

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Обґрунтування параметрів фотоелектричної установки
для енергозабезпечення особистого селянського господарства»**

Виконав: студент групи Ен-61

Спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Попович Сергій Любомирович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., професор Боярчук В.М.

(Прізвище та ініціали)

Рецензент: д.т.н., професор Тригуба А.М.

(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри _____

к.т.н., доц. С.В. Сиротюк

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Поповичу Сергію Любомировичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства»

Керівник роботи Боярчук Віталій Мефодійович, професор
затверджені наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: дані щодо споживання електроенергії особистим селянським господарством; методика визначення обсягів споживання електроенергії особистим селянським господарством.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) _____

Вступ.

1. Аналіз стану використання фотоелектричних установок для енергозабезпечення особистих селянських господарств.

2. Методика дослідження та дані для обґрунтування параметрів фотоелектричної установки.

3. Проектування фотоелектричної установки та обґрунтування її техніко-економічних параметрів.

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

5. Техніко-економічне обґрунтування.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів): аналіз стану використання фотоелектричних установок для енергозабезпечення особистих селянських господарств; методика дослідження та дані для обґрунтування параметрів фотоелектричної установки; проектування фотоелектричної установки та обґрунтування її техніко-економічних параметрів; техніко-економічне обґрунтування.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	<i>Боярчук В.М, професор кафедри енергетики</i>		
4	<i>Городецький І.М., доцент кафедри інженерної механіки</i>		

7. Дата видачі завдання

28 лютого 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу</i>	28.02-20.03.25	
2	<i>Виконання другого розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>	21.03-14.06.25	
3.	<i>Виконання третього розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>	15.06.25-10.07.25	
4.	<i>Написання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»</i>	11.07-31.08.25	
5.	<i>Оцінення ефективності запропонованої системи</i>	01.09-31.10.25	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та аркушів ілюстраційного матеріалу</i>	01-30.11.25	
7.	<i>Завершення роботи в цілому</i>	01-10.12.25	

Студент _____ Попович С. Л.
(підпис)

Керівник роботи _____ Боярчук В.М.
(підпис)

УДК 620.92:621.383.51

Обґрунтування параметрів фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства.

Попович С. Л. Кафедра енергетики – Дубляни, ЛНУВМ, 2025.

Кваліфікаційна робота: 81 с. текст. част., 14 рис., 9 табл., 14 арк. ілюстраційного матеріалу, 39 джерела.

У кваліфікаційній роботі виконано обґрунтування параметрів фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства на основі аналізу споживання електроенергії, сонячної інсоляції та технічних характеристик обладнання. Розглянуто сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій, особливості енергоспоживання домогосподарств сільської місцевості та чинники впливу на вибір конфігурації системи. Проведено розрахунок потужності сонячної установки, оптимальної ємності акумуляторної батареї, рівня автономності та прогнозованої генерації. Запропоновано структурну й електричну схему гібридної фотоелектричної системи, оцінено її технічну надійність та режими роботи. Наведено техніко-економічне обґрунтування проєкту та визначено орієнтовний строк окупності. Робота містить рекомендації щодо безпечної експлуатації, охорони праці та дій у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: фотоелектрична установка, особисте селянське господарство, сонячна енергія, інвертор, акумуляторна батарея, автономність, енергоспоживання, техніко-економічне обґрунтування.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСОБИСТИХ СЕЛЯНСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ.....	9
1.1. Сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій та їх ефективність у малих енергосистемах.....	9
1.2. Особливості енергоспоживання особистих селянських господарств та чинники вибору конфігурації феу	14
1.3. Підтримка впровадження сонячної генерації в домогосподарствах	18
1.4. Аналіз досвіду використання автономних і гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі України та світу	21
1.5. Завдання кваліфікаційної роботи	25
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ДАНІ ДЛЯ ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ..	27
2.1. Характеристика домогосподарства та аналіз його енергетичних потреб	27
2.2. Збір та обробка вихідних даних для моделювання сонячної генерації	34
2.3. Методика визначення необхідної потужності фотоелектричної системи та ємності акумуляції	36
2.4. Вибір структури фотоелектричної установки та критерії її технічної оптимізації.....	39
2.5. Розрахунок прогнозованої генерації та рівня автономності домогосподарства	42
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ОБґРУНТУВАННЯ ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	47
3.1. Вибір схеми фотоелектричної системи.....	47
3.2. Розрахунок обладнання фотоелектричної системи та формування її конфігурації	48
3.3. Побудова структурної та електричної схем фотоелектричної установки	53

3.4. Оцінювання технічної надійності та режимів експлуатації фотоелектричної системи	57
--	----

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
---	----

4.1. небезпечні виробничі чинники та їхні джерела	61
---	----

4.2. Безпечні умови праці під час електропостачання особистого селянського господарства	63
---	----

4.3. Заходи із електро та пожежної безпеки	66
--	----

4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	68
--	----

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСОБИСТОГО СЕЛЯНСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА.....	70
--	----

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	73
-----------------------------	----

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
---------------------------------	----

ВСТУП

Енергозабезпечення приватних домогосподарств в Україні поступово набуває визначального значення в умовах постійних коливань цін на традиційні енергоресурси та зростання вимог до енергонезалежності сільських територій. Особисті селянські господарства, які становлять вагомий частку сільського сектору, дедалі частіше розглядають технології децентралізованої генерації як інструмент підвищення ефективності власного виробництва і зменшення залежності від зовнішніх джерел електропостачання. Одним із найперспективніших рішень є фотоелектричні установки, що перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну, забезпечуючи стабільне живлення технологічних процесів, побутового обладнання та енергомістких систем. За останні роки відбувся суттєвий ривок у підвищенні ефективності сонячних модулів, розвитку перетворювальної техніки та вдосконаленні методів проектування автономних енергосистем [18].

Особисті селянські господарства мають специфічну структуру споживання, що включає поєднання побутових навантажень та енергетичних потреб, пов'язаних із веденням сільськогосподарської діяльності: утриманням тварин, зберіганням продукції, роботою насосного обладнання та освітленням виробничих приміщень. Саме тому обґрунтування параметрів фотоелектричної установки повинно спиратися не лише на стандартні методики розрахунку прогнозованої генерації, а й на аналіз режимів споживання електроенергії протягом року, оцінку сезонних коливань інтенсивності сонячного випромінювання та визначення допустимих рівнів автономності. Використання сучасних методів моделювання дозволяє адаптувати конфігурацію системи до умов конкретного господарства, що підтверджується новими дослідженнями у сфері оптимізації фотоелектричних енергокомплексів, виконаними європейськими й українськими науковцями [34].

Проблематика підвищення енергоефективності сільських територій також має важливе екологічне підґрунтя. Фотоелектричні системи дають можливість

мінімізувати використання викопних ресурсів, що сприяє скороченню викидів парникових газів і відповідає стратегічним напрямам розвитку зеленої енергетики, задекларованим у Європейському зеленому курсі та національних програмах енергоефективності [21]. Для особистих селянських господарств це означає не лише економічний ефект, а й підвищення енергетичної стійкості у випадку перебоїв централізованого електропостачання.

Незважаючи на доступність фотоелектричних технологій, процес їх раціонального впровадження вимагає комплексного техніко-економічного обґрунтування. Основними аспектами постають визначення оптимальної потужності сонячних модулів, вибір конфігурації інвертора, оцінка необхідної ємності накопичувача, а також аналіз можливих сценаріїв використання надлишкової генерації. Точність цих рішень визначає ефективність роботи майбутньої установки, її окупність і можливість масштабування. Сучасні підходи до проєктування активно базуються на використанні цифрових моделей продуктивності сонячних панелей, метеорологічних даних високої роздільності та алгоритмів оптимізації, що робить дослідження у цій сфері актуальним і практично значущим [36].

