше 25% непромислових сонячних електростанцій також були пошкоджені.

## **1.2. Перспективи впровадження автономних систем електроживлення в Україні**

Сонячна енергетика є одним із найбільш динамічних секторів зеленої енергетики у світі. Європейський Союз активно впроваджує амбітну програму переходу на відновлювані джерела енергії, і Україна також долучається до цих світових тенденцій. Вона створила сприятливі умови для розвитку сонячної енергетики, прагнучи зменшити залежність від традиційних енергоресурсів за допомогою використання відновлюваних джерел.

Сонячна енергетика об'єднує технології, процеси та системи, які використовують енергію сонця для отримання електричної або теплової енергії. Для її реалізації застосовуються сонячні панелі (фотоелектричні модулі), сонячні термодинамічні електростанції, системи нагрівання води, сонячні колектори та концентратори, а також технології зберігання й розподілу енергії. Сонячні електростанції забезпечують екологічно чисту та безперебійну енергію, не створюючи шкідливих викидів у атмосферу [2]. Це один із найбільш перспективних напрямів у сфері відновлюваної енергетики, який демонструє швидке зростання та широкі можливості впровадження.

Розвиток сонячної енергетики в Україні має низку суттєвих переваг, які відкривають нові перспективи для економіки, екології та технологічного прогресу країни. Однією з ключових переваг є енергетична незалежність. Україна традиційно залежить від органічних джерел палива, таких як природний газ, нафта та вугілля, які стають дедалі складнішими для видобутку й дорожчими. Також після початку повномасштабного вторгнення, значна частина українських шахт та родовищ з корисними копалинами були окуповані, що унеможлиблює їх видобуток та розвиток даної галузі. Сонячна енергетика

дозволяє зменшити цю залежність, забезпечуючи стабільний і стійкий доступ до енергії без необхідності закупівлі ресурсів у інших країн.

Економічний ефект також є значним. Сонячна енергія, будучи невичерпною та безкоштовною, дозволяє скоротити витрати на імпорт паливних ресурсів. Крім того, розвиток цієї галузі створює нові робочі місця в сферах виробництва, монтажу та обслуговування сонячних енергетичних систем, що сприяє зростанню зайнятості та зміцненню економіки. Це також відкриває можливості для експорту сонячних технологій і залучення інвестицій, що сприяє розвитку даного сектору енергетики в країні.

Екологічна складова сонячної енергетики є однією з найважливіших. Використання сонячної енергії знижує рівень забруднення повітря, води та ґрунту, оскільки її виробництво не супроводжується шкідливими викидами чи відходами. Це допомагає мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, роблячи сонячну енергетику одним із найекологічніших способів отримання енергії.

Особливе значення має здатність сонячної енергетики забезпечувати енергопостачання в сільських і віддалених районах, де традиційні джерела енергії можуть бути недоступними або економічно не вигідними. Сонячна енергія стає надійним і ефективним рішенням для таких територій.

Впровадження сонячної енергетики також стимулює технологічний прогрес. Україна отримує можливість розвивати науково-дослідний сектор, впроваджувати інновації в галузі фотоелектричних систем, створювати нові технології для підвищення ефективності та терміну служби обладнання. Завдяки цьому підвищується рівень енергоефективності країни, що є стратегічно важливим для її сталого розвитку.

Важливою є також перспектива міжнародного співробітництва. Україна, межуючи з країнами ЄС, які активно впроваджують масштабні програми з переходу на відновлювані джерела енергії, має можливість інтегруватися у цей процес і залучати іноземні інвестиції. У поєднанні з довгим терміном

експлуатації сонячного обладнання та стрімким прогресом у цій сфері, це створює міцний фундамент для подальшого розвитку зеленої енергетики в Україні.

Україна, завдяки своєму вигідному географічному розташуванню, має значні переваги для розвитку сонячної енергетики, особливо у порівнянні з багатьма країнами Європейського Союзу, де кількість сонячних днів значно менша. Теплий і сонячний клімат країни дозволяє ефективно використовувати сонячну енергію для задоволення потреб у енергоресурсах. Сонячні електростанції мають низку переваг, серед яких економічна вигода, простота експлуатації, екологічна безпечність і невеликі вимоги до площі для розміщення обладнання.

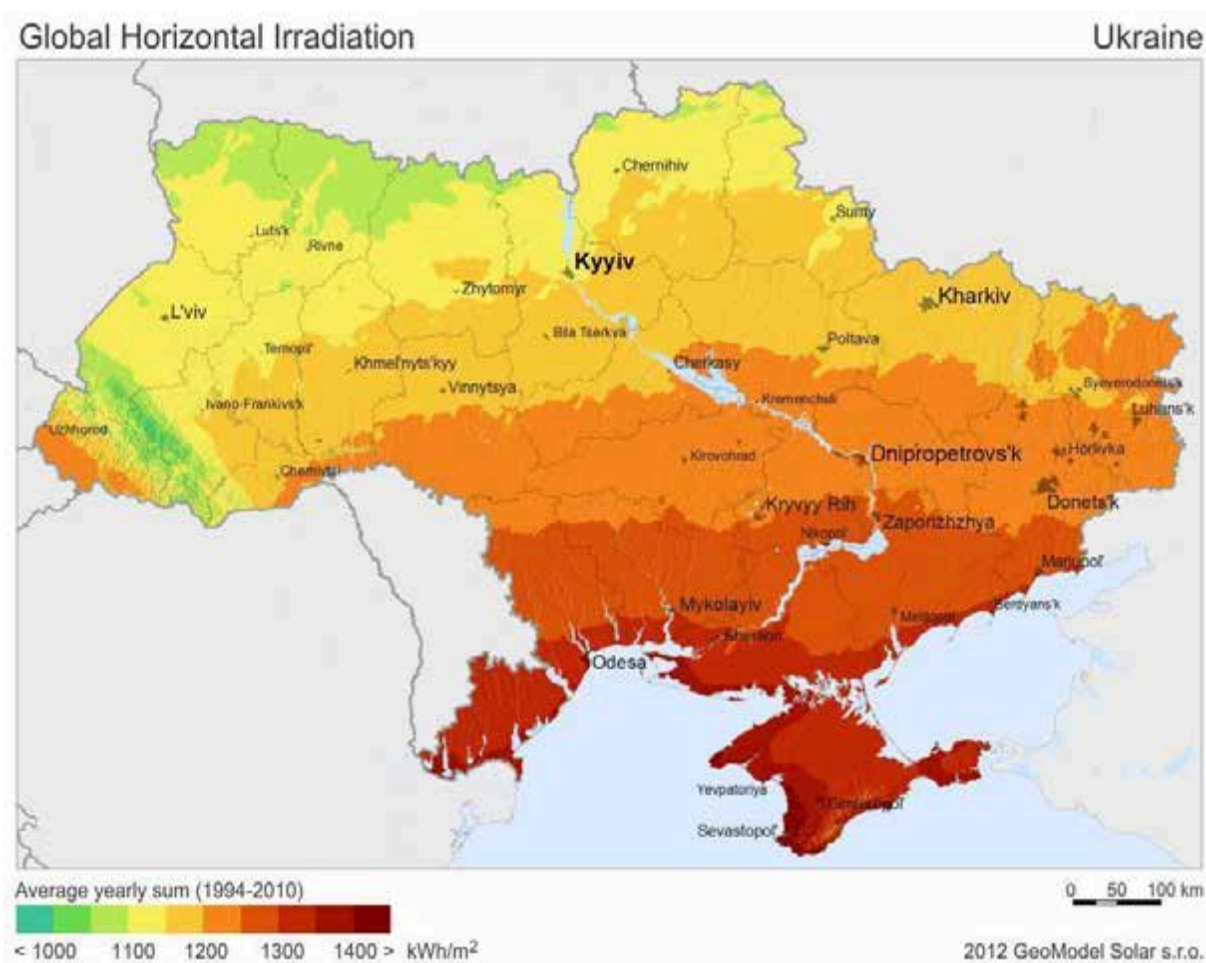


Рис. 1.7 Карта інсоляції за даними НАСА в Україні в середньому за рік

Для подальшого розвитку сонячної енергетики в Україні необхідно вдосконалити інвестиційний клімат, підготувати висококваліфікованих фахівців, розвивати наукові дослідження для покращення існуючих технологій, створювати сприятливі умови для залучення як внутрішнього, так і міжнародного фінансування, а також запровадити сертифікаційну базу.

Україна має значний потенціал у використанні сонячної енергії завдяки високому рівню інсоляції, що є однією з ключових умов ефективності таких систем. Розвиток сонячної енергетики є критично важливим для зменшення залежності від традиційних енергоресурсів і для досягнення енергетичної незалежності країни. Водночас це сприятиме збереженню природного середовища. Хоча на шляху розвитку існують певні труднощі, їх можна подолати за умови ефективної роботи та стратегічного планування.

### **1.3. Аналіз питання визначення кута нахилу сонячних фотомодулів та зміна рівня генерації в залежності від сезонності для сонячних електростанцій у науковій літературі**

Однією з ключових проблем у проектуванні та експлуатації фотоелектричних систем є визначення оптимального кута нахилу сонячних модулів. Від цього параметра безпосередньо залежить ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, оскільки саме орієнтація поверхні модуля відносно сонячного випромінювання визначає рівень інсоляції, що потрапляє на його поверхню. І хоча географічна широта є базовою відправною точкою для первинного розрахунку, в реальних умовах сезонні коливання висоти сонця над горизонтом вимагають складнішого підходу, що враховує зміну кута протягом року. В іншому випадку – велика частина потенційної генерації просто втрачається.

Особливо помітними стають ці втрати в регіонах де чітко виражена сезонністю протягом року. Для наприкладу, одним із таких регіонів є Україна. В Україні зимові й літні кути сонця суттєво різняться. Якщо кут нахилу підібрано без урахування сезонного зміщення сонячної траєкторії, у зимовий період

модулі недоотримують інсоляцію. Якщо розглядати дану ситуацію в літню пору року, то фотомодулі можуть працювати не в оптимальному режимі через зайве нагрівання або перевищення допустимого кута падіння променів. Дана ситуація створює практичну потребу у визначені компромісного фіксованого кута з мінімізацією сумарних втрат за рік. В іншому випадку потрібно використовувати системи зі змінним кутом, що забезпечують адаптивність до умов кожного сезону.

У праці «Solar Electricity Handbook» Майкл Боксвелл детально розглядає вплив кута нахилу сонячних панелей на ефективність генерації електроенергії [3]. У даній роботі він підкреслює, що оптимальний кут нахилу панелей є критичним фактором для того щоб максимізувати вироблення енергії протягом року. Зокрема, Боксвелл зазначає, що для забезпечення річної генерації енергії на рівні 320 Вт необхідно нахилити панелі під оптимальним кутом до сонця. Якщо ж цього не зробити і встановити панелі горизонтально, без нахилу, то для досягнення того ж рівня генерації потрібно вже 456 Вт. Даний приклад може свідчити про значне зниження ефективності при неправильному нахилі панелей відносно сонця.

Автор також надає практичні рекомендації щодо вибору кута нахилу залежно від географічного розташування та сезонних змін. Він підкреслює, що правильне орієнтування та нахил панелей можуть суттєво вплинути на загальну продуктивність системи, особливо в умовах змінної інсоляції протягом року.

Особливості розрахунку оптимального кута нахилу сонячних колекторів для підвищення ефективності систем перетворення сонячної енергії докладно досліджені у праці «Solar Engineering of Thermal Processes» авторів Дж. А. Даффі та В. А. Бекмана [4]. У цій праці розглянуто вплив різних геометричних параметрів, зокрема кута нахилу та орієнтації, на рівень інсоляції, що потрапляє на поверхню сонячних колекторів упродовж року. Автори застосували різні методи, зокрема: аналітичні та графічні. Дані методи були використані для визначення залежності між інтенсивністю сонячного випромінювання та

положенням поверхні колектора відносно горизонту в конкретних кліматичних умовах. На основі аналізу побудовано моделі, які дозволяють обирати оптимальний кут нахилу для різних широт та сезонів. Оптимальний кут нахилу дає змогу підвищити ефективність сонячних установок без значного ускладнення конструкції. Результати які отримали під час досліджень мають практичне значення для інженерного проєктування як автономних, так і мережевих сонячних систем. Дані знання широко використовуються у сучасних розрахункових програмах для прогнозування генерації електроенергії.

S. Kaş, M. Aktaş та O. Güler у своїй роботі "An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems", опублікованій у Journal of Engineering Research (2024), провели експериментальний аналіз впливу кута нахилу та орієнтації фотоелектричних модулів на ефективність їх роботи. Дослідження виконувалось у реальних умовах. Під час дослідження були використанні фотовольтаїчні установки, розміщеної на території Туреччини. Основною метою дослідження було визначення таких геометричних параметрів розміщення сонячних панелей, які забезпечують максимальний рівень генерації електроенергії протягом року.

Автори вивчили зміну добового і сезонного виробітку електроенергії залежно від кута нахилу модулів у діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Також було досліджено вплив відхилень по азимуту. Результати показали, що оптимальний кут нахилу для даного регіону становить  $32,08^\circ$ , а найкраща орієнтація — на південь (азимут  $0^\circ$ ). Також під час проведення досліджень було виявлено, що навіть незначні відхилення від оптимального кута нахилу призводять до помітного зниження продуктивності системи. Особливо зниження продуктивності системи відчутне в зимовий період. Найвищу ефективність вдалося досягти при використанні кута, адаптованого до сезонних змін інсоляції.

У своїй роботі автори зробили висновок про доцільність застосування регульованих конструкцій монтажу фотоелектричних модулів або використання

компромісного фіксованого кута, що дозволяє досягти задовільного результату протягом усього року без необхідності складного обладнання. Представлені результати мають практичну цінність для проєктування малих і середніх СЕС з урахуванням кліматичних особливостей регіону [5].

Особливості зміни кута нахилу сонячних панелей та їх вплив на ефективність роботи електричної мережі розглянуто у роботі Д. О. Остренка та О. Ю. Колларова [6]. У роботі проаналізовано різні методи регулювання кута нахилу фотоелектричних модулів з урахуванням сезонної зміни висоти сонця та географічної широти місцевості. Авторами наведено аналітичні формули для розрахунку оптимального кута нахилу панелей залежно від широти регіону та пори року. Використання даних формул під час проєктування дозволяє підвищити ефективність виробництва електроенергії сонячною електростанцією. Зокрема, встановлено, що фіксований кут нахилу панелей, визначений як середньорічне значення, забезпечує меншу генерацію порівняно з системами зі змінним сезонним або місячним кутом нахилу. Авторами також розглянуто вплив зміни кута нахилу на стабільність роботи локальних електричних мереж, підкреслюючи важливість погодження параметрів генерації з навантаженням споживачів. Застосування запропонованих підходів дозволяє оптимізувати графік вироблення електроенергії та зменшити небаланс у мережі, що особливо актуально для умов розосередженої генерації в приватному секторі.

#### **1.4. Принцип роботи автономної сонячної електростанції**

Автономна сонячна електростанція працює за принципом перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну, яку можна безперервно використовувати для живлення побутових або виробничих споживачів [7]. Центральними елементами такої системи є сонячні фотомодулі. Сонячні фотомодулі вловлюють сонячне світло й генерують постійний струм. Ще одним дуже важливим елементом автономної сонячної електростанції є акумуляторні батареї. Акумуляторні батареї надають можливість зберігати надлишки

виробленої електроенергії для подальшого споживання, наприклад в нічний час або в періоди низької сонячної активності.

Принцип роботи автономної сонячної станції поділяється на декілька ключових етапів:

1. Поглинання сонячної енергії – фотоелектричні модулі, виконані здебільшого на основі кремнієвих напівпровідників, поглинають фотони сонячного випромінювання. При цьому в напівпровіднику виникає так званий фотоелектричний ефект — носії заряду починають рухатись, створюючи різницю потенціалів.