Отже, кваліфікаційна робота, яка стосується обґрунтування параметрів фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства, є важливою у напрямі розвитку стійких енергетичних систем та має практичну цінність – забезпечення економічної самостійності домогосподарств.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСОБИСТИХ СЕЛЯНСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

1.1. Сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій та їх ефективність у малих енергосистемах

Упродовж останнього десятиліття фотоелектрична енергетика перейшла з «нішової» технології у основний елемент глобального енергетичного переходу. За даними Міжнародного енергетичного агентства, між 2024 та 2030 роками на сонячну енергетику припадатиме близько 80 % приросту встановленої потужності відновлюваних джерел енергії, причому значну частку становитимуть дахові та малі наземні установки для домогосподарств і малих підприємств [18].

Згідно зі «Snapshot 2024» IEA PVPS, сумарно у світі вже встановлено понад 1,6 ТВт потужності фотоелектричних систем, причому частка малої генерації для споживачів-виробників неухильно зростає [33]. Для України характерні подібні тенденції: встановлена потужність сонячних електростанцій зросла з близько 2 ГВт у 2018 р. до приблизно 8 ГВт на початок 2022 р., що засвідчує високий потенціал технології навіть попри воєнні ризики та регуляторну невизначеність [24].

Технологічна еволюція фотоелектричних перетворювачів безпосередньо впливає на ефективність малих енергосистем. Традиційні кремнієві фотоелементи досягли лабораторного рекордного ККД на рівні близько 27,8 %, що наближається до теоретичної межі Шоклі–Квейссера для одноперехідних комірок [37]. Подальше зростання ефективності забезпечується за рахунок технологій TOPCon, HJT та перехід до тандемних структур на основі перовскіт/кремній, для яких у 2024–2025 роках зафіксовано лабораторні рекорди ККД понад 34 % [25; 22].

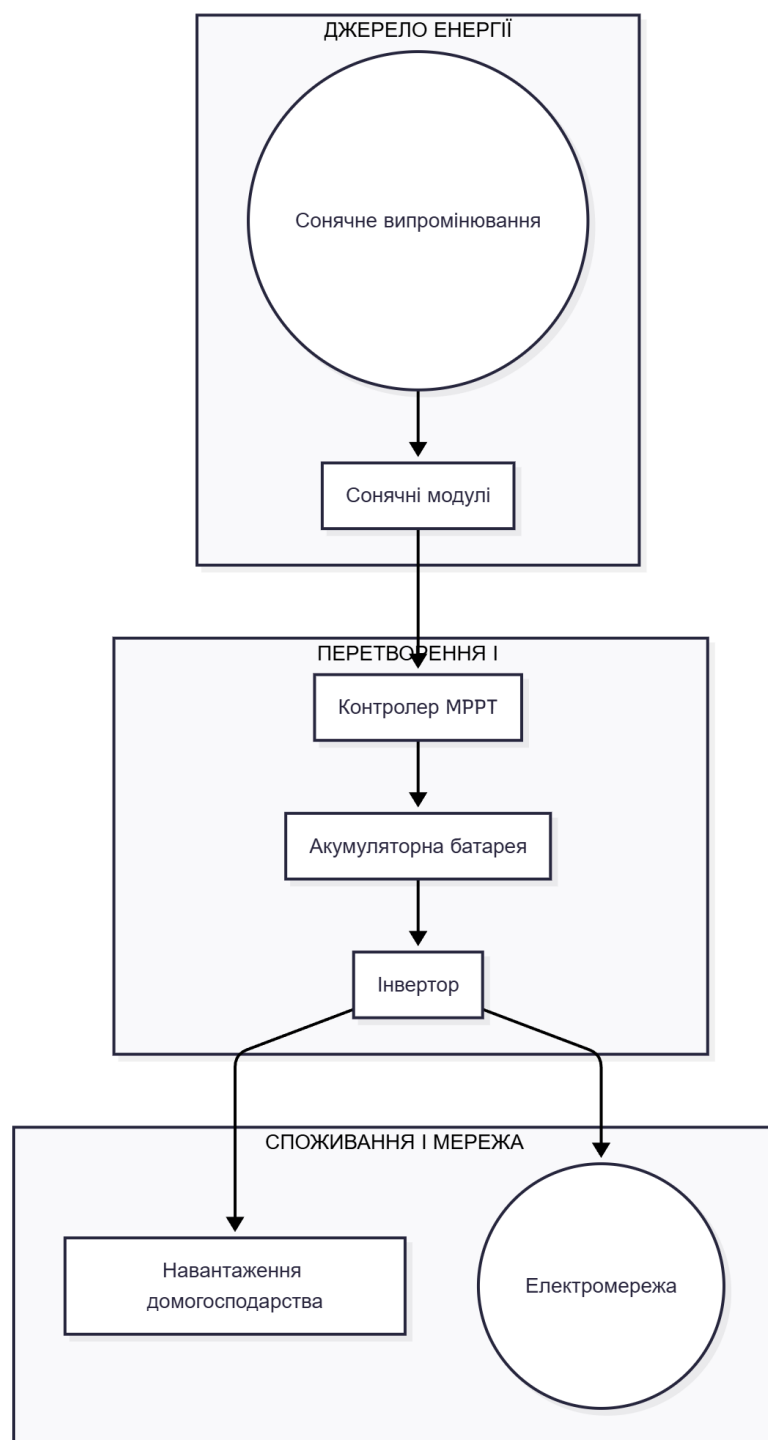


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема малої фотоелектричної системи для домогосподарства

Одночасно на рівні промислових модулів фіксуються рекорди ККД понад 25 % для високоефективних НІТ-модулів, що підтверджується останніми даними провідних виробників, сертифікованими незалежними лабораторіями [38]. Для власника невеликої установки це означає змогу отримати ту саму

річну генерацію з меншої встановленої потужності або, навпаки, збільшити виробіток у межах наявної площі даху.

На рисунку 1.1 подано узагальнену структурну схему малої фотоелектричної системи з накопичувачем енергії, характерної для індивідуального домогосподарства чи особистого селянського господарства.

Основним показником при оцінюванні ефективності фотоелектричної установки в складі малої енергосистеми є її фактичний річний виробіток електроенергії. У наближеному вигляді його можна оцінити за формулою:

$$E_{річ} = P_{ном} \cdot H_{річ} \cdot PR, \quad (1.1)$$

де $E_{річ}$ – очікувана річна генерація електроенергії, кВт·год; $P_{ном}$ – встановлена пікова потужність фотоелектричної установки, кВт; $H_{річ}$ – річна сонячна радіація на площину модуля, перерахована в еквівалентні години роботи при номінальній інсоляції 1 кВт/м²; PR – коефіцієнт продуктивності (performance ratio), що враховує температурні втрати, втрати в кабельних лініях, інверторі, системі керування та на забрудненні поверхні модулів.

Для сучасних малих систем за умови коректного проєктування значення PR зазвичай становить 0,75–0,85 [33; 35].

Сам коефіцієнт продуктивності визначають як відношення фактично вимірної генерації до теоретично можливої:

$$PR = \frac{E_{факт}}{P_{ном} \cdot H_{річ}}, \quad (1.2)$$

де $E_{факт}$ – фактично вироблена за рік електроенергія, що вимірюється за показами лічильника або інвертора.

Для співставлення різних систем додатково використовують коефіцієнт використання встановленої потужності:

$$CF = \frac{E_{факт}}{P_{ном} \cdot 8760}. \quad (1.3)$$

Цей коефіцієнт характеризує, яку частку від максимально можливої річної генерації (за умови безперервної роботи при номінальній потужності)

реально забезпечує установка. У малих дахових системах цей показник зазвичай коливається в межах 10–20 % залежно від кліматичних умов, орієнтації модулів, наявності затінення та стратегії експлуатації [18; 33].

Сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій для малих енергосистем тісно пов'язані з підвищенням питомої потужності модулів, зменшенням вартості ват-години встановленої потужності та інтеграцією систем зберігання енергії. У табл. 1.1 наведено узагальнені діапазони ККД для основних типів технологій на основі даних NREL, останніх звітів IEA PVPS та аналітичних оглядів провідних дослідницьких груп [37; 25; 22; 38; 29].

Таблиця 1.1 – Основні типи фотоелектричних технологій та орієнтовні значення ККД

Технологія	Рекордний лабораторний ККД, %	Типовий ККД комерційних модулів, %	Коментар щодо застосування в малих енергосистемах
Монокристалічний c-Si (PERC, TOPCon)	до $\approx 27 \dots 28$ [37]	$\approx 20 \dots 23$	Базовий стандарт для дахових систем; поєднання зрілої технології та відносно низької вартості.
HJT (heterojunction)	понад 26 у комітках [22; 38]	$\approx 22 \dots 25$	Вища ефективність і кращі характеристики при високих температурах; перспективні для обмежених площ дахів.
Плівкові технології (CdTe, CIGS)	$\approx 22 \dots 24$ у лабораторії [37]	$\approx 16 \dots 19$	Привабливі для легких конструкцій, фасадних рішень, але поки менш поширені у приватному секторі.
Перовскіт/кремній тандем	понад 34 у комітках [25; 22]	пілотні модулі $\approx 26 \dots 30$	Швидко прогресує; очікується поява комерційних рішень з дуже високою питомою потужністю.

Для малих енергосистем, типових для особистих селянських господарств, особливе значення має не лише ККД модуля, а й стабільність параметрів

упродовж життєвого циклу, деградація потужності, чутливість до підвищених температур та простота інтеграції в архітектуру будівлі. Саме тому в реальних проєктах переважно використовують модулі на основі монокристалічного кремнію з технологіями PERC або TOPCon, тоді як HJT та тандемні рішення поки що залишаються дорожчими, хоча й демонструють вищий генераційний потенціал у перерахунку на одиницю площі [22; 38; 29].

Ще однією помітною тенденцією є перехід від систем, орієнтованих головню на продаж енергії за «зеленим» тарифом, до моделей власного споживання (self-consumption) та енергетичного виробництва та споживання. Дослідження, виконані для європейських ринків і України, показують, що сценарій максимальної власної генерації та споживання електроенергії у домогосподарстві часто є економічно вигіднішим, ніж орієнтація на експорт у мережу, особливо за умов зниження тарифів на «зелену» електроенергію та зростання роздрібних цін на електроенергію для населення [35; 32].

У цьому контексті суттєво зростає роль акумуляторних систем та «розумного» керування навантаженням, що дозволяє збільшити частку власного споживання і підвищити енергетичну стійкість сільських домогосподарств у разі аварій або відключень. Звіт IEA PVPS за 2024 рік, зокрема для таких країн, як Австралія, демонструє стрімке зростання кількості батарей, встановлених разом із малими фотоелектричними системами, що підтверджує глобальність цієї тенденції [27].

Сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій формують сприятливі передумови для їх широкого використання в малих енергосистемах особистих селянських господарств. Поєднання зростання ефективності модулів, здешевлення обладнання BOS-компонентів, розширення можливостей накопичення енергії та популяризації моделей «виробник-споживач» створює підґрунтя для переходу від епізодичного використання сонячних панелей до системного впровадження комплексних фотоелектричних рішень, здатних забезпечити значну частину енергетичних потреб домогосподарства.

1.2. Особливості енергоспоживання особистих селянських господарств та чинники вибору конфігурації ФЕУ

Енергоспоживання особистих селянських господарств має характерні риси, що вирізняють їх від міських домогосподарств або малих підприємств. Головною відмінністю є поєднання побутових навантажень із сезонними агротехнічними потребами, серед яких робота насосного обладнання, систем зберігання сільськогосподарської продукції, вентиляційних установок, дрібної переробної техніки та електрифікованих господарських механізмів. Навантаження часто має виражений піковий характер, зокрема у періоди сезону поливу або підготовки продукції до зберігання. Дослідження енергоспоживання сільських домогосподарств у країнах Європи та України показують, що добовий профіль споживання характеризується двома піками – ранковим та вечірнім, тоді як денне споживання, попри нижчу інтенсивність, може зростати за рахунок використання обладнання для господарських робіт [20].

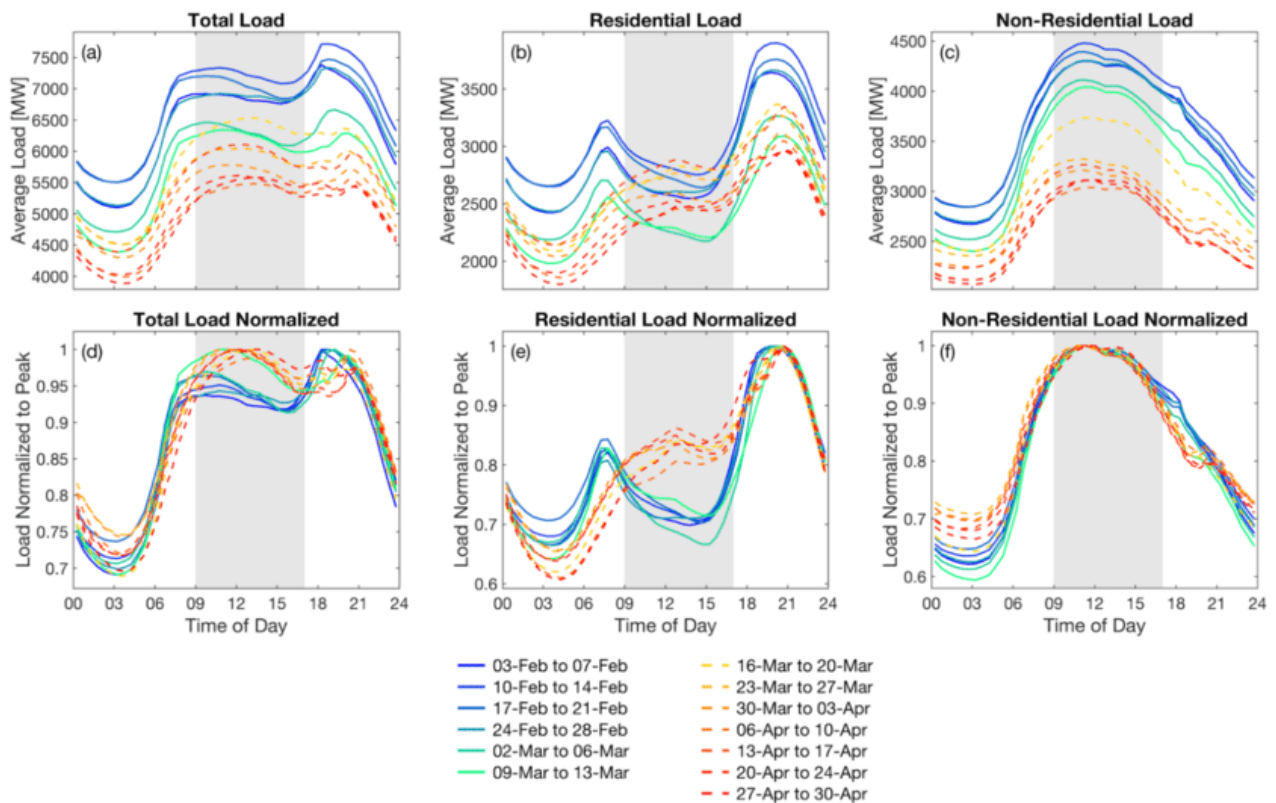


Рисунок 1.2 –Типовий добовий профіль електроспоживання домогосподарств із характерними ранковим і вечірнім піками (за даними європейських досліджень)

Другим важливим фактором є сезонність. У літній період збільшується навантаження, пов'язане з роботою насосів, холодильних камер, систем вентиляції тваринницьких приміщень. Взимку зростає побутова частка споживання, включно з електричним обігрівом або допоміжними системами підтримання мікроклімату. Така структура споживання змушує адаптувати конфігурацію фотоелектричної установки не лише за потужністю модулів, а й за обсягом акумуляції та здатністю системи працювати в режимі покриття пікових навантажень. У сучасних дослідженнях ефективності малих фотоелектричних систем наголошено, що саме профіль споживання, а не встановлена потужність, визначає ефективність інтеграції відновлюваної генерації в домогосподарствах [31].