2. Генерація постійного струму – даний процес відбувається якраз таки внаслідок руху носіїв заряду всередині фотоелементів. Однак слід зауважити, що параметри цього струму безпосередньо залежать від інтенсивності сонячного випромінювання та орієнтації панелей відносно джерела світла.

3. Інверсія постійного струму – даний етап є критично необхідним в процесі перетворення енергії сонця в електричну енергію. Це обумовлено тим, що більшість побутових приладів працює від мережі змінного струму з напругою 220 В та частотою 50 Гц. Саме тому згенерований панелями постійний струм проходить через спеціальний пристрій – інвертор, де й набуває потрібних параметрів.

4. Акумуляція – акумуляторні батареї зберігають надлишкову енергію, яка не використовується одразу. Саме ємність акумуляторних батарей напряму впливає на тривалість автономної роботи системи за відсутності сонячного випромінювання.

5. Керування – даний етап виконується за допомогою спеціалізованих контролерів заряду та інверторів. Ці пристрої оптимізують процеси заряду/розряду акумуляторів, захищають систему від критичних режимів роботи, а також забезпечують безперебійне електропостачання споживачів.

## **1.5. Аналіз конструктивного виконання автономних сонячних електростанцій**

Існує кілька технологій для виробництва електроенергії з енергії сонця, які забезпечують різні підходи до її використання.

Фотоелектрична технологія дозволяє безпосередньо перетворювати сонячну енергію на електричну. Фотоелектричні системи, відомі також як сонячні електростанції, широко застосовуються для енергозабезпечення приватних домогосподарств, квартир, громадських закладів, а також промислових і сільськогосподарських об'єктів. Вони відзначаються швидкою окупністю і потребують мінімального технічного обслуговування, що робить їх доступним і популярним вибором для багатьох користувачів.

Використання альтернативних, екологічно чистих джерел енергії є економічно доцільним як для задоволення власних потреб у електроенергії, так і для отримання прибутку від продажу надлишкової електрики в мережу за "зеленим" тарифом.

Для ефективного виробництва електроенергії сонячною електростанцією необхідно використовувати якісне та надійне обладнання. Основними елементами автономної сонячної електростанції є сонячні панелі, інвертори, акумуляторні батареї та контролери заряду-розряду. Додаткові компоненти, такі як підтримуючі конструкції, кабельні системи, вузол обліку з лічильником, а також система моніторингу, забезпечують стабільність та ефективність роботи станції.

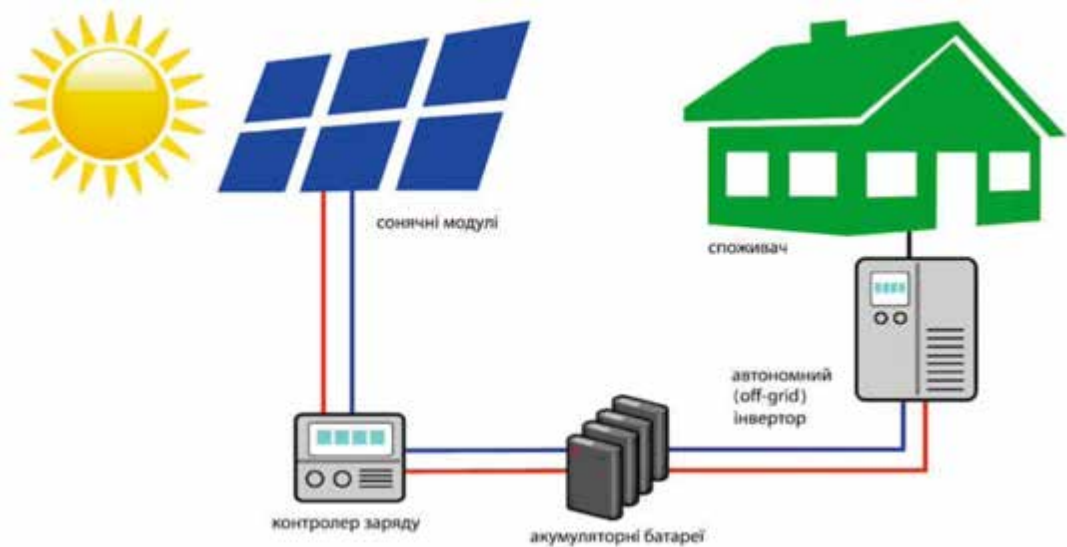


Рис. 1.9. Структура автономної сонячної електростанції

Фотоелектричні панелі, які є одним з основних елементів, виготовляються з напівпровідникових матеріалів, переважно з кремнію [2]. Їх продуктивність, довговічність та вартість залежать від типу використовуваних елементів.

**Монокристалічні панелі** забезпечують найвищий коефіцієнт корисної дії (до 22%), мають відмінні температурні характеристики і тривалий термін служби при мінімальному зниженні ефективності. Проте їхня вартість є найвищою через використання високоочищеного кристалічного кремнію.



Рис. 1.10. Монокристалічні сонячні панелі

**Полікристалічні панелі** мають коефіцієнт корисної дії в межах 14–17% і є більш доступними за ціною, зберігаючи водночас хороші експлуатаційні характеристики.



Рис. 1.11. Полікристалічні сонячні панелі

**Тонкоплівкові панелі** створені на основі аморфного кремнію, відзначаються найменшою ефективністю, яка з часом може суттєво знижуватися. Їх перевагами є найкращий температурний коефіцієнт, можливість монтажу на нерівних поверхнях та низька вартість.



Рис. 1.12. Тонкоплівкові панелі

Інвертор відіграє ключову роль у системі, забезпечуючи перетворення постійного струму на змінний (АС), що необхідно для живлення електроприладів або передачі енергії до загальної мережі [8]. Ці пристрої відрізняються за потужністю, функціональністю та призначенням, що дозволяє обирати оптимальний варіант залежно від конкретних потреб. Автономні інвертори, які використовуються у сонячних електростанціях, розраховані на ізольовані системи енергопостачання, де відсутнє підключення до централізованої мережі або вона є нестабільною. Сучасні високоякісні інвертори не лише виконують базову функцію перетворення струму, але й забезпечують контроль за системою, її безпечну експлуатацію, оптимальне управління розподілом енергії та регулювання навантаження.

Інвертори поділяються на три основні типи залежно від їхньої функціональності та сфери застосування.

**Автономні** інвертори використовуються в ізольованих системах, які не підключені до загальної електромережі. Вони часто мають вбудований пристрій для зарядки акумуляторів від сонячної електростанції, забезпечуючи стабільне живлення в умовах автономної роботи.

**Мережеві** інвертори працюють у синхронізації із зовнішньою мережею, узгоджуючи фазу та синусоїду струму. Цей тип дозволяє продавати згенеровану електроенергію до загальної мережі, проте такі інвертори не можуть забезпечити резервного живлення в разі відсутності мережевої напруги.

**Гібридні** інвертори поєднують функції автономного та мережевого інвертора. Вони не лише дозволяють продавати надлишки електроенергії в мережу, але й накопичувати її в акумуляторних батареях для подальшого використання. Ці сучасні універсальні пристрої є оптимальним рішенням для створення енергонезалежних систем, забезпечуючи баланс між ефективністю, універсальністю та автономністю.



Рис. 1.13. Приклад встановлення інвертора

Акумулятори для сонячних фотомодулів використовуються в автономних та гібридних сонячних електростанціях для збереження енергії, виробленої протягом дня. Вони дозволяють накопичувати надлишкову електроенергію, яка генерується сонячними панелями під час денного сонячного випромінювання, та забезпечувати електричну енергію у нічний час або під час поганих погодних умов, коли сонячне світло обмежене [9].

Існують різні типи акумуляторів, які використовуються в сонячних електростанціях, зокрема свинцево-кислотні, літій-іонні та натрій-іонні акумулятори. Літій-іонні акумулятори є найпопулярнішими завдяки своїй високій енергоємності, тривалому терміну служби та ефективності в умовах циклічного заряджання та розряджання. Вони мають високий коефіцієнт корисної дії та забезпечують більш компактні і довговічні рішення порівняно з іншими типами акумуляторів.

Акумулятори допомагають знизити залежність від централізованої електромережі, забезпечуючи автономність системи. Вони використовуються не тільки в приватних домогосподарствах, а й у великих індустріальних і

комерційних системах, де необхідно забезпечити стабільне живлення в умовах змінного навантаження та несприятливих погодних умов. Успішне використання акумуляторних систем в таких установках також дозволяє знизити витрати на електроенергію та покращити енергетичну ефективність.



Рис. 1.14. Акумулятор Pylontech US3000C

Контролери заряду є важливими елементами, що забезпечують правильний процес заряджання акумуляторних батарей від сонячних панелей. Вони підключаються між панеллю та акумулятором, виконуючи функцію регулювання та захисту від надмірного перезарядження. Існують різні типи контролерів, кожен з яких має свої особливості та переваги.

Найпростіші контролери просто відключають джерело живлення, коли акумулятор досягає певного рівня напруги. Однак вони не забезпечують повного заряду батареї (лише на рівні 60-70%), що може значно скоротити термін служби акумуляторів.

ШИМ (широко-імпульсна модуляція) контролери використовують метод імпульсного управління струмом для досягнення більш точного та ефективного заряду, дозволяючи акумуляторам досягти повного заряду до 100%.



Рис. 1.15. ШІМ контролер

MPPT (максимальна точка потужності) контролери значно підвищують ефективність роботи сонячної панелі, оптимізуючи параметри напруги та струму для витягування максимальної кількості енергії, що виробляється панелями. Це дозволяє досягати більш високої продуктивності та підвищувати загальну ефективність системи.



Рис. 1.17. Контролер заряду Victron Energy SmartSolar MPPT 250/85

Автономні сонячні електростанції демонструють високу ефективність за умов стабільної інсоляції, особливо в ясні, сонячні дні. У такі періоди фотомодулі повністю покривають поточні потреби споживача в електроенергії.

Водночас, повністю автономна система повинна виконувати своє функціональне призначення і в менш сприятливих умовах. Наприклад у хмарну погоду, вночі або тоді, коли акумуляторні батареї розряджені.

Щоб уникнути збоїв у живленні, до складу такої системи часто додають резервне джерело живлення – генератор, що працює на бензині або дизельному паливі. Його завдання підтримати подачу енергії в моменти, коли сонячної генерації недостатньо, а накопиченої в батареях енергії вже не вистачає. Таким чином, навіть за тривалих періодів несприятливої погоди, система здатна функціонувати автономно, забезпечуючи безперебійне електроживлення об'єкту та повну енергетичну незалежність [12].



Рис. 1.18. Генератор постійної напруги Könnor&Söhnen KS 48V-DC

Підтримуюча конструкція для сонячних панелей забезпечує необхідну міцність і стійкість системи, а також дозволяє правильно встановити панелі під оптимальним кутом до сонячного випромінювання. Це важливо для забезпечення максимальної ефективності роботи сонячної станції, оскільки правильний кут нахилу панелей дозволяє отримати більше енергії від сонця протягом дня.

Такі конструкції можуть бути різними за матеріалом і типом в залежності від умов експлуатації. Вони можуть бути виготовлені з металу, алюмінію або сталі, що гарантує їхню довговічність і стійкість до зовнішніх впливів, таких як вітер, дощ чи сніг. Крім того, підтримуючі конструкції часто оснащуються регулюванням кута нахилу, що дозволяє змінювати його для досягнення оптимальної продуктивності в різні пори року. Для застосування на дахах будівель можуть використовуватися спеціальні кріплення, що не пошкоджують покрівлю та зберігають естетичний вигляд.



Рис. 1.19. Підтримуюча конструкція для сонячних панелей

## 1.6. Висновки по розділу 1

У першому розділі дипломної роботи було досліджено загальний стан і перспективи розвитку відновлюваної енергетики, з особливим акцентом на сонячну генерацію. Проведено аналіз світових тенденцій. Даний аналіз показав, що інтерес до джерел енергії, які не залежать від викопного палива, стрімко зростає. Особливо це помітно на тлі енергетичних криз і змін клімату. Сектор фотовольтаїки демонструє стабільне зростання, а технології стають доступнішими для широкого кола споживачів, зокрема в побутовому секторі.

У цьому контексті було обґрунтовано актуальність впровадження автономних сонячних систем саме в умовах України. Постійні перебої в централізованому енергопостачанні які зумовлені частими обстрілами енергетичної інфраструктури країни, а також економічна нестабільність стимулюють перехід до локальних джерел живлення. Автономні СЕС у приватному секторі дають змогу знизити залежність від зовнішніх постачальників, а також забезпечити екологічно чистою та безперебійною енергію домогосподарства, не створюючи шкідливих викидів у атмосферу.

Також розглянуто як зміна кута нахилу фотомодулів та сезонна варіативність інсоляції впливають на рівень генерації. Наведено результати наукових досліджень, які підтверджують необхідність врахування сезонності та географічного розташування при проєктуванні. Підтверджено практичну доцільність застосування регульованих або оптимізованих кутів нахилу фотомодулів при побудові системи.

Також було розкрито загальні принципи роботи автономної СЕС, включаючи функціонування її основних елементів: фотомодулів, інверторів, акумуляторів і систем керування. На основі аналізу конструктивних рішень обґрунтовано вибір обладнання, яке забезпечує стабільну генерацію, накопичення та споживання енергії відповідно до потреб побутового споживача. Розглянуто критерії вибору та особливості застосування кожного компонента, з акцентом на їхню ефективність, надійність та придатність для умов приватного домогосподарства. Аналіз конструктивних особливостей та функціональних можливостей цих компонентів дозволяє обґрунтувати вибір найбільш ефективних рішень для створення надійної автономної системи енергозабезпечення з урахуванням специфіки експлуатації.

## РОЗДІЛ 2

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПОЖИВАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ

**2.1. Характеристика об'єкту проектування.**

Домогосподарство споживає близько 700 кВт·год електроенергії на місяць. Планується встановлення автономної сонячної електростанції, фотомодулі якої будуть розміщені на дахах будівель. Скати дахів мають вигідне розташування відносно сонця, оскільки орієнтовані на південь. Основна частина сонячних фотомодулів буде розташована на даху ангара, площа якого становить 371,25 м<sup>2</sup>. Споживачами електроенергії є здебільшого побутові прилади, які мають змішане навантаження і невеликі пускові струми.

Потужність струмоприймачів вказана в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

**Потужність встановлених струмоприймачів**

№п/п	Найменування споживача	Встановлена потужність, кВт
1.	Мікрохвильова піч	1,5
2.	Чайник	1,2
3.	Холодильник	0,3
4.	Кухонний комбайн	2,5
5.	Телевізор	0,3
6.	Комп'ютер	0,3
7.	Пилосос	1,6
8.	Фен	1
9.	Пральна машина	2
10.	Праска	1,45
11.	Електроплита	3
12.	Принтер	0,5
13.	Насос1	1,1
14.	Насос2	1,2
15.	Витяжка	0,1
16.	Котел твердопаливний	0,3
17.	Електроінструмент	1
18.	Зернодробилка	2

19.	Мінімійка	2,5
20.	Освітлення	3
Всього:		26,85

На основі встановленої потужності навантаження об'єкта, наведеної в таблиці 2.1, виконаємо розрахунок добового споживання електроенергії, результати якого представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

### Добове споживання електроенергії об'єктом за день

№п/п	Найменування споживача	Встановлен а потужність, кВт	Кількість годин роботи за день	Споживання за день, кВт·год
1	Мікрохвильова піч	1,5	0,2	0,3
2	Чайник	1,2	0,3	0,36
3	Холодильник	0,3	15	4,5
4	Водонагрівач	2,5	1,25	3,125
5	Телевізор	0,3	2	0,6
6	Комп'ютер	0,3	2	0,6
7	Пилосос	1,6	0,25	0,4
8	Фен	1	0,3	0,3
9	Пральна машина	2	1	2
10	Праска	1,45	0,1	0,145
11	Електроплита	3	1	3
12	Принтер	0,5	0,1	0,05
13	Насос 1	1,1	2	2,2
14	Насос2	1,2	2	2,4
15	Витяжка	0,1	0,7	0,07
16	Котел твердопаливний	0,3	10	3
17	Електроінструмент	1	1	1

18	Зернодробилка	2	0,5	1
19	Мінімийка	2,5	0,3	0,75
20	Освітлення	3	1	3
ВСЬОГО:		26,85		28,8
Всього по резервній групі		4,7		12,7

Встановлена потужність об'єкта складає 26,85 кВт, а його добове споживання – 28,8 кВт·год. Окремо виділено резервну групу струмоприймачів із встановленою потужністю 4,7 кВт та добовим споживанням 12,7 кВт·год. Враховуючи ці параметри, переходимо до розрахунку потужності сонячної електростанції.