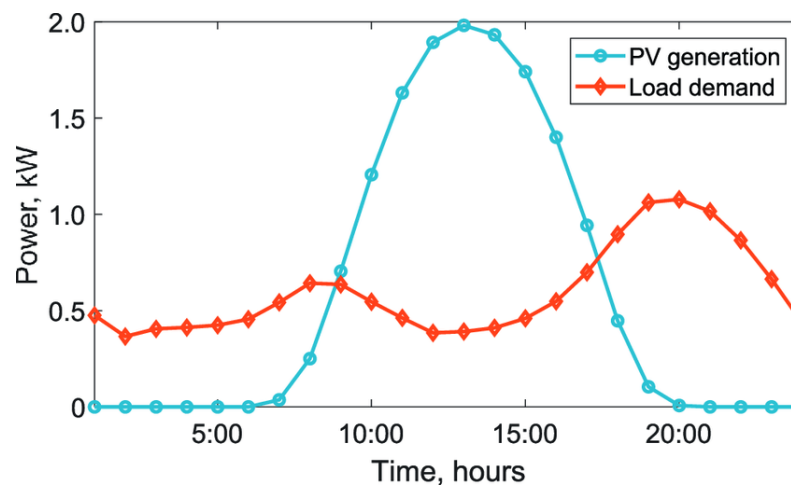


Рисунок 1.3 – Середньодобовий профіль споживання електроенергії та генерації фотоелектричної установки у домогосподарстві

Суттєве значення має також наявність нестабільності зовнішньої електромережі. Для багатьох сільських територій характерні просідання напруги, часті відключення та обмежена пропускна здатність ліній. Це робить доцільним використання автономних або гібридних конфігурацій фотоелектричних установок, які здатні забезпечувати критичне навантаження навіть за відсутності мережевого живлення. У наукових роботах підкреслюється, що для регіонів із нестабільним електропостачанням

оптимальними є системи зі збільшеною часткою накопичення (battery-heavy), оскільки вони забезпечують стабільність роботи побутових та технологічних процесів у господарстві [26].

Наступним чинником є характеристики покрівлі або земельної ділянки, на якій встановлюється фотоелектрична система.

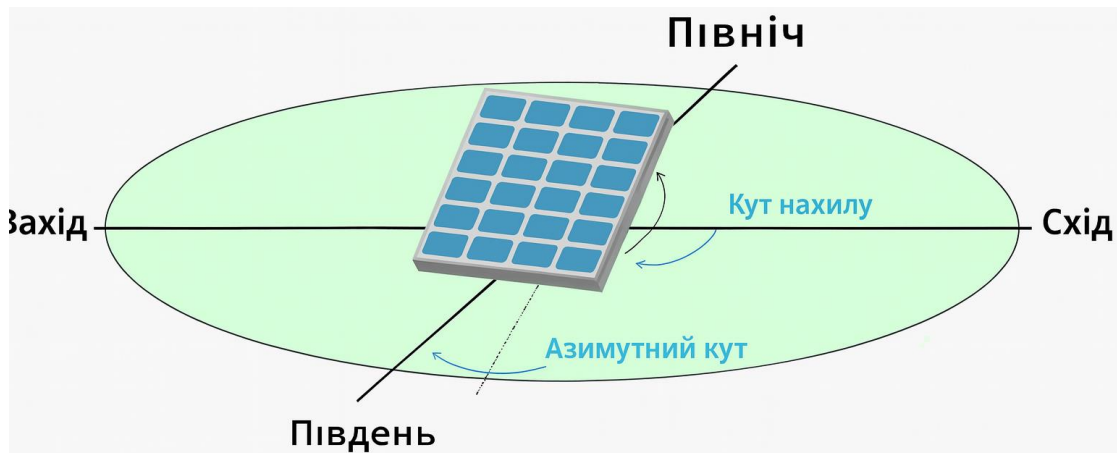


Рисунок 1.4 – Орієнтація та кут нахилу фотоелектричних модулів на покрівлі або ділянці

Параметри орієнтації та кута нахилу панелей безпосередньо впливають на річну генерацію та ступінь відповідності виробітку фактичному профілю навантаження. Для особистих селянських господарств часто характерні великі простори відкритої території, що дозволяє гнучко обирати конфігурацію системи та уникати затінення. Однак при даховому монтажі необхідно враховувати корисну площу, несучі властивості конструкції та взаємне затінення елементів – фактори, які описуються в сучасних методиках енергетичного моделювання фотоелектричних установок [23].

Одним із основних аспектів вибору конфігурації є співвідношення між генерацією, власним споживанням та можливістю експорту енергії в мережу. У межах прос'юмерських моделей, що активно поширюються в країнах ЄС, оптимальними вважаються системи, які забезпечують максимальну частку самоспоживання, оскільки це мінімізує залежність від коливань тарифів та підвищує енергетичну автономність. За результатами європейських досліджень, домогосподарства зі збалансованими фотоелектричними установками можуть

досягати рівня самозабезпечення на рівні 40–70 % навіть без систем зберігання енергії, тоді як використання акумуляторів збільшує цей показник до 80–90 % [28].

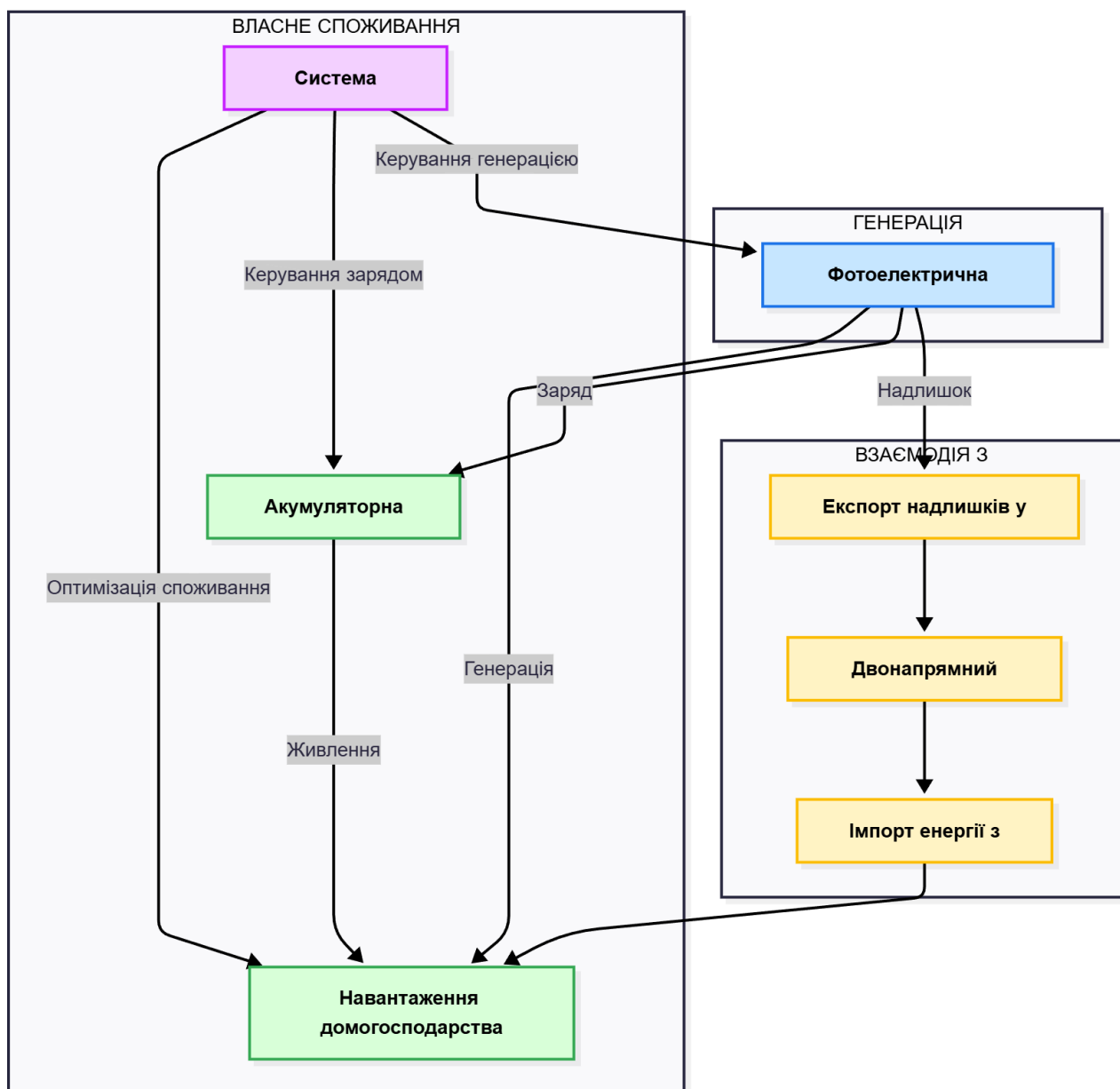


Рисунок 1.4 – Структурна схема фотоелектричної системи з потоками генерації, споживання та експорту енергії

Таким чином, вибір конфігурації фотоелектричної установки для особистого селянського господарства залежить від цілого комплексу взаємопов'язаних факторів: добового та сезонного профілю споживання, рівня надійності електропостачання, доступних площ для монтажу, наявності та

ємності системи накопичення, економічних умов тарифів і цін на обладнання, а також стратегічних цілей господаря щодо рівня енергетичної автономії. Сукупність цих аспектів формує техніко-економічні параметри майбутньої системи та визначає її ефективність у довгостроковій перспективі.

1.3. Підтримка впровадження сонячної генерації в домогосподарствах

Поширення фотоелектричних систем у домогосподарствах безпосередньо залежить від рівня державної та регіональної підтримки, а також від доступності фінансових, регуляторних і технічних механізмів, що стимулюють населення до переходу на відновлювану енергетику. У багатьох країнах Європейського Союзу впровадження домашніх сонячних установок стало можливим завдяки поєднанню тарифних стимулів, грантових програм, пільгових кредитів та технічних стандартів, які полегшують процес інтеграції систем у мережу. Для домогосподарств це означає зниження початкових інвестицій, захист від коливань цін на електроенергію та підвищення енергетичної автономії.

Для України характерна поступова трансформація моделі стимулювання приватної генерації: від домінування «зеленого тарифу» до розвитку моделей «виробника-споживача», у яких основним стає саме власне споживання, а не продаж енергії в мережу. На зміну тарифним механізмам приходять програми компенсації частини вартості обладнання, підтримка модернізації систем електропостачання, а також цифрові сервіси, що дають змогу домогосподарствам прогнозувати виробіток та оптимізувати режим роботи фотоелектричної установки. У багатьох громадах створюються локальні енергетичні стратегії, у яких домогосподарства розглядаються як активні учасники енергетичних ринків.

Важливою складовою впровадження сонячних систем є умови технічного приєднання. Наявність стабільної електромережі, здатної приймати або

передавати надлишкову електроенергію, визначає ефективність роботи фотоелектричного комплексу.

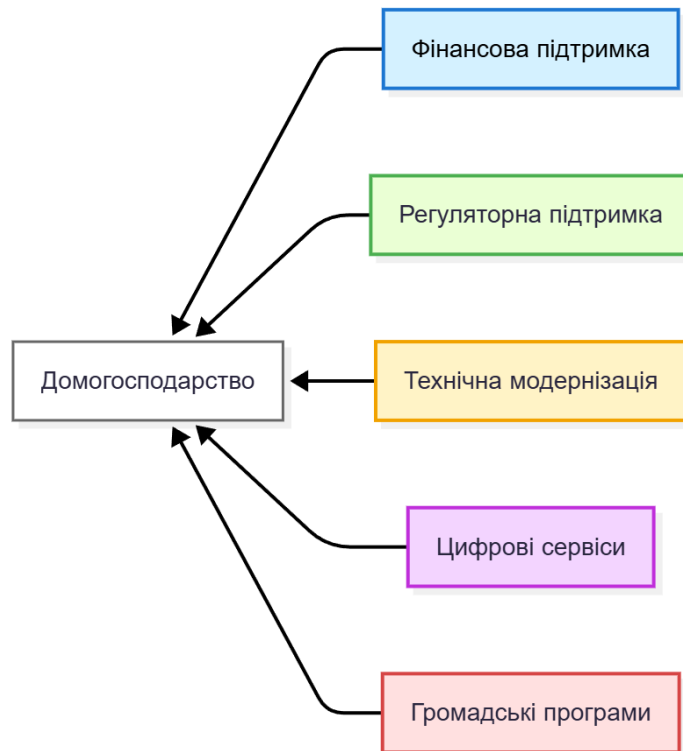


Рисунок 1.5 – Потоки підтримки впровадження сонячної генерації в домогосподарствах

У разі слабких або перевантажених мереж домогосподарства переходять до автономних або гібридних конфігурацій з підвищеною часткою накопичення енергії. У таких системах інформаційно-керуючі алгоритми відіграють вирішальну роль, забезпечуючи баланс між генерацією, накопиченням та споживанням.

Фінансова підтримка впровадження сонячної генерації в домогосподарствах може бути охарактеризована через інтегральний показник економічної доцільності. Найчастіше використовується формула приведеної вартості економії електроенергії протягом періоду експлуатації системи:

$$PV_{\text{saving}} = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+r)^t}, \quad (1.4)$$

де S_t – річна економія витрат на електроенергію; r – ставка дисконту; n – період експлуатації установки.