## 2.2. Висновки по розділу 2

У даному розділі було здійснено електричний розрахунок споживання приватного будинку з урахуванням реального навантаження побутових приладів. Було складено перелік основних споживачів електроенергії, визначено їхню встановлену потужність та середню тривалість роботи протягом доби. Визначено, що потужність об'єкта складає 26,85 кВт, а його добове споживання 28,8 кВт·год. Окрім основного навантаження, окремо проаналізовано резервну групу споживачів, що дозволяє врахувати критично важливі пристрої у випадках аварійного режиму або обмеженої генерації. Встановлено, що потужність резервної групи споживачів становить 4,7 кВт та добовим споживанням 12,7 кВт·год. Даний підхід дає можливість закласти правильну основу для визначення параметрів автономної сонячної станції в наступних розділах роботи.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРАХУНОК СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ

#### 3.1. Розрахунок і вибір акумуляторних батарей

Відповідно до умов завдання та характеристик об'єкта пропонується встановити автономну сонячну електростанцію. Вибір автономної системи обумовлений необхідністю забезпечення безперебійного електропостачання в сільській місцевості, де метеорологічні та інші фактори можуть викликати періодичні перебої в централізованому електропостачанні. Для створення надійної системи електропостачання будуть використовуватися автономні станції з акумуляторами та резервними бензиновими генераторами.

Починаємо проектування нашої сонячної станції з визначення необхідної ємності акумуляторних батарей. Після аналізу різних типів акумуляторів було вирішено використовувати літій-іонні акумулятори через їх високу ефективність, тривалий термін служби та кращі характеристики циклу заряду та розряду.

Після порівняльного аналізу виробників було обрано акумулятори Pylon Tech, які мають найкраще співвідношення ціна/якість і відповідають всім технічним вимогам проєкту [11].

Stack of Batteries		Force L1					
Model							
Item code (Battery module)	90040227						
Item code (BMS)	90040228						
Battery module quantity [pcs]	2	3	4	5	6	7	
Battery system voltage [V]	48						
Battery system capacity [kWh/Ah] 1 stack	7.10 / 148	10.65 / 222	14.20 / 296	17.76 / 370	21.31 / 444	24.86 / 518	
Battery system charge/discharge current [A, normal]	75						
Dimension [460x296xH, mm]	530	700	870	1040	1210	1380	
Weight [kg]	86.5	123	159.5	196	232.5	269	
Battery system charge voltage [min-max,V]	44.5 - 53.5						
Charge / discharge test current [A] (*)	30	45	60	75	90	100	
Battery system charge/discharge current [A, max.]	110@15s						
Battery module name	FL48074						
Battery module voltage [V]	48						
Battery module capacity [kWh/Ah]	3.652 / 74						
Depth of Discharge [%]	96						
Efficiency [%]	96						
Battery controller name [BMS]	FC004B-100S						
Communication bus	RS485/CAN						
Operation temperature [°C]	0 - 50						
Storage temperature [°C]	-20 - 60						
Altitude [mt]	<2000						
Protection class	IP65						
Transport certificate	UN38.3						
Product certificate	VDE2510-60, IEC62619, CE RED, IEC62477-1, CEC						
Battery controller dimension [WxHxD]	600x150x380						
Battery bottom base dimension [WxHxD]	600x40x380						

Рис. 3.1. Технічні характеристики батарей PylonTech Force L1

Розраховуємо загальну кількість енергії, яка буде взята з акумуляторних батарей:

$$E_{AKB} = P_{спож} / \eta_{инв}, \quad (3.1)$$

де  $C_{AKB}$  -ємність АКБ, кВт·год;

$P_{спож}$  -споживання об'єкта, кВт·год;

$\eta_{инв}$  - ККД інвертора, %

За даними з таблиці 2.2. споживання об'єкта для якого виконується проектування становить 28,8 кВт·год. Приймаємо ККД інвертора 95% (0,95).

$$C_{AKB} = 28,8 / 0,95 = 30,32 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Переводимо одиниці вимірювання у А·год:

$$C_{AKB(A \cdot год)} = C_{AKB} / U_{н.АКБ},$$

Де  $U_{н.АКБ}$  - напруга системи, приймаємо 48 В

$$C_{AKB(A \cdot год)} = 30,32 / 48 = 632 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Враховуємо коефіцієнт температурного зменшення ємності АКБ. Для літєвих акумуляторів коефіцієнт дорівнює 1:

$$C_{AKB(A \cdot год)} = C_{AKB(A \cdot год)} \cdot k \quad (3.3)$$

$$C_{AKB(A \cdot год)} = 632 \cdot 1 = 632 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Необхідно також врахувати допустиму глибину розряду акумулятора (DOD):

$$C_{AKB(A \cdot год)} = C_{AKB(A \cdot год)} / 0,9 \quad (3.4)$$

Для літєвих акумуляторів приймаємо DOD = 0,9 (90%).

$$C_{AKB(A \cdot год)} = 632 / 0,9 = 702 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Отже, загальна необхідна ємність АКБ для забезпечення живлення об'єкта для якого виконується проектування становить 702 А·год. Для зручності подальшого підбору обладнання переведемо цей показник у кВт·год:

$$C_{АКБ(кВт\cdot год)} = C_{АКБ(А\cdot год)} \cdot U_{н.АКБ}, \quad (3.5)$$

$$C_{АКБ(кВт\cdot год)} = 702 * 48 / 1000 = 34 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Отже, для того щоб забезпечити енергією приватне домогосподарство протягом однієї доби необхідна ємність акумулятора становить 34 кВт·год. Для забезпечення стабільного електропостачання під час несприятливих погодних умов необхідно додати 25% резерву до загальної ємності акумуляторної батареї [2].

$$C_{АКБ(кВт\cdot год)} = 34 + (34 \cdot 25\%) = 42,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

На основі проведених розрахунків обираємо для встановлення 2 стеки Force L1 з 6 модулів фірми PylonTech.

Загальна встановлена ємність акумуляторних батарей складе 42,62 кВт·год.



Рис. 3.2. Низьковольтні батареї Force L1 Pylontech

### 3.2. Розрахунок і вибір фотомодулів

При виборі фотомодулів важливо враховувати сучасні технології, які підвищують їх ефективність.

Найкраще для цього проекту підходять панелі, які поєднують байпас-діоди, PERC-технологію, технологію Multi Busbar, та Half-cell

технологію. Використання двосторонніх панелей в цьому випадку недоцільно, тому що модулі будуть монтуватися на скатах даху будівель.

Згідно з технічними вимогами та архітектурними особливостями скатів будівель, було обрано сонячні панелі Trina Solar TSM-DE21 потужністю 660 Вт кожна.

Назва моделі	TSM-DE21 660W
Тип	Монокристал
Потужність	660 Вт
Струм номінальний	17,47 А
Струм короткого замикання	18,53 А
Номінальна напруга	37,8 В
Напруга холостого ходу	45,7 В
ККД	21,2 %
Розмір	2384×1303×35 мм
Вага	33,9 кг
Температурний коефіцієнт потужності	-0,34%/°C

Рис. 3.3. Електричні характеристики фотоелектричних модулів Trina Solar TSM-DE21

Технічні характеристики обраних панелей Trina Solar TSM-DE21:

- Номінальна потужність: 660 Вт
- Номінальна напруга: 37,8 В
- Струм номінальний: 17,47 А
- Напруга холостого ходу: 45,7 В
- Струм короткого замикання: 18,53 А
- Розміри: 2384x 1303 x 35 мм
- Ефективність: 21,2%

Перевіримо, яку потужність фотомодулів необхідно встановити для забезпечення заряду акумуляторних батарей.

Спочатку визначимо ємність АКБ з урахуванням коефіцієнта розряду:

$$C_{АКБ(розр)} = C_{АКБ} \cdot DOD \quad (3.6)$$

де  $C_{АКБ}$  - встановлена ємність АКБ - 42,62 кВт·год;

DOD для літєвих акумуляторів - 0,9.

$$C_{AKB(розр)} = 42,62 / 0,9 = 47,36 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.7)$$

Враховуючи сезонність генерації, введемо коефіцієнт для зимового періоду (коли генерація найнижча) = 1:

$$P_{н.PV} = 47,36 \cdot 1 = 47,36 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.8)$$

Також необхідно врахувати ККД акумуляторів (0,95) та контролера заряду (0,96):

$$P_{н.PV} = C_{AKB} / (\eta_{AKB} \cdot \eta_{контролера}) \quad (3.9)$$

$$P_{н.PV} = 47,36 / (0,95 \cdot 0,96) = 51,92 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Отже, необхідна встановлена потужність фотомодулів для зарядки акумуляторів повинна становити не менше 51,92 кВт.

Потужність одного фотомодуля TRINA SOLAR TSM-DE21 складає 660 Вт. Знаючи потужність одного фотомодуля розрахуємо необхідну кількість фотомодулів:

$$N_{фотомод.} = 51,92 / 0,66 \approx 79 \text{ шт.}$$

Загальна встановлена потужність по сонячних панелях складе:

$$P_{PV} = 79 \cdot 0,66 = 52,14 \text{ кВт}$$

Перевіримо умову достатності встановленої потужності:

$$P_{PV} > P_{н.PV} \quad (3.10) \quad (3.12)$$

$$52,14 \text{ кВт} > 51,92 \text{ кВт}$$

Умова виконується, отже встановлена потужність по фотомодулях перевищує необхідну для зарядки акумуляторів.

### 3.3. Розрахунок та вибір інверторів

Для проектованої автономної фотоелектричної станції найкраще використовувати інвертор, здатний працювати з різними джерелами енергії. Розрахунок номінальної потужності інверторів здійснюється на основі встановленої потужності фотомодулів, яка складає 52,14 кВт.

Обираємо для встановлення 4 інвертори Victron Quattro 48/15000/200-100/100 [10].

Використання чотирьох інверторів Quattro 48/15000/200-100/100 має сенс з кількох причин. По-перше, розподіл навантаження між кількома інверторами дозволяє забезпечити стабільну роботу системи в умовах змінного споживання енергії. Це особливо важливо, якщо на одній фазі буде знаходитися декілька енергоспоживачів, таких як котел, водонагрівач і насоси. Дані пристрої створюють значне навантаження на фазу, тому для більш рівномірного розподілу потужності рекомендується встановити на цю фазу два інвертора.

По-друге, використання інверторів (по одному на фазу) в трифазній системі виправдано технічною необхідністю забезпечення симетрії навантаження на всі фази, як це передбачено міжнародним електротехнічним стандартом ІЕС 60364 і національними нормативними документами ПУЕ, які встановлюють вимоги щодо допустимого небалансу між фазами не більше 15-20%, а також необхідністю забезпечення стабільного незалежного резервного живлення кожної з трьох фаз при відключенні основної мережі, що особливо критично для трифазних споживачів та підтримки нормального функціонування системи заземлення та захисту відповідно до стандартів безпеки ІЕС 62109 для інверторних систем [22].

Також, використання чотирьох інверторів дозволяє краще управляти потужністю і підвищити загальну надійність системи. Це можна обґрунтувати тим, що якщо один з інверторів вийде з ладу або буде потребувати технічного обслуговування, інші інвертори продовжать забезпечувати роботу системи, що дозволяє уникнути повного відключення всіх споживачів. Даний підхід дозволяє знизити ризики перевантаження окремих інверторів і забезпечити їх тривалу та ефективну роботу.

Дане рішення допоможе розподілити не лише навантаження на електричну мережу, але й підвищити загальну ефективність енергоспоживання в системі.

Quattro	12/3000/120-50/50 24/3000/70-30/30	12/5000/220-100/100 24/5000/110-100/100 48/5000/70-100/100	24/8000/200-100/100 48/8000/110-100/100	48/10000/140-100/100	48/15000/200-100/100
Nominal Battery Voltage	12/3000: 12 V battery 24/3000: 24 V battery	12/5000: 12 V battery 24/5000: 24 V battery 48/5000: 48 V Battery	24/8000: 24 V battery 48/8000: 48 V battery	48 V battery	
PowerControl / PowerAssist				Yes	
Integrated Transfer switch				Yes	
AC inputs (2x)	Input voltage range: 187-250 VAC			Input frequency: 50/60 Hz	
Maximum feed through current (A)	2x100			Cos φ >0.8	
ICW	8 kA 30 ms			2x100	
<b>INVERTER</b>					
Input voltage range (VDC)	9,5 – 17 V    19 – 33 V    38 – 66 V				
Output (V)	Output voltage: 230 VAC ± 2 %    Frequency: 50 Hz ± 0,1 %				
Cont. output power at 25 °C (VA) <sup>III</sup>	3000	5000	8000	10000	15000
Cont. output power at 25 °C (W)	2400	4000	6400	8000 III	12000
Cont. output power at 40 °C (W)	2200	3700	5500	6500	10000
Cont. output power at 65 °C (W)	1700	3000	3600	4500	7000
Peak power (W)	6000	10000	14000	20000	25000
Input current (A DC)	250 / 125	438/238/118	381/198	235	350
Maximum continuous Output current (A-)	11	19	30	37	53/50
Power factor range	±0.8				
Maximum output fault current	32 A peak 1 sec.	53 A 1 sec.	100 A 1 sec.	100 A 1 sec.	150 A 1 sec.
Maximum efficiency (%)	93 / 94	94 / 94 / 95	94 / 96	96	96
Zero load power (W)	20 / 20	30 / 30 / 35	60 / 60	60	110
Zero load power in AES mode (W)	15 / 15	20 / 25 / 30	40 / 40	40	75
Zero load power in Search mode (W)	8 / 10	10 / 10 / 15	15 / 15	15	20
<b>CHARGER</b>					
Charge voltage 'absorption' (VDC)	14,4 / 28,8	14,4 / 28,8 / 57,6	28,8 / 57,6	37,6	57,6
Charge voltage 'float' (VDC)	13,8 / 27,6	13,8 / 27,6 / 55,2	27,6 / 55,2	35,2	55,2
Storage mode (VDC)	13,2 / 26,4	13,2 / 26,4 / 52,8	26,4 / 52,8	32,8	52,8
Charge current house battery (A) <sup>III</sup>	120 / 70	220 / 120 / 70	200 / 110	140	200
Charge current starter battery (A)	4 (12 V and 24 V models only)				
Battery temperature sensor	Yes				

Рис. 3.4. Технічні характеристики інвертора Victron Quattro 48/15000/200-100/100

Згідно даних з рис. 3.4. реальна потужність, яку може забезпечувати інвертор при нормальній температурі експлуатації (25°C) дорівнює 12000 Вт. Тому для практичних розрахунків у даному проєкті слід використовувати саме активну потужність у ватах 12000 Вт.

Сумарна потужність чотирьох інверторів становитиме:

$$P_{4инв} = 4 \cdot 12000 = 48 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт перевантаження для інверторів розраховуємо за формулою:

$$\frac{P_{нDC}}{P_{maxAC}} = k_{перв.}, \% \quad (3.11)$$

$$k_{перв.} = \frac{52,14}{48} = 1,09 = 109 \%$$

Для інверторів Victron Energy зазвичай рекомендується коефіцієнт перевантаження не більше 1,2-1,3 (тобто 120-130%) для забезпечення оптимальної роботи системи в довгостроковій перспективі.

Отже, отриманий під час розрахунків коефіцієнт перевантаження знаходиться в допустимому діапазоні, що забезпечить стабільну роботу всієї системи.