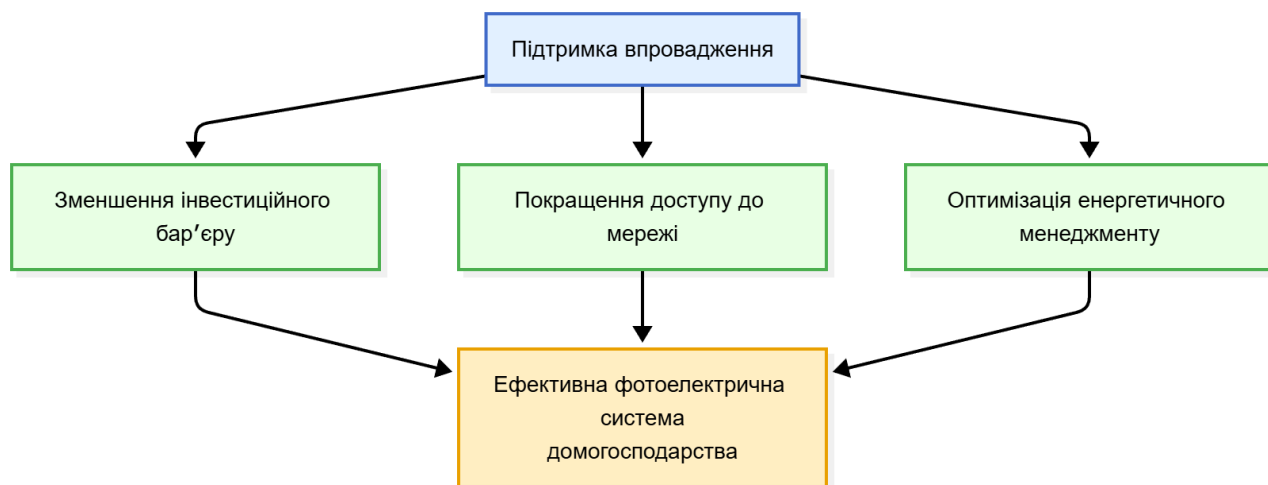


Рисунок 1.6 – Роль підтримки у формуванні ефективної фотоелектричної системи

Таблиця 1.2 – Напрями підтримки впровадження сонячної генерації в домогосподарствах

Напрямок підтримки	Сутність механізму	Потенційний ефект
Фінансові стимули	Компенсації, гранти, пільгові кредити	Зниження початкових інвестицій
Регуляторна підтримка	Спрощення процедур підключення, стандарти	Зменшення бар'єрів для впровадження
Технічна підтримка	Програми модернізації мереж, енергоаудит	Підвищення надійності й ефективності
Цифрові сервіси	Моніторинг, прогнозування, енергоменеджмент	Оптимізація самоспоживання
Громадські ініціативи	Локальні енергетичні програми громад	Підвищення залученості населення

Додатній результат порівняння приведеної економії з початковими інвестиціями свідчить про ефективність впровадження фотоелектричної системи. Можливості державної та громадської підтримки впровадження сонячних систем наведено у табл. 1.2.

1.4. Аналіз досвіду використання автономних і гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі України та світу

Досвід впровадження автономних і гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі світу свідчить, що такі рішення вже давно перестали бути суто експериментальними. Вони стали інструментом забезпечення енергетичної стійкості для домогосподарств, малого бізнесу та фермерських господарств, передусім у регіонах із нестабільним або обмеженим доступом до електромережі. Автономні системи, у яких джерелом електроенергії є фотоелектрична установка з акумуляторним блоком без постійного підключення до мережі, найчастіше застосовуються там, де підведення ліній електропередачі є економічно недоцільним або технічно складним. Натомість гібридні системи поєднують можливості роботи з мережею та від нього незалежний режим, підвищуючи загальний рівень енергетичної безпеки домогосподарства.

У світовій практиці приватний сектор дедалі частіше обирає саме гібридні конфігурації. Це дає змогу поєднати переваги мережевої моделі (використання мережі як резервного джерела, можливість експорту надлишків) та автономної (живлення критичних навантажень під час відключень, зниження чутливості до перебоїв у мережі). Типовим прикладом є будинки у сільській місцевості або на околицях міст, де встановлюють дахові фотоелектричні системи з акумуляторними батареями та гібридними інверторами. У денний час домогосподарство покриває значну частину свого споживання за рахунок сонячної генерації, водночас заряджаючи акумулятор, а в нічний або аварійний період використовує накопичену енергію чи підключається до мережі. Такий досвід особливо показовий для країн із розвиненою культурою моделей «виробництво-споживання», де населення розглядається як активний учасник енергетичних ринків, а не лише як пасивний споживач.

Для України актуальність автономних і гібридних систем істотно зросла на тлі масштабних відключень електроенергії та ризиків для критичної

інфраструктури. Домогосподарства, малі підприємства, фермерські господарства й приватні клініки почали розглядати фотоелектричні системи не просто як спосіб зменшення рахунків за електроенергію, а як елемент базової безпеки. У таких умовах автономні системи набули поширення у віддалених садибах, мисливських будиночках, гірських туристичних садибах, тоді як гібридні рішення стали характерними для котеджних містечок, фермерських господарств та міських приватних будинків. Часто конфігурація підбирається так, щоб забезпечити гарантоване живлення критичних навантажень – освітлення, циркуляційних насосів, холодильного обладнання, засобів зв'язку протягом кількох годин чи навіть діб автономної роботи.

Ефективність автономних і гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі зазвичай оцінюють не лише за величиною річної генерації, а й за параметрами надійності та рівнем покриття потреб домогосподарства. Один із узагальнених показників – коефіцієнт енергетичної автономності, який показує, яку частку загального споживання можна забезпечити за рахунок власної генерації та акумуляції енергії. У спрощеному вигляді його можна подати так:

$$K_{авт} = \frac{E_{pv} + E_{ак}}{E_{спож}}, \quad (1.5)$$

де $K_{авт}$ – коефіцієнт автономності; E_{pv} – обсяг електроенергії, безпосередньо спожитої з фотоелектричної системи; $E_{ак}$ – обсяг енергії, отриманої з акумуляторів; $E_{спож}$ – загальне річне споживання домогосподарства.

Для автономних систем значення $K_{авт}$ прагне до одиниці, тоді як для гібридних воно залежить від налаштувань режимів роботи, ємності акумулятора та профілю навантаження.

Іншим основним індикатором є умовний коефіцієнт використання генерації, який характеризує частку виробленої енергії, що була реально використана домогосподарством:

$$K_{вик} = \frac{E_{влас}}{E_{ген}}, \quad (1.6)$$

де $E_{\text{влас}}$ – енергія, яка пішла на власне споживання (у тому числі через акумулятори); $E_{\text{ген}}$ – загальний виробіток фотоелектричної установки.

У гібридних системах, налаштованих на максимізацію самоспоживання, значення цього показника може бути значно вищим, ніж у чисто мережевих установок, орієнтованих на продаж надлишків у мережу.

Порівняльні характеристики автономних і гібридних систем у контексті приватного сектору наведено в табл. 1.3. У таблиці зведено не лише технічні параметри, а й типовий спектр застосувань, а також основні переваги й обмеження, що формуються на основі реального практичного досвіду.

Таблиця 1.3 – Порівняльні характеристики автономних і гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі

Тип системи	Підключення до мережі	Рівень автономності	Типові сфери застосування	основні переваги	Основні обмеження
Автономна	Відсутнє	Високий	Віддалені садиби, тимчасові будівлі, дачі	Повна незалежність від мережі, прогнозовані витрати	Високі вимоги до ємності акумуляторів, ризик дефіциту енергії у тривалий похмурий період
Гібридна	Є	Середній – високий	Приватні будинки, котеджі, фермерські господарства, малий бізнес	Можливість резервування від мережі, гнучкі режими роботи, покращення якості електроживлення	Складніша схема керування, потреба в погодженні з оператором мережі

Досвід впровадження таких систем за кордоном показує, що в умовах зростання цін на електроенергію та посилення вимог до кліматичної нейтральності економічна привабливість гібридних конфігурацій поступово

підвищується. Вартість акумуляторних систем знижується, а технології керування навантаженням і зарядом батарей стають доступнішими для масового споживача. Український приватний сектор рухається у тому самому напрямі, хоча й з урахуванням власних викликів, пов'язаних із безпекою, станом мереж та регуляторними змінами.

Для ілюстрації структури автономної та гібридної фотоелектричної систем у приватному секторі доцільно подати узагальнену схему у вигляді двох логічно пов'язаних конфігурацій (рис. 1.7).

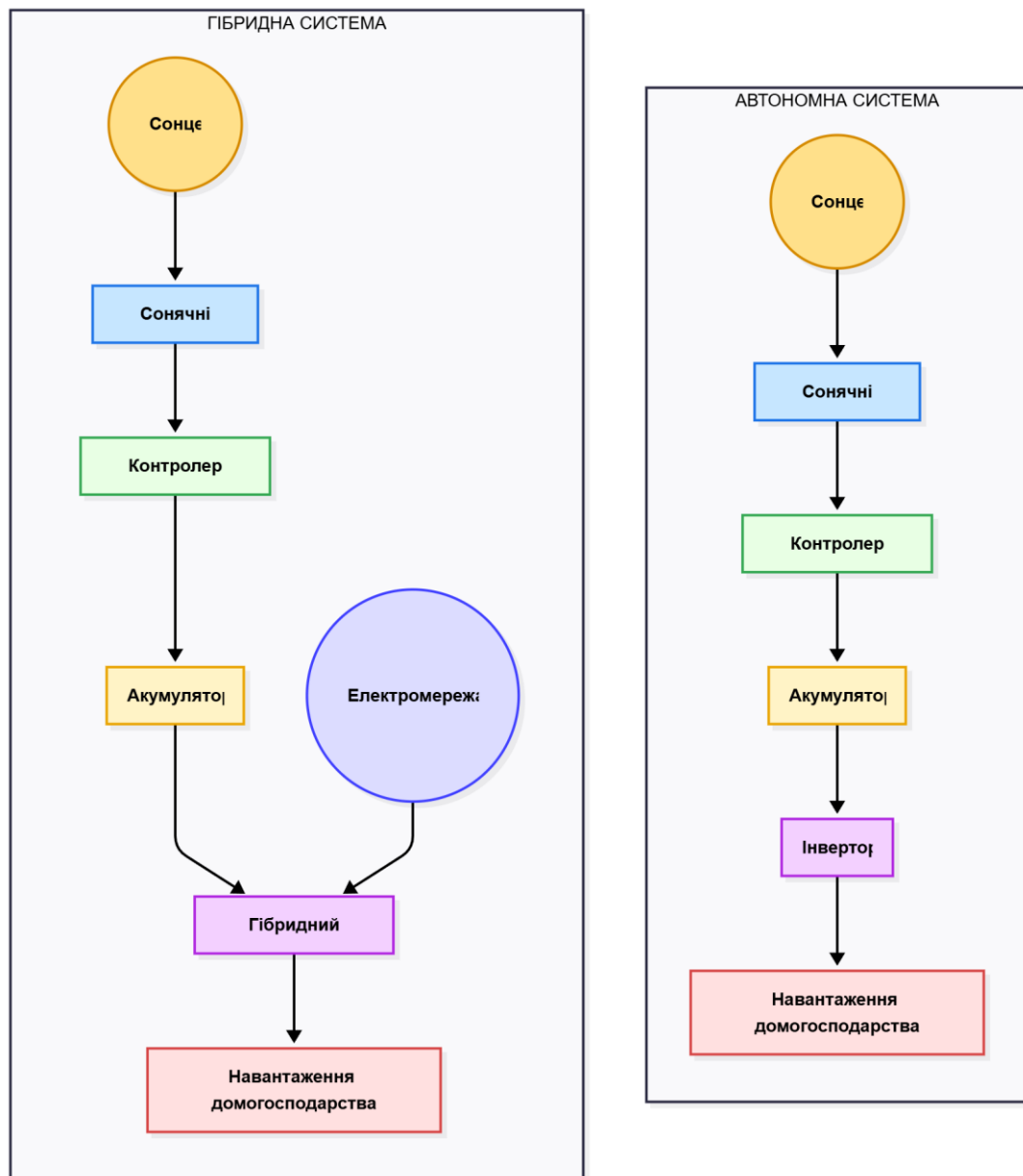


Рисунок 1.7 – Структурні схеми автономної та гібридної фотоелектричних систем для приватного домогосподарства

На схемі (рис. 1.7) видно, що автономна система повністю спирається на взаємодію між генерацією та акумуляторним блоком, тоді як у гібридній конфігурації інвертор додатково підключений до електромережі. Це дає змогу не лише резервувати живлення у разі нестачі сонячної генерації, а й компенсувати пікові навантаження, узгоджуючи роботу системи з режимами мережі. У підсумку досвід України та інших країн демонструє, що раціональний вибір між автономним і гібридним рішенням повинен спиратися на аналіз реальних профілів споживання, стану мережевої інфраструктури та стратегічних цілей домогосподарства щодо рівня енергетичної автономності.

1.5. Завдання кваліфікаційної роботи

Завдання кваліфікаційної роботи визначають логіку виконання дослідження та формують послідовність аналітичних, розрахункових і проєктних кроків, необхідних для обґрунтування параметрів фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства.

До них належать:

- комплексний аналіз сучасного стану використання сонячної енергетики в малих енергосистемах, з особливою увагою до умов приватного сектору України та міжнародних прикладів ефективного застосування автономних і гібридних конфігурацій;
- дослідження профілю енергоспоживання конкретного домогосподарства з урахуванням сезонних і добових коливань, особливостей використання побутових та господарських електроприладів, а також із врахуванням можливих пікових навантажень;
- формування технічної моделі фотоелектричної установки, у якій враховуються параметри сонячних модулів, інверторів, контролерів заряду та акумуляторних батарей;
- техніко-економічне обґрунтування проєкту.

— формування рекомендацій щодо впровадження та подальшої експлуатації фотоелектричної установки, а також оцінка її потенційного впливу на енергетичну безпеку, фінансову ефективність і рівень автономності домогосподарства.

Результати цієї роботи мають сприяти підвищенню енергоефективності приватного сектору й розширенню використання відновлюваних джерел енергії в умовах сучасних викликів.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ДАНІ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Характеристика домогосподарства та аналіз його енергетичних потреб

Для виконання нашої роботи було обрано домогосподарство, розташоване у селі Жулин Стрийського району Львівської області. Ця територія характеризується типовою для передгірської зони структурою приватної забудови, наявністю господарських будівель, присадибних ділянок і сезонних зон вирощування сільськогосподарської продукції. Домогосподарство має житловий будинок, кілька допоміжних споруд, а також відкриті ділянки, які можуть бути використані для розміщення фотоелектричних модулів на землі або даху. Просторова композиція території подана на супутниковому знімку (рис. 2.1).