### 3.4. Розрахунок та вибір контролерів заряду

Для ефективного управління зарядом та розрядом акумуляторних батарей необхідно підібрати відповідні контролери заряду. Під час вибору контролерів заряду необхідно врахувати загальну потужність фотомодулів та акумуляторних батарей.

Встановлена потужність АКБ становить 42,62 кВт·год. Для забезпечення оптимальної роботи системи обираємо контролери тієї ж компанії, що й інвертори - Victron Energy Smart Solar.

Для нашої станції оберемо 4 контролер Smart Solar 250/100 та 4 контролери Smart Solar 250/85.

SmartSolar Charge Controller with VE.Can interface	250/70	250/85	250/100
Battery voltage	12/24/48 V Auto Select (36 V: manual)		
Rated charge current	70 A	85 A	100 A
Nominal PV power, 12 V 1a,b)	1000 W	1200 W	1450 W
Nominal PV power, 24 V 1a,b)	2000 W	2400 W	2900 W
Nominal PV power, 36 V 1a,b)	3000 W	3600 W	4350 W
Nominal PV power, 48 V 1a,b)	4000 W	4900 W	5800 W
Max. PV short circuit current 2)	35 A (max 30 A per MC4 conn.)	70 A (max 30 A per MC4 conn.)	
Maximum PV open circuit voltage	250 V absolute maximum coldest conditions 245 V start-up and operating maximum		
Maximum efficiency	99 %		
Self-consumption	Less than 35 mA @ 12 V / 20 mA @ 48 V Default setting: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6 V		
Charge voltage 'absorption'	(adjustable with: rotary switch, display, VE.Direct or Bluetooth) Default setting: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2 V		
Charge voltage 'float'	(adjustable: rotary switch, display, VE.Direct or Bluetooth) Default setting: 16,2 V / 32,4 V / 48,6 V / 64,8 V (adjustable)		
Charge voltage 'equalization'	Default setting: 16,2 V / 32,4 V / 48,6 V / 64,8 V (adjustable)		
Charge algorithm	multi-stage adaptive (eight pre-programmed algorithms) or user defined algorithm		
Temperature compensation	-16 mV / -32 mV / -64 mV / °C		
Protection	PV reverse polarity / Output short circuit / Over temperature		
Operating temperature	-30 to +60 °C (full rated output up to 40 °C)		
Humidity	95 % non-condensing		
Maximum altitude	5000 m (full rated output up to 2000 m)		
Environmental condition	Indoor, unconditioned		
Pollution degree	PD3		
Data communication	VE.Can, VE.Direct and Bluetooth		
Remote on/off	Yes (2 pole connector)		
Programmable relay	DPST AC rating: 240 VAC / 4 A DC rating: 4 A up to 35 VDC, 1 A up to 60 VDC		
Parallel operation	Yes, parallel synchronised operation with VE.Can (max. 25 units) or Bluetooth (max. 10 units)		
<b>ENCLOSURE</b>			
Colour	Blue (RAL 5012)		
PV terminals 3)	35 mm <sup>2</sup> / AWG2 (Tr models) Two pairs of MC4 connectors (MC4 models)	35 mm <sup>2</sup> / AWG2 (Tr models) Three pairs of MC4 connectors (MC4 models)	
Battery terminals	35mm <sup>2</sup> / AWG2		
Protection category	IP43 (electronic components), IP22 (connection area)		
Weight	3 kg	4,5 kg	
Dimensions (h x w x d) in mm	Tr models: 185 x 250 x 95 mm MC4 models: 215 x 250 x 95 mm	Tr models: 216 x 295 x 103 MC4 models: 246 x 295 x 103	

Рис. 3.5. Технічні характеристики контролерів Smart Solar 250/100 та контролерів Smart Solar 250/85

Згідно з інформацією з рис. 3.5. потужність контролера Smart Solar 250/100 приймаємо 5800 Вт, а для контролерів Smart Solar 250/85 - по 4900 Вт. Сумарна потужність контролерів складе:

$$P_{\text{контролера}} = (4 \cdot 5800) + (4 \cdot 4900) = 42800 \text{ Вт} = 42,8 \text{ кВт}$$

Розрахуємо кількість фотомодулів для кожного контролера.

Для контролера Smart Solar 250/100:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{xxPV}} \cdot k_t} = \frac{250}{45,7 \cdot 1,12} = 4,9 \text{ шт} \quad (3.12)$$

де  $U_{\text{max}}$  -максимальна напруга контролера;

$U_{\text{xxPV}}$  - напруга розімкнутого кола фотомодуля Trina Solar TSM-DE21 при STC;

$k_t$  -температурний коефіцієнт для обраної панелі 1,12.

Максимальна напруга контролера = 250 В.

Напруга розімкнутого кола фотомодуля Trina Solar TSM-DE21 при STC = 45,7 В.

Приймаємо 5 панелей у стрінгу.

Кількість паралельно з'єднаних стрінгів обчислимо за даною формулою:

$$n_{\text{посл}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{кзPV}}} = \frac{100}{18,53} = 5,4 \text{ шт} \quad (3.13)$$

де  $I_{\text{max}}$  -максимальний струм контролера, А;

$I_{\text{кзPV}}$  - струм короткого замикання для фотомодуля, А.

Максимальний струм контролера = 100 А.

Струм короткого замикання фотомодуля = 18,53 А.

Приймаємо 5 паралельних стрінгів по 5 панелі. Разом отримуємо масив із 25 фотомодулів для чотирьох контролерів Smart Solar 250/100.

Для контролерів Smart Solar 250/85:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{xxPV}} \cdot k_t} = \frac{250}{45,7 \cdot 1,12} = 4,9 \text{ шт} \quad (3.14)$$

Приймаємо 5 панелей у стрінгу.

Кількість паралельно з'єднаних стрінгів:

$$n_{\text{посл}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{кз PV}}} = \frac{85}{18,53} = 4,51 \text{ шт} \quad (3.15)$$

де  $I_{\text{max}}$  -максимальний струм контролера, А;

$I_{\text{кз PV}}$  - струм короткого замикання для фотомодуля, А.

Максимальний струм контролера = 85 А.

Струм короткого замикання фотомодуля = 18,53 А.

Приймаємо 5 паралельних стрінгів по 4 панелі для кожного з двох контролерів. Разом отримуємо масив із 20 фотомодулів для чотирьох контролерів Smart Solar 250/85.

Загальна кількість фотомодулів для забезпечення заряду АКБ складає:

$(4 \cdot 25) + (4 \cdot 20) = 180$  шт. Оскільки наша станція має 79 панелей, необхідно раціонально розподілити модулі між контролерами:

1-й контролер Smart Solar 250/100: 10 фотомодулів (2 стрінги по 5 панелей);

2-й контролер Smart Solar 250/100: 10 фотомодулів (2 стрінги по 5 панелей);

3-й контролер Smart Solar 250/100: 10 фотомодулів (2 стрінги по 5 панелей);

4-й контролер Smart Solar 250/100: 5 фотомодулів (1 стрінг по 5 панелей);

1-й контролер Smart Solar 250/85: 12 фотомодулів (3 стрінги по 4 панелі).

2-й контролер Smart Solar 250/85: 12 фотомодулів (3 стрінги по 4 панелі).

3-й контролер Smart Solar 250/85: 12 фотомодулів (3 стрінги по 4 панелі).

4-й контролер Smart Solar 250/85: 8 фотомодулів (2 стрінги по 4 панелі).

Такий розподіл забезпечує використання всіх 79 фотомодулів, рівномірне навантаження на контролери відносно їх максимальної потужності.

### 3.5. Вибір резервного генератора

Для забезпечення безперебійного електропостачання в умовах тривалої відсутності сонячної генерації та розряду акумуляторів, проектується резервний генератор постійного струму. Генератор повинен забезпечувати належний заряд акумуляторних батарей PylonTech Force L1, які мають номінальну напругу 48 В.

Умова вибору генератора:

$$P_{ген.} \geq P_{заряд.} \quad (3.16)$$

де  $P_{ген}$  - потужність генератора;

$P_{заряд.}$  - потужність, необхідна для заряду акумуляторних батарей.

Потужність заряду розраховується за формулою:

$$P_{заряд.} = U_{бат.} \cdot I_{заряд.} \quad (3.17)$$

де  $U_{бат.}$  – номінальна напруга батарей (48 В);

$I_{заряд.}$  – струм заряду батарей.

Відповідно до характеристик батарей PylonTech Force L1, максимальний струм заряду становить 50 А для безпечного режиму заряду.

$$P_{заряд.} = 48 \cdot 50 = 2400 \text{ Вт} = 2,4 \text{ кВт}$$

Основні вимоги до генератора:

- Постійний струм на виході (DC)
- Вихідна напруга 48-55 В
- Струм заряду не менше 50 А
- Бензиновий двигун
- Автоматичний запуск
- Ручний/зовнішній запуск

Відповідно до вказаних вимог обираємо генератор Könnner & Söhnen KS 48V-DC, який забезпечить надійний заряд акумуляторних батарей PylonTech Force L1 [12].



Рис. 3.6. Бензиновий генератор постійного струму KS 48V-DC

Таблиця 3.4.

#### Технічні характеристики генератора постійного струму KS 48V-DC

Параметр	Значення
Максимальний струм	60 А
Вихідна напруга	48-55 В
Тип запуску	ручний/автоматичний
Тип палива	бензин
Габарити (ДхШхВ)	510×525×310 мм
Вага нетто	36.5 кг

Перевіримо умову вибору генератора:

$$P_{ген.} = U_{вих.} \cdot I_{макс.} \quad (3.18)$$

$$P_{ген.} = 48 \cdot 60 = 2880 \text{ Вт} = 2,8 \text{ кВт}$$

$$P_{заряд.} = 2,4 \text{ кВт}$$

$$2,88 \text{ кВт} > 2,4 \text{ кВт}$$

Умова виконується, отже, генератор вибрано правильно.

Обраний генератор KS 48V-DC має також такі переваги:

- Підключається безпосередньо до батарей, що спрощує інсталяцію
- Має автоматичний режим роботи з відстеженням напруги батарей

- Забезпечує швидший заряд у порівнянні з генераторами змінного струму
- Обладнаний захистом від перенавантаження та короткого замикання
- Має індикацію ключових показників (вольтметр, амперметр)



Рис. 3.7. Схема інтеграції генератора в автономну систему

### 3.6. Вибір системи кріплення

Враховуючи особливості розташування фотомодулів на скатах даху, необхідно підібрати надійну та ефективну систему кріплення. Для забезпечення легкого монтажу та оптимальних вагогабаритних характеристик обрано систему кріплень String Setter.

Для монтажу фотомодулів Trina Solar TSM-DE21 на даху з металочерепицею пропонується використати алюмінієві конструкції. Дані алюмінієві конструкції характеризуються високою міцністю, довговічністю та стійкістю до атмосферних впливів. Для проектованої станції обрано комплекти кріплень:

Для 1-го контролера Smart Solar 250/100 (10 фотомодулів): 2 стрінги по 5 панелей → 2× комплект SS05

Для 2-го контролера Smart Solar 250/100 (10 фотомодулів): 2 стрінги по 5 панелей → 2× комплект SS05

Для 3-го контролера Smart Solar 250/100 (10 фотомодулів): 2 стрінги по 5 панелей → 2× комплект SS05

Для 4-го контролера Smart Solar 250/100 (5 фотомодулів): 1 стрінг по 5 панелей → 1× комплект SS05

Для 1-го контролера Smart Solar 250/85 (12 фотомодулів): 3 стрінги по 4 панелі → 3× комплект SS04

Для 2-го контролера Smart Solar 250/85 (12 фотомодулів): 3 стрінги по 4 панелі → 3× комплект SS04

Для 3-го контролера Smart Solar 250/85 (12 фотомодулів): 3 стрінги по 4 панелі → 3× комплект SS04

Для 4-го контролера Smart Solar 250/85 (8 фотомодулів): 2 стрінги по 4 панелі → 2× комплект SS04

Сумарно для монтажу 79 фотомодулів Trina Solar TSM-DE21 необхідно замовити:

7× комплект String Setter SS05 (для 35 панелей)

11× комплект String Setter SS04 (для 44 панелей)

Додатково необхідно придбати набір спеціальних кріплень для металочерепиці, що забезпечить надійну фіксацію конструкції та збереження цілісності покрівлі.

### **3.7. Висновки по розділу 3**

В результаті проведених розрахунків було спроектовано автономну фотоелектричну станцію наступної конфігурації:

1. Фотомодулі – 79 шт. Trina Solar TSM-DE21 (загальна потужність 52,14 кВт).

2. Інвертори – 4 шт. Victron Energy Quattro 48/15000/200-100/100 (загальна потужність 48 кВт).

3. Акумуляторні батареї – 2 стеки Force L1 з 6 модулів фірми PylonTech. (загальна ємність 42,62 кВт·год).

4. Контролери заряду – 4 шт. Victron Energy Smart Solar 250/100 та 4 шт. Smart Solar 250/85.

5. Резервний генератор – Könnner & Söhnen KS 48V-DC.

## 6. Система кріплень – комплекти String Setter.

Дана конфігурація забезпечить надійне електропостачання об'єкта як в режимі нормальної роботи так і в аварійних режимах (за рахунок акумуляторів та резервного генератора).

## РОЗДІЛ 4

### ЗАХИСТ І ДОДАТКОВІ КОМПОНЕНТИ

#### 4.1. Захист СЕС по постійному та змінному струмі

На початковому етапі проведемо вибір захисту по змінному струмі для забезпечення захисту інвертора. Для цього застосуємо автоматичний вимикач, який буде встановлено у ВРП об'єкту. Визначимо основні параметри, необхідні для вибору автоматичного вимикача:

$$I_n \geq I_p \quad (4.1)$$

Це означає, що номінальний струм автоматичного вимикача ( $I_n$ ) повинен бути більшим або рівним розрахунковому струму навантаження ( $I_p$ ) [13]. Тобто автомат має бути розрахований на струм, який не менший за той, що буде проходити через нього при нормальній роботі системи.

$$I_{n,розч} \geq 1,25 \cdot I_p \quad (4.2)$$

Номінальний струм розчеплювача автоматичного вимикача ( $I_{n,розч}$ ) повинен бути більшим або рівним розрахунковому струму з коефіцієнтом запасу 1,25. Це забезпечує запас надійності, щоб автомат не спрацював при короткочасних перевантаженнях.

$$I_{кз} \geq I_{кз \text{ макс}} \quad (4.3)$$

Струм короткого замикання автоматичного вимикача ( $I_{кз}$ ) повинен бути більшим або рівним максимальному струму короткого замикання ( $I_{кз \text{ макс}}$ ), який може виникнути в системі. Цей параметр гарантує, що автомат зможе безпечно вимкнути коло при короткому замиканні.

Також для вибору автоматичного вимикача потрібні наступні параметри:

$$U_n = 380 \text{ В};$$

$$P_{інв} = 48 \text{ кВт}$$

$$\cos \varphi = 0,92$$

Розрахуємо розрахунковий струм навантаження на ввіді ВРП:

$$I_{\text{р.н.}} = \frac{P_{\text{інв}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi} = \frac{48}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,92} = 74,32 \text{ А}$$

Враховуючи отримані дані, приймаємо до встановлення автоматичний вимикач Schneider Electric EasyPact EZC100N 3P 80A [14].



Рис. 4.1. Автоматичний вимикач Schneider Electric EasyPact EZC100N 3P 80A

Для захисту по постійному струмі зі сторони фотомодулів необхідно обрати пристрій, що спрацюватиме при зовнішніх і внутрішніх перенапругах, а також зможе захистити фотомодулі від надструмів. Для цього оберемо пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) Schneider Electric iPRD 40r 3P+N. Для захисту самого ПЗІП використовується окремий вимикач малого номіналу (зазвичай 16-25 А з характеристикою С). Відповідно до рекомендацій компанії Schneider Electric, для надійного захисту пристрою захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) серії iPRD або iPF у трифазній системі електропостачання доцільно встановлювати автоматичний вимикач з номінальним струмом 20А. Такий номінал є технічно обґрунтованим, оскільки забезпечує належний захист ПЗІП від можливих внутрішніх коротких замикань та водночас запобігає випадковим відключенням під час нормального

функціонування системи. Враховуючи наведені вимоги та проаналізувавши каталог продукції, для нашого проекту СЕС обираємо автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N 3P C20A з характеристикою спрацювання типу С, яка оптимально підходить для захисту електронних пристроїв.

Для захисту від надструмів по стороні фотомодулів застосуємо запобіжники.

Умова вибору запобіжників:

$$(4.4) \quad I_n \geq 1,25 \cdot I_{ск}$$

Враховуючи те, що при розрахунку було розраховано, що деякі стрінги мають по 5 фотомодулів, а один складається з 4 фотомодулів, то проведемо розрахунок для стрінгу із п'яти фотомодулів:

$$I_{ск} = 5 \cdot 18,53 = 92,65 \text{ A}$$

Розрахунковий струм з коефіцієнтом запасу:

$$1,25 \cdot I_{ск} = 1,25 \cdot 92,65 = 115,81 \text{ A}$$

Найкращим варіантом будуть запобіжники Schneider Electric серії DF Electric gPV, оскільки даний запобіжник спеціально розроблений для захисту фотоелектричних систем:

- Schneider Electric DF Electric NH1 gPV 125A 1000V DC
- Номінальний струм: 125A (найближчий стандартний номінал вище 115,81 A).
- Категорія використання: gPV (спеціальна для фотоелектричних систем).
- Напруга: 1000V DC (стандартна для СЕС).
- Розмір: NH1 (стандартний).

Перевіряємо чи виконується умова вибору запобіжника:

$$125 > 115,81$$

Отже, умова виконуються, запобіжники вибрано правильно.

Аналогічний розрахунок проводимо для стрінгу який складається з чотирьох фотомодулів:

$$I_{\text{ск}} = 4 \cdot 18,53 = 74,12 \text{ A}$$

Розрахунковий струм з коефіцієнтом запасу:

$$1,25 \cdot I_{\text{ск}} = 1,25 \cdot 74,12 = 92,65 \text{ A}$$

Отже обираємо запобіжник Schneider Electric DF Electric NH1 gPV 100A 1000V DC, який має наступні характеристики:

- Номінальний струм 100А (найближчий стандартний номінал вище 92,65 А)
- Номінальна напруга 1000В
- Тип захисту: gPV
- Розмір: NH1 (стандартний).

Також для встановлення цих запобіжників необхідно обрати відповідний тримач запобіжників розміру NH1 на напругу 1000V DC, наприклад, Schneider Electric DF Electric PMF 1000V DC.

Перевіряємо чи виконується умова вибору запобіжника:

$$100 > 95,65$$

Отже, умова виконуються, запобіжники вибрано правильно.

Захист по постійному струму зі сторони АКБ. Захист виконаємо теж проти надструмів, тому використаємо знову запобіжники.

Умова вибору запобіжників:

$$I_{\text{розр. АКБ}} < I_{\text{пл.вст.}} \quad (4.5)$$

Згідно даних з таблиці 3.1. струм розряду і заряду для батареї PylonTech Force L1 (6 модулів) складає 90 А. Обираємо запобіжник зі стандартного ряду номіналів:

$$I_{\text{пл.вст.}} = 100 \text{ A}$$

Перевіримо умову вибору:

$$90 < 100$$

Запобіжники вибрано правильно.

Отже обираємо запобіжник фірми АВВ OFAF00H100 [15]. Основні технічні характеристики АВВ OFAF00H100:

- Номінальний струм: 100 А
- Розмір (типорозмір): NH000 (типорозмір 00)
- Номінальна напруга DC: 80 В постійного струму
- Номінальна напруга AC: 500 В змінного струму
- Клас роботи: gG (загального призначення)
- Відключаюча здатність: 120 кА
- Температурний діапазон роботи: від  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$
- Втрати потужності (приблизно): 7,5 Вт при номінальному струмі
- Матеріал корпусу: кераміка
- Індикатор спрацювання: є
- Відповідність стандартам: IEC 60269, VDE 0636
- Габаритні розміри: приблизно  $78 \times 45 \times 20$  мм

#### **4.2. Облік і панель віддаленого керування**

У проєкті автономної сонячної електростанції, яка працює без підключення до зовнішньої мережі, важливо мати надійні засоби контролю за споживанням та виробленням електроенергії. З цією метою було обрано лічильник Shelly 3EM, який здатен вимірювати потужність по трьох фазах і передавати дані через Wi-Fi [16]. Він надає змогу в режимі реального часу бачити, скільки енергії виробляє станція, скільки споживається і який баланс у системі. Ці дані можна переглядати з телефона або комп'ютера через додаток Shelly, що дуже зручно для щоденного користування.

Окремо варто згадати технічні можливості Shelly 3EM, серед яких:

- підтримка трьох незалежних каналів вимірювання струму (до 120 А кожен);
- точність вимірювання близько 1%;
- інтеграція через MQTT, Modbus або HTTP API;

- можливість роботи без шлюзів, напряму через Wi-Fi;
- збереження історії даних навіть при відсутності інтернету.



Рис. 4.2. Лічильник Shelly 3EM

Однак, для повноцінного керування всією енергосистемою та координації роботи обладнання компанії Victron Energy (інверторів, контролерів заряду, акумуляторів), у проєкті також використовується панель Cerbo GX. Вона виконує роль «мозкового центру» всієї установки, об'єднуючи всі пристрої в єдину систему керування.

Оскільки вся система побудована на обладнанні Victron, наявність Cerbo GX значно спрощує роботу з системою, дозволяє швидко виявляти проблеми та ефективно розподіляти навантаження. У поєднанні з лічильником Shelly 3EM це забезпечує повноцінну картину енергоспоживання та допомагає вчасно реагувати на зміни в роботі станції.



Рис. 4.3. Панель управління Victron Energy Cerbo GX

Загалом, поєднання Shelly 3EM та Cerbo GX дозволяє зробити систему не лише надійною, а й зручною у користуванні. Це рішення добре підходить для автономної електростанції, яка має стабільно працювати в будь-який сезон.

#### 4.3. Висновки по розділу 4

На основі проведених розрахунків для захисту за змінним струмом обрано автоматичний вимикач Schneider Electric EasyPact EZC100N 3P 80A, що відповідає розрахунковому струму навантаження з необхідним запасом. Захист за постійним струмом реалізовано комбінацією пристрою захисту від імпульсних перенапруг Schneider Electric iPRD 40r 3P+N та вимикача Acti9 iC60N 3P C20A.

Для стрінгів фотомодулів підбрано запобіжники Schneider Electric DF Electric NH1 gPV номіналом 125 A та 100A на 1000V DC, а захист акумуляторних батарей забезпечується запобіжником ABB OFAF00H100. Система обліку побудована на базі лічильника Shelly 3EM з функцією віддаленого доступу, а координацію всього обладнання здійснює панель керування Victron Energy Cerbo GX.

Обрані технічні рішення утворюють комплексну систему захисту та моніторингу, яка відповідає розрахунковим параметрам та гарантує надійну роботу станції. Поєднання захисного обладнання з сучасними засобами

контролю забезпечує не тільки безпеку експлуатації, але й зручність керування автономною сонячною електростанцією в різних умовах роботи.

## РОЗДІЛ 5

### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СЕС У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ PVGIS ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

#### 5.1. Загальні відомості про програмне середовище

Сучасне проектування сонячних електростанцій неможливе без використання передових геоінформаційних систем моделювання. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) є провідним інструментом, розробленим Об'єднаним дослідницьким центром Європейської комісії, який забезпечує комплексний та високоточний аналіз потенціалу сонячної електрогенерації.

Унікальність PVGIS полягає в її науково обґрунтованій методології, що базується на багаторічних кліматичних дослідженнях та використанні перевірених математичних моделей. Система інтегрує широкий спектр супутникових даних, що дозволяє максимально точно враховувати локальні кліматичні особливості та мікрорельєф місцевості. Особливою перевагою є можливість деталізованого аналізу сонячної радіації з урахуванням мінімальних географічних варіацій, що робить результати моделювання максимально наближеними до реальних умов.

Важливою складовою системи є її здатність проводити багатопараметричну оцінку ефективності сонячних електростанцій. Інструмент надає комплексну інформацію про місячну та річну генерацію електроенергії, дозволяє прогнозувати потенційні втрати та оцінювати загальну ефективність фотоелектричної системи. Додатковою перевагою є безкоштовний доступ та постійне оновлення картографічної та кліматичної інформації, що робить PVGIS незамінним інструментом для науковців, інженерів та проектувальників у сфері відновлюваної енергетики.

Результати моделювання в PVGIS виходять далеко за межі простого прогнозування потенційної генерації електроенергії. Вони надають унікальну можливість оптимізації технічних параметрів сонячної електростанції ще на

етапі проектування, дозволяючи мінімізувати витрати та максимізувати ефективність майбутньої інсталяції.

## 5.2. Визначення оптимального кута нахилу сонячних фотомодулів

Об'єкт який проектується розташований в Житомирській області Чижівській сільській громаді Звягельського району в селі Яблунівка. Координати об'єкту  $50.780^{\circ}$  північної широти,  $27.806^{\circ}$  східної довготи.

Якщо панелі встановлюються стаціонарно (без можливості регулювання), то оптимальний річний кут нахилу для Житомирської області становить  $35\text{--}45^{\circ}$ , залежно від місцевих умов. Даний діапазон є занадто широким і становить  $10^{\circ}$ . Враховуючи результати попередніх досліджень під час яких було виявлено, що навіть незначні відхилення від оптимального кута нахилу призводять до помітного зниження продуктивності системи. Беручи до уваги інформацію, було прийнято рішення для визначення найбільш оптимального кута нахилу фотомодулів. Для визначення оптимального кута нахилу фотомодулів було проведено моделювання у програмному середовищі PVGIS [17].

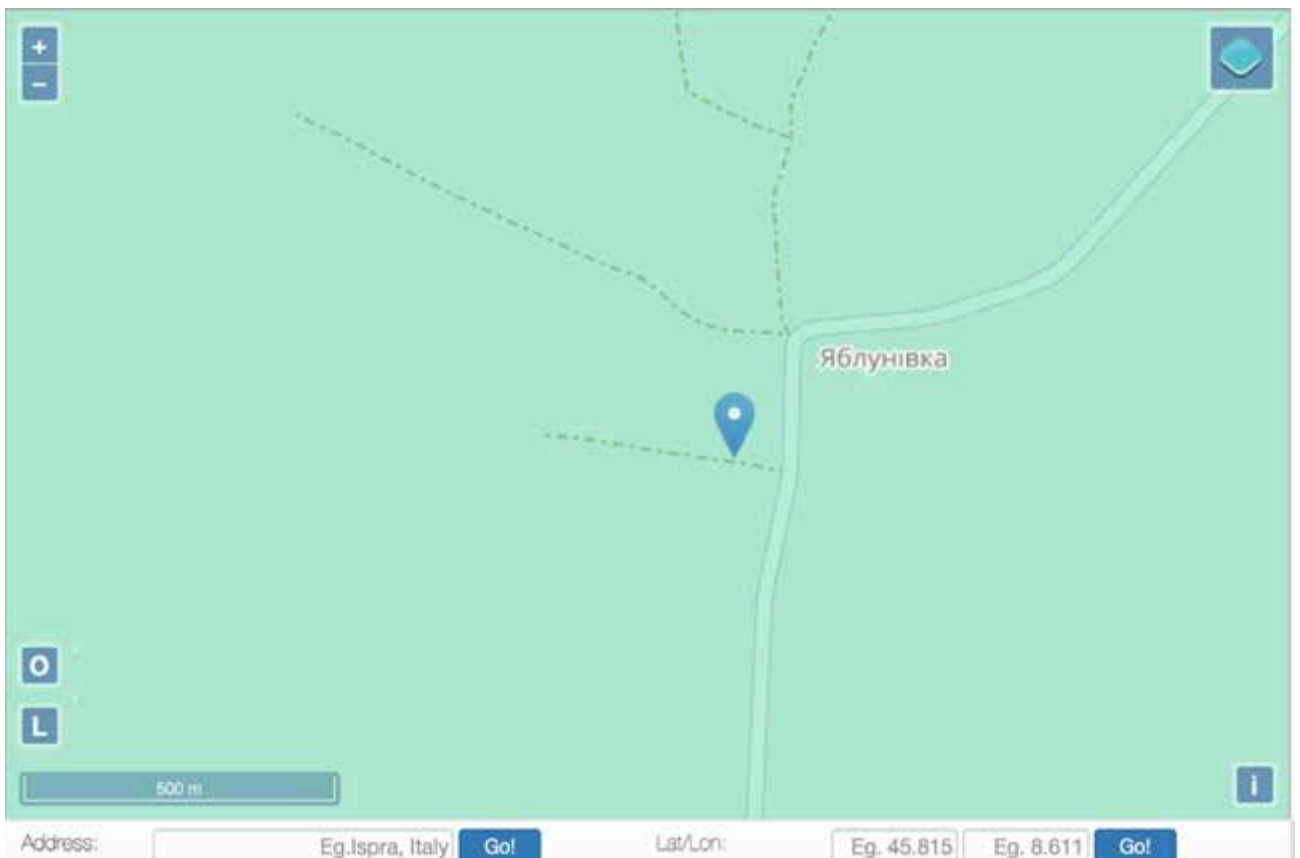


Рис. 5.1. Місце розташування об'єкта моделювання

Для моделювання було обрано кут нахилу  $35^\circ$ ,  $40^\circ$  та  $45^\circ$ . Згідно результатів моделювання було отримано показники середньомісячної генерації електроенергії для кожного обраного кута нахилу. Результати отримані під час моделювання наведені в додатку А.1.

Згідно отриманих результатів моделювання, вперше було виявлено, що для даної місцевості найбільш оптимальний річний кут нахилу фотомодулів становить  $40^\circ$ . Для реалізації оптимального кута нахилу при встановленні на даху будівлі можуть застосовуватися спеціалізовані дахові підтримуючі конструкції, які забезпечують необхідне позиціонування фотомодулів відносно горизонтальної площини незалежно від кута нахилу самого даху. Результати моделювання наведені в додатку А.2.

### 5.3. Моделювання роботи СЕС у програмному середовищі PVGIS

Визначивши оптимальний кут нахилу для даної місцевості набуло подальшого розвитку дослідження режиму роботи СЕС в залежності від сезонності.

Таблиця 5.1.

#### Результати моделювання роботи СЕС у програмі PVGIS

Місяць	$E_m$ (кВт·год)	$H(i)_m$ (кВт·год/м <sup>2</sup> )	$SD_m$ (кВт·год)
Січень	2065,2	43,2	675,6
Лютий	3778,7	78,5	813,5
Березень	6278,5	135,4	1291,7
Квітень	8308,6	187	1617,3
Травень	9622,5	223,2	1314,5
Червень	10464,6	246,7	793,0
Липень	10202,7	241,4	725,7
Серпень	9869,9	234	994,0
Вересень	7794,4	178,2	1471,5
Жовтень	5378,3	118,1	1345,0

Листопад	2227,1	48,1	489,5
Грудень	1649,9	35,1	473,3
За рік	77640,40	1725,70	12004,60

$E_m$ : Середньомісячне виробництво електроенергії (кВт·год);

$H(i)_m$ : Середньомісячна сума глобальної сонячної радіації на квадратний метр (кВт·год/м<sup>2</sup>);

$SD_m$ : Стандартне відхилення місячного виробництва електроенергії (кВт·год).

Результати які отримали під час моделювання, та дані з Таблиці 5.1, відображені на графіку Рис. 5.2, та Рис. 5.3.

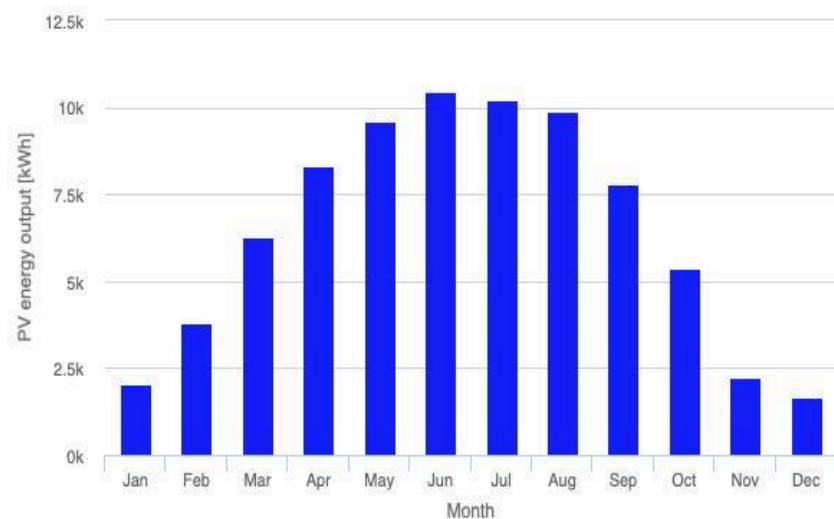


Рис. 5.2. Місячний виробіток електроенергії сонячною електростанцією з фіксованим кутом



Рис. 5.3. Щомісячне опромінення в площині для фіксованого кута

На основі результатів моделювання в PVGIS які наведені в додатку А.3 можемо констатувати, що найбільш сприятливими місяцями для генерації електроенергії є літні місяці, зокрема червень з максимальною генерацією 10464,6 кВт·год, липень з показником 10202,7 кВт·год та серпень з 9869,9 кВт·год, які забезпечують майже третину річної генерації електроенергії, тоді як найменш сприятливими є зимові місяці, передусім грудень з мінімальною генерацією 1649,9 кВт·год та січень з 2065,2 кВт·год, що пов'язано з короткою тривалістю світлового дня, низькою інтенсивністю сонячної радіації та несприятливими кліматичними умовами в цей період. В інші місяці, починаючи з березня і до жовтня включно, система стабільно забезпечує споживання енергії, з високим рівнем повного заряду батареї.

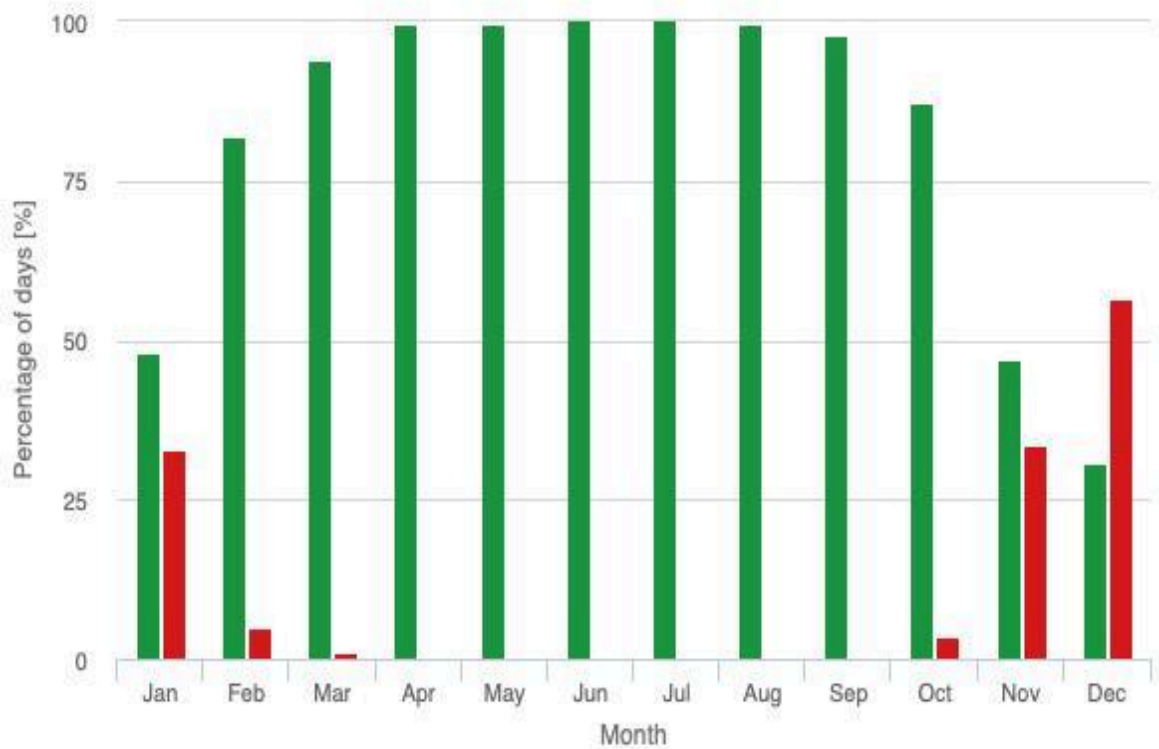


Рис. 5.4. Продуктивність акумуляторної батареї автономної сонячної електростанції

На Рис. 5.4 відображені результати моделювання роботи фотовольтаїчної системи, де зеленим коляром відображено кількість днів у відсотковому відношенні коли акумулятори повністю заряджені, та червоним коляром дні із розрядженими акумуляторами.

Також додано графік на якому відображено рівень заряду акумулятора в кінці дня.

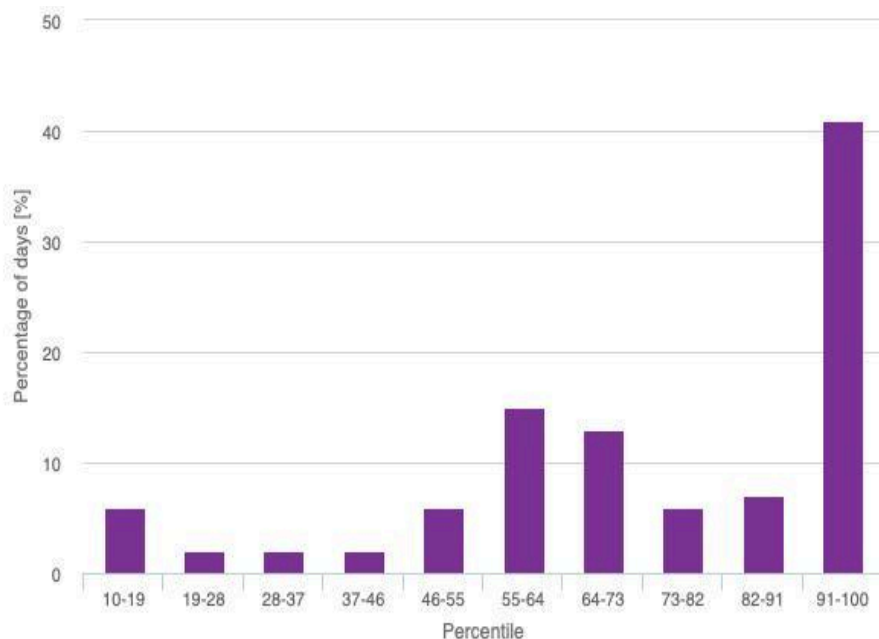


Рис. 5.5. Рівень заряду акумулятора в кінці дня

Для забезпечення зручності аналізу та підвищення ефективності сприйняття експериментальних даних, отриманих під час процесу моделювання, перенесено графічні результати до структурованої таблиці.

Таблиця 5.2.

#### Рівень заряду акумуляторів у кінці дня.

Діапазон заряду (%)	Відсоток днів (%)
10-19	6.0
19-28	2.0
28-37	2.0
37-46	2.0
46-55	6.0
55-64	15.0
64-73	13.0
73-82	6.0
82-91	7.0
91-100	41.0

Отже проаналізувавши отримані результати модулювання ми можемо побачити, що сонячна електростанція демонструє здатність адаптуватися до

сезонних змін протягом року. Система працює майже ідеально в різні пори року, показуючи свою гнучкість та ефективність.

Влітку електростанція практично повністю забезпечує домогосподарство електроенергією безпосередньо від сонячних панелей. Акумуляторні батареї майже не розряджаються, оскільки сонячної генерації вистачає для повного покриття щоденних потреб. Це означає, що влітку батареї перебувають у найбільш сприятливому режимі - майже постійно заряджені.

Зимового періоду система також намагається максимально ефективно використати обмежену сонячну генерацію. Навіть при низькій активності сонця батареї щодня забезпечують електроенергією домогосподарство, що є принципово важливим.

Особливо цікавим є розподіл заряду акумуляторів: 41% днів батареї мають практично повний заряд (94-100%), що свідчить про значний запас потужності системи. Решта днів мають більш-менш рівномірний розподіл рівнів заряду, що вказує на стабільність роботи.

Аналіз засвідчив значне перевищення обсягу виробленої електроенергії протягом більшої частини року. Нині цей надлишок не акумулюється, через обмежену ємність акумуляторів. Разом з тим, це може бути хорошою перспективою для майбутнього розвитку системи. У разі зростання споживання енергії можна просто додати додаткові акумулятори, невдаючись до модернізації сонячної електростанції — наявної потужності цілком вистачить для їхнього заряджання.

З урахуванням того, що упродовж більшої частини року система генерує істотний надлишок електроенергії, доцільним є його цільове використання –зокрема, для заряджання електромобіля. Це дозволить ефективно розподіляти надлишкову генерацію без потреби в додаткових накопичувачах. Для інтеграції електромобіля в систему передбачається встановлення окремої зарядної станції типу AC (Mode 3), безпосередньо підключеної до інверторної частини СЕС через окремий автомат захисту. Завдяки інтелектуальній логіці керування

зарядом, яка вже реалізована в сучасних інверторах, процес заряджання буде відбуватись переважно в денні години – тобто в періоди максимальної сонячної генерації. Таким чином, система забезпечить оптимальне використання ресурсів без перевантаження батарей, підвищуючи загальний коефіцієнт корисної дії установки.

Загалом, сонячна електростанція демонструє високу надійність та здатність ефективно працювати в різних погодних умовах, забезпечуючи стабільне електропостачання протягом усього року.

#### 5.4. Техніко-економічне обґрунтування

Для того щоб прийняти зважене рішення щодо доцільності впровадження автономної системи електроживлення приватного домогосподарства з використанням ВДЕ, потрібно здійснити всебічний економічний аналіз проєкту. В рамках цього підрозділу зроблено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат, що стосуються впровадження автономної СЕС, оцінку можливої економічної вигоди та періоду окупності інвестицій.

Для початку необхідно визначити вартість обладнання та вартість монтажних і пусконаладжувальних робіт. Для забезпечення зручності аналізу та підвищення ефективності сприйняття даних всі дані занесемо до структурованої таблиці.

Таблиця 5.3.

#### Рівень заряду акумуляторів у кінці дня.

№	Найменування обладнання	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна вартість, \$
1	Фотомодулі Trina Solar TSM-DE21 (660 Вт)	79	250	19 750
2	Інвертори Victron Quattro 48/15000/200-100/100	4	5 800	23 200
3	Акумуляторні батареї PylonTech Force L1 (6 модулів, 2 стеки)	12	1 800	21 600
4	Контролери заряду Victron Energy Smart Solar 250/100	4	1 200	4 800
5	Контролери заряду Victron Energy Smart Solar 250/85	4	980	3 920

№	Найменування обладнання	Кількіс ть	Ціна за одиницю, \$	Загальна вартість, \$
6	Резервний генератор Karcher 3 кВт PGG 3/1	1	950	950
7	Система кріплень String Setter SS05	7	180	1 260
8	Система кріплень String Setter SS04	11	160	1 760
9	Автоматичний вимикач Schneider Electric EasyPact EZC100N 3P 80A	1	120	120
10	ПЗП Schneider Electric iPRD 40r 3P+N	1	180	180
11	Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N 3P C20A	1	75	75
12	Запобіжник Schneider Electric DF Electric NH1 gPV 125A 1000V DC	7	40	280
13	Запобіжник Schneider Electric DF Electric NH1 gPV 125A 1000V DC	11	35	385
14	Тримач запобіжників Schneider Electric DF Electric PMF 1000V DC	18	25	450
15	Запобіжник ABB OFAF00H100	2	30	60
16	Лічильник Shelly 3EM	1	140	140
17	Панель керування Victron Energy Cerbo GX	1	450	450
18	Кабелі та додаткові комплектуючі	1	1 500	1 500
	<b>Разом за обладнання</b>			<b>80 880</b>
	<b>Вартість монтажних та пусконаладжувальних робіт (10%)</b>			<b>8 088</b>
	<b>Загальна вартість проекту</b>			<b>88 968</b>

Отже, річне виробництво електроенергії обчислюється за формулою:

$$E_{\text{річ.}} = P_{\text{сист.}} \cdot T_{\text{роб}} \cdot D \quad (5.1)$$

де  $P_{\text{сист.}}$  – встановлена потужність системи (кВт);

$T_{\text{роб}}$  – середня кількість годин роботи системи на добу;

$D$  – кількість днів у році (зазвичай 365).

У Житомирській області сонячні електростанції працюють у режимі високої продуктивності (60-100% потужності) приблизно 6 годин щоденно впродовж року. Отже  $T_{\text{роб}} = 6$ .

$$E_{\text{річ.}} = 52,14 \cdot 6 \cdot 365 = 114186,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річна економія коштів обчислюється за формулою:

$$S_{\text{річ.}} = E_{\text{річ.}} \cdot C \quad (5.2)$$

де  $C$  – тариф на електроенергію.

На сьогодні тариф на електроенергію для побутових споживачів становить 4,32 грн/кВт·год. Враховуючи можливе здорожчання електроенергії в майбутньому, у розрахунках доцільно використовувати підвищене значення вартості електроенергії. Для оцінки економічної ефективності приймається тариф 6 грн/кВт·год. Це дозволяє точніше врахувати потенційні зміни й реалістичніше спрогнозувати окупність системи.

$$S_{\text{річ.}} = 114186,6 \cdot 6 = 685119,6 \text{ грн}$$

Реальний коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$R_e = \frac{S_{\text{річ.}}}{C_{\text{варт. облад.}}} \quad (5.3)$$

де  $S_{\text{річ.}}$  – щорічна економія коштів;

$C_{\text{варт. облад.}}$  – загальна вартість обладнання.

Загальна вартість проекту становить 88 968 доларів, враховуючи те, що курс долара в Україні становить 41 гривню, то вартість проекту в гривнях буде становити 3 647 688. Отже знаючи вартість проекту, розрахуємо реальний коефіцієнт.

$$R_e = \frac{685119,6}{3647688} = 0,188$$

Термін окупності обчислюється за формулою:

$$T_{\text{окуп.}} = \frac{1}{R_e} \quad (5.4)$$

де  $R_e$  – реальний коефіцієнт.

$$T_{\text{окуп.}} = \frac{1}{0,188} = 5,3$$

Отже окупність даного проекту буде становити 5 років і 3 місяці [18]. Також варто зазначити, що розрахована станція не являється комерційною та має трохи довший термін окупності у порівнянні з мережевою чи гібридною.

Довший термін окупності зумовлений наявністю акумуляторних батарей які складають значну частину від вартості даного проєкту. Додатково слід зазначити, що задача даної СЕС забезпечити безперебійне електропостачання приватного домогосподарства протягом 24 годин. Варто зазначити, що дана система повністю виконує завдання по забезпеченню електропостачанням приватного домогосподарства, тому такий термін окупності є цілком оправданим. Відповідно рівень високого комфорту є найбільшим показником ефективності для даної системи.

### **5.5. Висновки по розділу 5**

У даному розділі було проведено моделювання та за отриманими результатами було визначено, що оптимальний фіксований кут нахилу фотомодулів для даної місцевості становить  $40^\circ$ .

Також набуло подальшого розвитку дослідження режиму роботи СЕС в залежності від сезонності. За результатами моделювання було визначено, що найбільш сприятливими місяцями для генерації електроенергії є літні місяці, тоді як найменш сприятливими є зимові місяці. Дана ситуація напряму пов'язана з короткою тривалістю світлового дня, низькою інтенсивністю сонячної радіації та несприятливими кліматичними умовами в цей період. Водночас було виявлено, що змодельована генерація сонячної електростанції у літні місяці перевищує потреби об'єкта, що підтверджується частими випадками повного заряду акумуляторних батарей. Зокрема, 41% днів у році батареї досягають рівня заряду понад 94%, що свідчить про стабільний запас потужності системи навіть у зимовий період.

Також у даному розділі визначено термін окупності даної автономної системи, який становить 5 років і 3 місяці. Такий результат підтверджує доцільність і практичну ефективність впровадження автономної СЕС як джерела енергопостачання, що забезпечує енергетичну незалежність та економічну стабільність для приватного споживача.

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### **6.1. Аналіз виробничих небезпек під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок**

Сонячні фотоелектричні установки, зокрема автономні системи для приватних домогосподарств, стають дедалі популярнішими завдяки їхній енергоефективності та екологічності. Проте, як і будь-які інженерні системи, вони супроводжуються певними виробничими небезпеками. Основні загрози, пов'язані з експлуатацією сонячних фотоелектричних установок, можна умовно поділити на електротехнічні, механічні, пожежні та організаційні ризики.

До електротехнічних ризиків належить можливість ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, неправильного підключення, відсутності або недостатності захисного заземлення. Особливо це актуально для приватних СЕС, де монтаж часто виконується без участі професійних електриків. Нормативною основою для безпечної експлуатації таких установок є НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», які вимагають наявності чіткого поділу на струмопровідні та захисні елементи, перевірку цілісності ізоляції, а також постійний контроль за станом обладнання [19].

Механічні ризики можуть виникати під час встановлення або обслуговування фотоелектричних панелей, інверторів чи акумуляторних батарей. Падіння з висоти, особливо під час монтажу на дахах, а також удари або защемлення є типовими виробничими небезпеками. Вимоги до безпеки праці при роботі на висоті викладені в ДБН А.3.2-2-2009 та НПАОП 0.00-1.15-07 [20-21].

Пожежні ризики пов'язані з можливим перегрівом елементів електричного кола, короткими замиканнями або несправностями акумуляторних батарей. Встановлення пристроїв автоматичного відключення при перевантаженнях та коротких замиканнях є обов'язковим згідно з

ПУЕ [22]. Крім того, необхідно забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники.

Організаційні ризики – це недотримання інструкцій з експлуатації обладнання, відсутність інструктажів та невідповідна кваліфікація осіб, які здійснюють обслуговування системи. Відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05, навіть у приватному домогосподарстві власник електроустановки зобов'язаний проходити інструктаж з електробезпеки, якщо самостійно обслуговує систему, або доручати це кваліфікованим фахівцям [23].

## **6.2. Оцінка рівня небезпеки виникнення аварій і травм під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок**

Для повного уявлення про ризики, що виникають при експлуатації автономної сонячної електростанції у приватному будинку, доцільно проаналізувати можливі сценарії аварій та нещасних випадків. Один з найтипівіших ризиків – ураження електричним струмом під час технічного обслуговування обладнання, особливо інвертора або акумуляторних батарей.

На рисунку 6.1 представлено логіко-імітаційну модель виникнення травматичної ситуації, яка демонструє, як взаємопов'язані різні фактори ризику можуть призвести до ураження електричним струмом. Кожен елемент схеми позначає ймовірність настання певної події або її вплив на загальний ризик.

Найвища ймовірність аварійної ситуації спостерігається при поєднанні декількох негативних чинників, як-от обслуговування обладнання без зняття напруги, низький стан контролю та помилки персоналу. Як видно з моделі, кінцева ймовірність ураження струмом оцінюється як висока, що свідчить про необхідність впровадження профілактичних заходів та постійного навчання персоналу.

Основні критичні вузли моделі:

- Поява напруги на корпусі інвертора: це може статися через внутрішню несправність або порушення ізоляції.

- Відсутність або несправність заземлення: одна з головних причин, яка перетворює потенційно безпечну ситуацію на небезпечну.
- Обслуговування системи під напругою: типова ситуація, коли власник самостійно намагається щось перевірити або замінити без вимкнення живлення.
- Недостатня кваліфікація користувача: часто в приватних умовах обслуговування виконується людьми без спеціальної підготовки.
- Відсутність постійного контролю за станом обладнання: зниження уваги до планового обслуговування значно підвищує ризик несправностей.

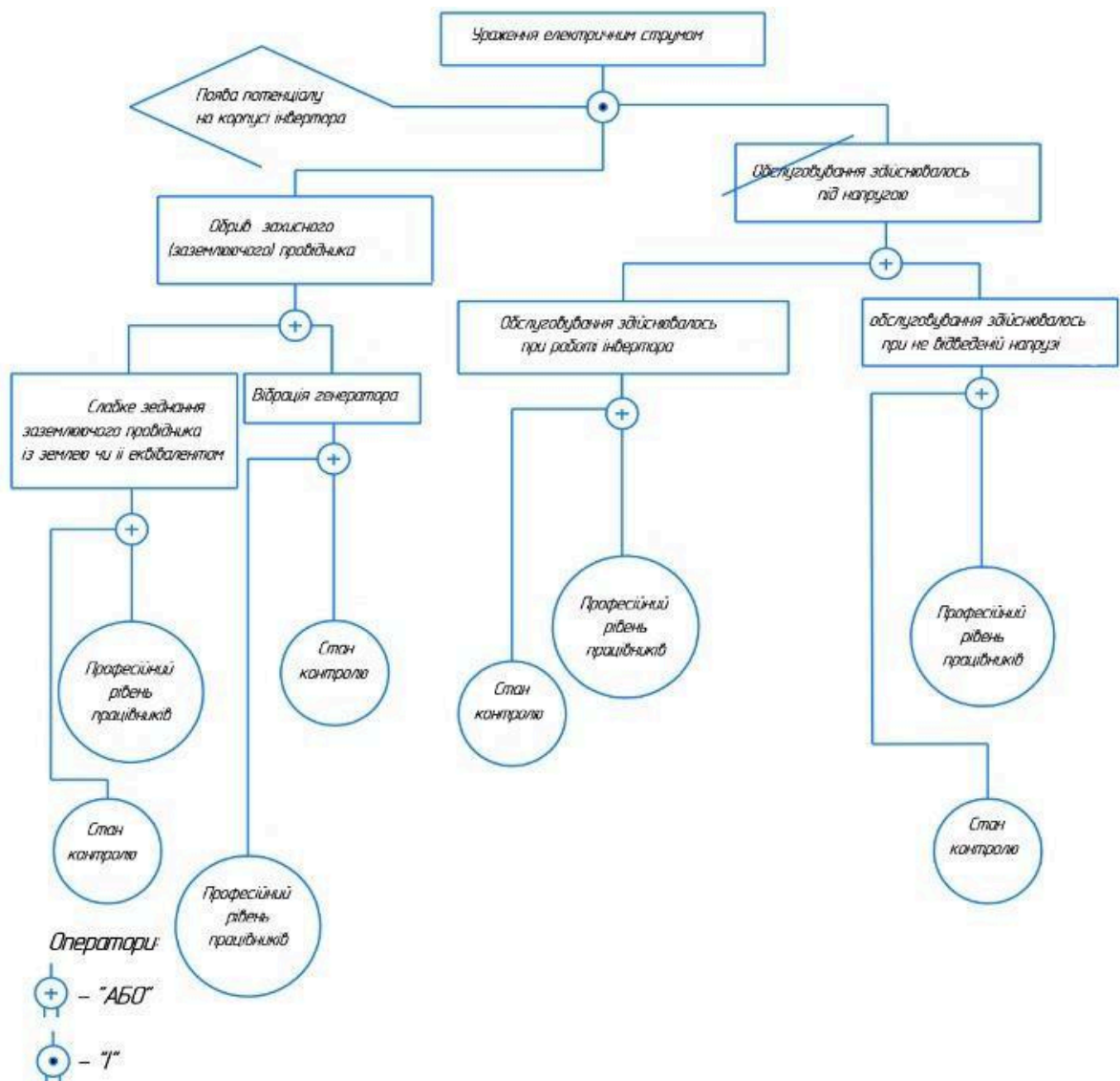


Рис. 6.1. Логіко-імітаційна модель процесу виникнення травми при експлуатації сонячної електростанції

Це підтверджує важливість дотримання наступних рекомендацій для забезпечення безпеки та надійності системи. По-перше, слід обов'язково використовувати якісне захисне заземлення, що допоможе уникнути небезпечних ситуацій, пов'язаних з електричними розрядами. По-друге, необхідно забезпечити можливість швидкого відключення всіх елементів системи, щоб у разі надзвичайної ситуації можна було оперативно припинити роботу обладнання.

Крім того, важливим аспектом є проходження інструктажу власником системи або залучення сертифікованих фахівців, які мають досвід і знання для правильного обслуговування та експлуатації обладнання. Регулярне обслуговування обладнання відповідно до технічних регламентів також є критично важливим, оскільки це допомагає підтримувати його в робочому стані та уникнути різних поломок або збоїв.

### **6.3. Розробка заходів запобігання травм і аварій під час експлуатації сонячних фотоелектричних установок**

Незважаючи на те що СЕС є екологічно чистим джерелом енергії, вони містять низку потенційно небезпечних елементів – високовольтні ланцюги постійного та змінного струму, акумуляторні батареї з високим ступенем енергоємності, а також обладнання, що працює під напругою. Тому запобігання аваріям і травмам має розпочинатися ще до запуску системи в експлуатацію – вже на етапі проектування та монтажу.

Насамперед необхідно подбати про електробезпеку. Відповідно до НПАОП 40.1-1.01-97 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів", розділ 1.3, пункт 1.3.10, забороняється експлуатація електроустановок без заземлення, а всі струмопровідні частини, доступні при нормальній експлуатації, повинні бути захищені або ізольовані [19]. Таким чином, при встановленні автономної СЕС обов'язковим є якісне захисне заземлення, перевірене на відповідність нормативним значенням опору.

Заземлюючий контур повинен мати паспорт, а його параметри – регулярно перевірятися.

Не менш важливо забезпечити автоматичне відключення живлення у випадках порушення ізоляції або виникнення короткого замикання. Згідно з пунктом 1.7.79 ПУЕ, у схемах із заземленою нейтраллю (що часто застосовуються у побутових системах) повинні використовуватись пристрої захисного відключення (УЗО або ПЗВ), які забезпечують вимкнення живлення при струмах витоку, що перевищують 30 мА [22]. Їх встановлення – обов'язкова умова безпечного використання СЕС у приватному домі.

Особливу увагу потрібно приділити техніці безпеки під час монтажу сонячних панелей, особливо якщо їх встановлюють на дахах. Падіння з висоти – одна з найпоширеніших причин побутових травм. Згідно з ДБН А.3.2-2-2009 "Охорона праці і промислова безпека в будівництві", при виконанні робіт на висоті понад 1,3 м необхідно застосовувати індивідуальні засоби захисту від падіння: страхувальні пояси, каски, взуття з неслизькою підошвою. Хоча цей документ орієнтований на професійне будівництво, в умовах приватного сектору його положення можна і потрібно застосовувати як базові стандарти безпеки.

Усі роботи з технічного обслуговування СЕС повинні проводитись лише після повного відключення системи. У пункті 2.1.3 вищезгаданих Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів чітко зазначено: забороняється проводити будь-які роботи під напругою, якщо це не передбачено відповідним інструктажем та засобами захисту. Отже, навіть проста перевірка контактів на інверторі має проводитись лише після знеструмлення всіх ділянок електричного кола.

Ще одним важливим напрямом є протипожежна безпека. Згідно з пунктом 6 розділу IV Правил пожежної безпеки в Україні (наказ МВС № 1417 від 30.12.2014), електричні щити, розподільні коробки та акумуляторні батареї мають встановлюватися в пожежобезпечному середовищі, з вільним доступом

для обслуговування та охолодження [24]. Особливо це актуально для літій-іонних АКБ, які здатні самозайматися у разі пошкодження або перегріву. З цією метою акумулятори встановлюють у сухому, добре вентильованому приміщенні, не суміжному з житловими кімнатами. У межах домашньої системи обов'язковим також є наявність вогнегасника, сертифікованого для гасіння електроустановок (порошковий тип ABC або CO<sub>2</sub>-вогнегасник).

Згідно з пунктом 2.6.5 НПАОП 0.00-4.12-05 "Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці", інструктаж має проходити навіть особа, яка лише тимчасово користується електрообладнанням – отже, інформаційна складова є так само важливою, як і технічні засоби захисту [23].

Таким чином, для безпечної роботи автономної СЕС у приватному будинку необхідно реалізувати комплекс заходів, що охоплюють проектування, монтаж, експлуатацію та інформування користувача. Спирання на чинні нормативні документи – запорука того, що система не лише працюватиме ефективно, а й не створюватиме загроз для життя і здоров'я мешканців.

#### **6.4. Висновки по розділу 6**

У даному розділі було розглянуто питання безпеки при роботі з автономною сонячною електростанцією. В зв'язку з чим було виділено чотири взаємопов'язані категорії ризиків: електротехнічні, механічні, пожежні та організаційні, які потребують системного підходу до їх усунення.

Особливу увагу було приділено специфіці систем постійного і змінного струму, оскільки постійний струм від панелей неможливо вимкнути при сонячному світлі, що створює додаткові ризики під час технічного обслуговування. Разом з цим, літій-іонні акумулятори вимагають точного температурного контролю через небезпеку термічного розгону, який може призвести до критичних аварійних ситуацій.

При аналізі пожежної безпеки було опрацьовано інформацію з нормативних документів, які чітко визначають вимоги до безпечної експлуатації

таких систем. З них випливає необхідність ефективної вентиляції приміщення де розміщено акумуляторні батареї та правильне розміщення вогнегасників, що дозволяє суттєво знизити ризик загорянь та їх поширення.

Варто підкреслити, що поряд із фізичними засобами захисту важливу роль відіграє інформаційна безпека систем керування, оскільки несанкціонований доступ до контролера здатен вивести з ладу обладнання або створити небезпечні режими роботи, загрожуючи цілісності всієї системи.

Таким чином, лише поєднання надійних технічних засобів захисту з належною підготовкою обслуговуючого персоналу здатне забезпечити безаварійну експлуатацію сонячної електростанції протягом усього розрахункового терміну служби.

## ВИСНОВКИ

Аналізуючи проблеми енергозабезпечення приватних домогосподарств, стає очевидним, що підвищення енергетичної автономності є не просто актуальним, а й стратегічно важливим завданням. У рамках даної магістерської роботи було розроблено проєкт автономної системи електроживлення приватного домогосподарства з використанням сонячної енергії як основного джерела живлення. Враховуючи актуальність енергетичної незалежності в умовах нестабільного електропостачання, зроблено акцент на побудову системи, яка здатна забезпечити безперебійну роботу критично важливих споживачів у будь-який час доби. Основою проєкту стала трифазна автономна сонячна електростанція з літійовими акумуляторами, гібридними інверторами та бензиновим генератором, що дозволяє створити резерв і уникнути збоїв при недостатній генерації. Для проєктування даної станції було використано наступне обладнання:

фотомодулі – 79 шт. Trina Solar TSM-DE21 (загальна потужність 52,14 кВт);

інвертори – 4 шт. Victron Energy Quattro 48/15000/200-100/100 (загальна потужність 48 кВт);

акумуляторні батареї – 2 стеки Force L1 з 6 модулів фірми PylonTech. (загальна ємність 42,62 кВт·год);

контролери заряду – 4 шт. Victron Energy Smart Solar 250/100 та 4 шт. Smart Solar 250/85;

резервний генератор – Könnig & Söhnen KS 48V-DC;

система кріплень – комплекти String Setter.

Виконано детальне моделювання сонячної генерації у програмному середовищі PVGIS з урахуванням сезонних коливань та зміни кута нахилу фотомодулів. Отримані результати дозволили визначити, що оптимальний кут нахилу фотомодулів становить 40°. Даний кут нахилу фотомодулів дає можливість забезпечити найкращу ефективність протягом року без необхідності

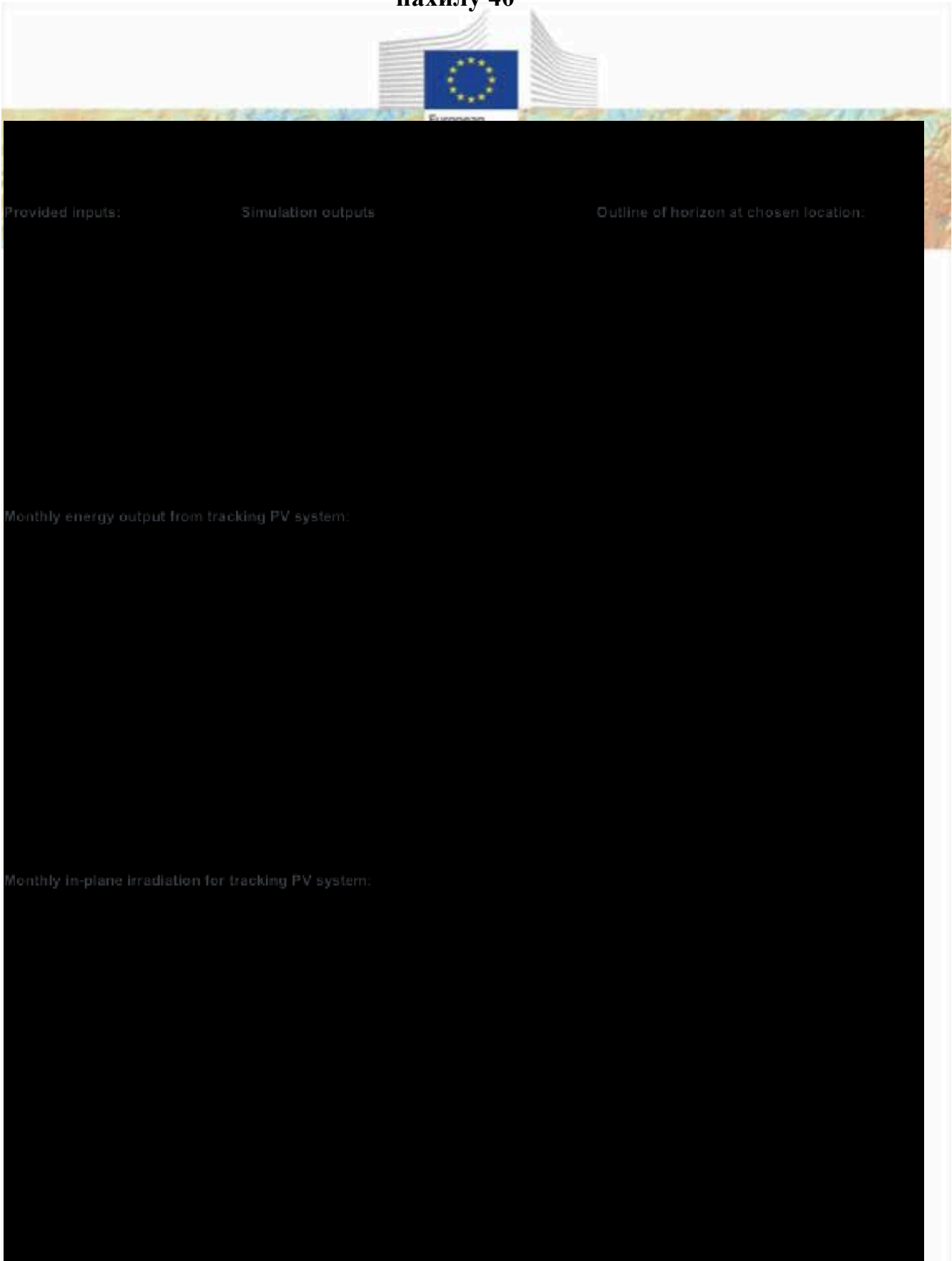
динамічної корекції кута. Також було досліджено як змінюється рівень генерації в залежності від сезонності. Встановлено, що найвищі показники генерації спостерігаються в літній період тоді як у грудні та під час зимнього періоду рівень генерації значно знижується. Незважаючи на низький рівень генерації у зимовий період року, дана система здатна забезпечувати стабільне живлення приватного домогосподарства протягом року.

Завдяки техніко-економічному обґрунтуванню встановлено, що термін окупності системи становить приблизно 5 років і 3 місяці, що є прийнятним для подібного типу інвестицій. У розділі охорони праці було охоплено питання електробезпеки при роботі з постійним і змінним струмом. Також розглянуто питання пожежного захисту та безпечної експлуатації акумуляторних батарей. Таким чином, спроектована система не лише забезпечує надійне електропостачання в автономному режимі, а й відповідає сучасним вимогам безпеки, ефективності й довговічності.

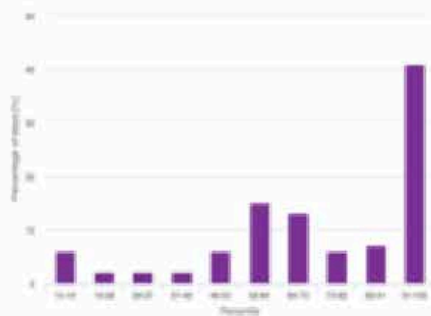
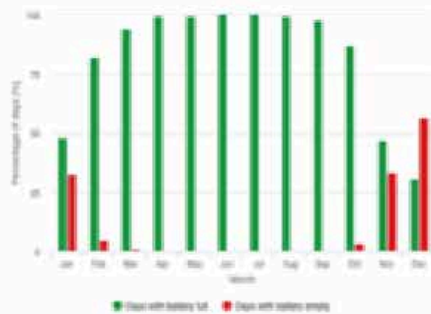
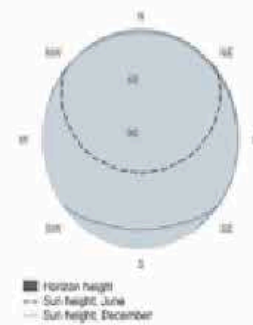
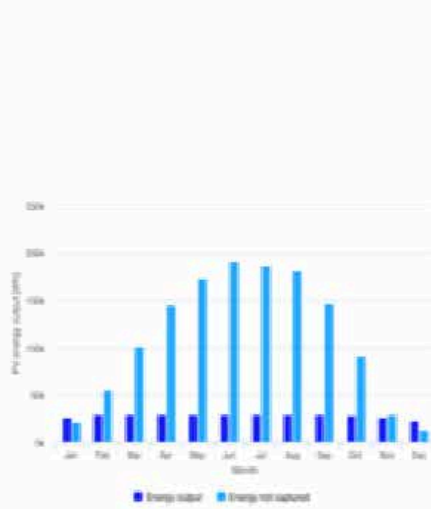
## Показники середньомісячної генерації електроенергії для обраних кутів нахилу.

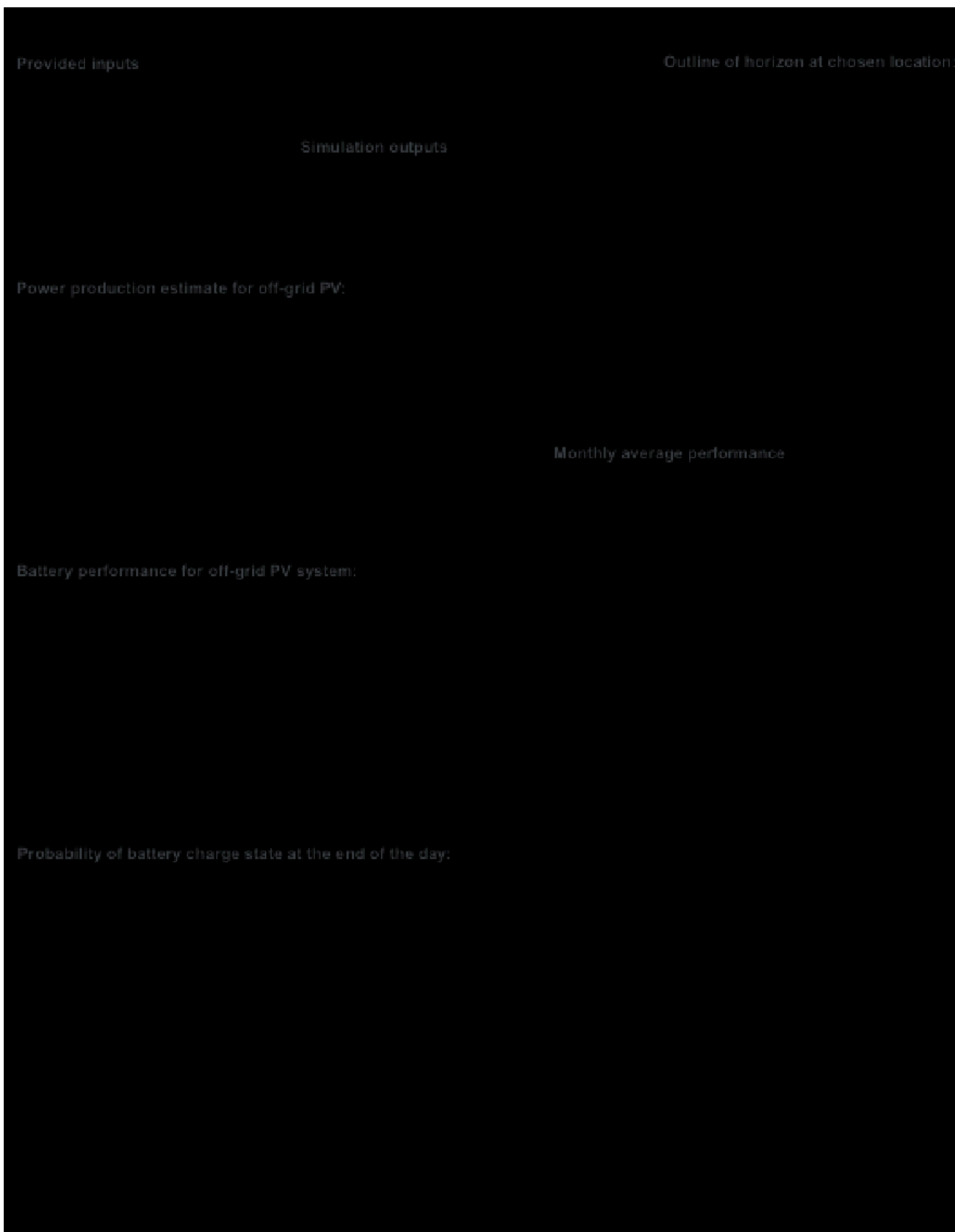
Місяць	Кут нахилу 35°			Кут нахилу 40°			Кут нахилу 45°		
	E_m	H(i)_m	SD_m	E_m	H(i)_m	SD_m	E_m	H(i)_m	SD_m
<b>Січень</b>	2002,9	41,9	644	2065,2	43,2	675,6	2113,1	44,1	701,3
<b>Лютий</b>	3704,4	77	787,4	3778,7	78,5	813,5	3832,2	79,7	834,1
<b>Березень</b>	6230,2	134,3	1268,7	6278,5	135,4	1291,7	6300,9	136,0	1308,8
<b>Квітень</b>	8316,1	187,1	1604,7	8308,6	187	1617,3	8275,8	186,3	1623,6
<b>Травень</b>	9692,0	224,9	1316,5	9622,5	223,2	1314,5	9531,8	220,9	1309,3
<b>Червень</b>	10565,4	249,2	796,9	10464,6	246,7	793,0	10345,0	243,7	787,4
<b>Липень</b>	10289,4	243,6	727	10202,7	241,4	725,7	10095,7	238,7	722,7
<b>Серпень</b>	9897,3	234,6	991,1	9869,9	234	994,0	9815,6	232,6	994,8
<b>Вересень</b>	7750,4	177,1	1450,8	7794,4	178,2	1471,5	7809,1	178,7	1485,5
<b>Жовтень</b>	5287,7	116	1311,7	5378,3	118,1	1345,0	5441,6	119,5	1379,8
<b>Листопад</b>	2169,9	46,9	468,6	2227,1	48,1	489,5	2270,4	49,0	506,6
<b>Грудень</b>	1593,6	34	449,2	1649,9	35,1	473,3	1694,3	36,0	493,2
<b>Всього</b>	77499,30	1766,60	11816,60	77640,40	1725,70	12004,60	77525,50	1765,20	12147,10

**Звіт про продуктивність фотоелектричної системи при оптимальному куті нахилу 40°**



Звіт про продуктивність автономної фотоелектричної системи





## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. REN21. Renewables 2023 Global Status Report – Renewables in Energy Supply. – Paris : REN21 Secretariat, 2023. – 350 с. – Режим доступу до сайту: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
2. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. *Фотоенергетика : навч. посібник* / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
3. Voxwell M. Solar Electricity Handbook – 2022 Edition: A Simple, Practical Guide to Solar Energy – Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems. – UK : Greenstream Publishing, 2022. – 230 с.
4. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2013.
5. Kaya S., Aktaş M., Güler O. An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems // Journal of Engineering Research. – 2024. – Т. 12, № 3. – с. 156–165.
6. Остренко Д. О., Колларов О. Ю. Оптимізація кутів нахилу сонячних панелей у фотоелектричних системах : монографія. – Київ : Енергоінформ, 2020. – 144 с.
7. Як працює автономна сонячна електростанція: принципи та технології // Ecotown : інформаційний ресурс. – 2018. – Режим доступу до сайту: <https://ecotown.com.ua/news/29374-jak-pracyue-avtonomna-sonjachna-elektrostantsij-a-principi-ta-tehnologiyi.html>
8. Шкрабець Ф. П., Плешков П. Г. Основи електропостачання : навч. посібник. – Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010.
9. Пелішек М. О., Семенов В. І. Акумуляторні батареї в системах електроживлення. – Львів : ЛНТУ, 2018. – 112 с.
10. Victron Quattro 48/15000/200-100/100 : технічна документація. – Victron Energy. – Режим доступу до сайту: <https://www.victronenergy.com/inverters-chargers/quattro>

11. PylonTech Force L1 : технічна документація. – Офіційний сайт Pylontech. – Режим доступу до сайту: <https://en.pylontech.com.cn/products/detail/77>
12. Генератор KS 48V-DC – Könnert & Söhne : офіційний сайт. – Режим доступу до сайту: <https://koenner-soehnen.com/ua/generator-ks-48v-dc>
13. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 89 с.
14. Schneider Electric EasyPact EZC100N : технічна документація. – Офіційний сайт Schneider Electric. – Режим доступу до сайту: <https://www.se.com/ua/uk/>
15. ABB OFAF00H100 – запобіжник для систем постійного струму : технічний каталог. – ABB, 2022. – Режим доступу до сайту: <https://www.abb.com>
16. Shelly ЗЕМ : технічна документація. – Офіційний сайт Shelly. – Режим доступу до сайту: <https://www.shelly.com/en/products/shop/shelly-3em>
17. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) : офіційний сайт. – European Commission. – Режим доступу до сайту: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
18. Кідиба В. П. Економіка електроенергетики : навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 180 с.
19. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ : Мінпраці України, 1997. – 96 с.
20. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека в будівництві. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 42 с.
21. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час роботи на висоті. – Київ : Мінпраці України, 2007. – 38 с.
22. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. – 7-е вид. – Київ : Держенергонагляд, 2017.
23. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. – Київ : Мінпраці України, 2005. – 26 с.

24.Правила пожежної безпеки в Україні : наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417. – Київ : МВС України, 2014. – 112 с. – Режим доступу до сайту: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0136-15#Text>