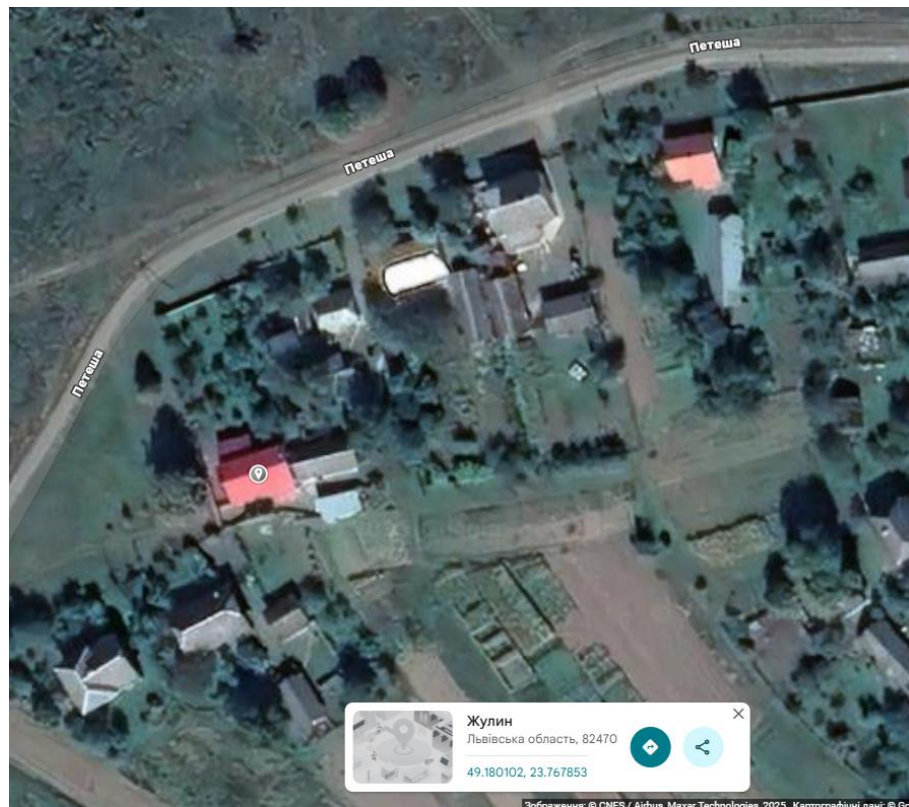


Рисунок 2.1 – Супутниковий знімок території особистого селянського господарства (с. Жулин, Стрийський район Львівська область)

Енергоспоживання домогосподарства має виражений добовий і сезонний характер, що є характерним для приватного сектору сільських територій України. У ранкові години спостерігається пікове навантаження, пов'язане з роботою кухонних приладів, освітленням, запуском насосів для водопостачання. Другий, більш інтенсивний пік припадає на вечірній час, коли ввімкнено освітлення, телевізори, електричні плити, побутову техніку та обігрівальні системи у холодний період року.

У денні години споживання значною мірою залежить від господарської активності. У весняно-літній період навантаження зростає за рахунок роботи водяних насосів для поливу, електроінструментів, обладнання для тваринництва та зберігання продукції. Ці особливості визначають потребу у балансуванні фотоелектричної генерації з використанням акумуляторної батареї, оскільки пікові моменти споживання не збігаються з максимальними періодами сонячної інсоляції.

Потреба у енергії домогосподарства описується через середньодобове споживання:

$$E_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i, \quad (2.1)$$

де P_i – номінальна потужність приладу, кВт; t_i – середній час роботи протягом доби, год; n – кількість електроприладів, од.

Для початкового аналізу складено узагальнену таблицю основних типів електроприладів та їх середньодобового енергоспоживання в умовах типового домогосподарства сільської місцевості (табл. 2.1). Фактичні значення можуть бути уточнені після вимірювання, однак наведені орієнтовні дані дозволяють сформулювати енергетичний баланс для подальшого моделювання потужності фотоелектричної установки.

Аналіз даних табл. 2.1 дає змогу кількісно оцінити структуру та рівень енергоспоживання особистого селянського господарства. Сумарне добове споживання всіх електроприладів становить 11159 Вт·год, тобто приблизно 11,2 кВт·год/добу. Якщо прийняти, що такий режим є типовим протягом року,

річне споживання електроенергії домогосподарством становитиме близько 4073кВт·год, або орієнтовно 4,1 МВт·год/рік. Середня потужність споживання, розрахована як відношення добового споживання до тривалості доби, дорівнює приблизно 0,46кВт, що відповідає середньому навантаженню у 460 Вт протягом 24 годин.

Таблиця 2.1 – Добове енергоспоживання особистого селянського господарства

Назва приладу / обладнання	Потужність, кВт	Середній час роботи, год/добу	Добове споживання, Вт·год
Освітлення будинку (8 LED ламп)	0.096	5	480
Холодильник побутовий	0.150	10	1500
Насос водопостачання	0.750	1	750
Електроплита / чайник / кухонні пристрої	1.500	0.8	1200
Пральна машина	2.000	0.3	600
Телевізор + мультимедіа	0.120	4	480
Освітлення хліва / подвір'я (12 LED ламп)	0.144	6	864
Вентилятор/витяжка у приміщенні для тварин	0.200	2	400
Подрібнювач кормів (зернодробарка)	1.200	0.4	480
Міксер/кормозмішувач для тварин	0.750	0.3	225
Електрична напувалка / підігрів води (зима)	0.500	1	500
Охолоджувач молока (на 2 корови, невеликий)	0.300	6	1800
Вентилятор у свинарнику	0.150	2	300
Освітлення приміщення для птиці	0.060	8	480
Обігрів для молодняка птиці (лампа)	0.250	2	500
Компресор у гаражі	1.100	0.2	220
Болгарка / дріль / інструменти	0.900	0.2	180
Зарядні пристрої, дрібні прилади	0.050	4	200
Разом	—	—	12139 Вт·год ≈12.1кВт·год/добу

Структурний аналіз показує, що частка побутових споживачів (освітлення будинку, холодильник, кухонні пристрої, пральна машина, телевізор, зарядні пристрої) становить близько 4460 Вт·год на добу, тобто приблизно 40 % загального добового енергоспоживання. До цієї групи входять зокрема холодильник із добовою витратою 1 500 Вт·год (13,4 % загального споживання), кухонні електроприлади з 1 200 Вт·год (10,8 %) та пральна машина з 600 Вт·год (5,4 %). Освітлення житлових приміщень споживає 480 Вт·год, що відповідає 4,3 % загальної енергії, а телевізор і мультимедійні пристрої додають ще 480 Вт·год (4,3 %).

Найбільшу частку у структурі витрат становить енергоспоживання, пов'язане з тваринництвом і приготуванням кормів. Сукупне добове споживання цієї групи обладнання дорівнює 6299 Вт·год, або приблизно 56,4 % від загального обсягу. Важливим споживачем є охолоджувач молока для двох корів із добовою витратою 1800 Вт·год, що становить 16,1% від загального енергоспоживання. Значний внесок мають також освітлення хліва й подвір'я (864 Вт·год, 7,7%), насос водопостачання (750 Вт·год, 6,7%), подрібнювач кормів (480 Вт·год, 4,3 %), напувалка або підігрів води для тварин (500 Вт·год, 4,5 %), а також освітлення та обігрів приміщень для птиці, які разом дають близько 980 Вт·год на добу (приблизно 9 %). Вентилятори у приміщеннях для великої рогатої худоби та свиней споживають відповідно 400 і 300 Вт·год, що у сумі становить близько 6,3 % загального обсягу.

Витрати, пов'язані з використанням ремонтного та гаражного обладнання, становлять найменшу частку. Компресор і електроінструменти (болгарка, дріль тощо) споживають разом 400 Вт·год, що відповідає приблизно 3,6 % добового енергоспоживання. Це свідчить про епізодичний характер використання цього обладнання, хоча миттєва потужність у моменти роботи може бути досить високою й потребує врахування під час вибору конфігурації фотоелектричної системи та інвертора.

Отримані числові значення показують, що основними «точками концентрації» енерговитрат є холодильне обладнання (побутовий холодильник

та охолоджувач молока разом забезпечують майже 30% загального споживання), кухонні й кормоприготувальні пристрої, а також освітлення й інженерні системи приміщень для утримання тварин. Це означає, що при проєктуванні фотоелектричної установки доцільно орієнтуватися на забезпечення стабільної роботи саме цих споживачів, а також на використання енергоефективних моделей обладнання. Крім того, добова витрата на рівні близько 11,2 кВт·год дає змогу попередньо оцінити необхідну встановлену потужність фотоелектричних модулів і ємність акумуляторів, що буде деталізовано в наступних підрозділах.

Типовий добовий профіль споживання домогосподарства у літній та зимовий періоди подано на рисунку 2.2 у вигляді узагальненої схеми.

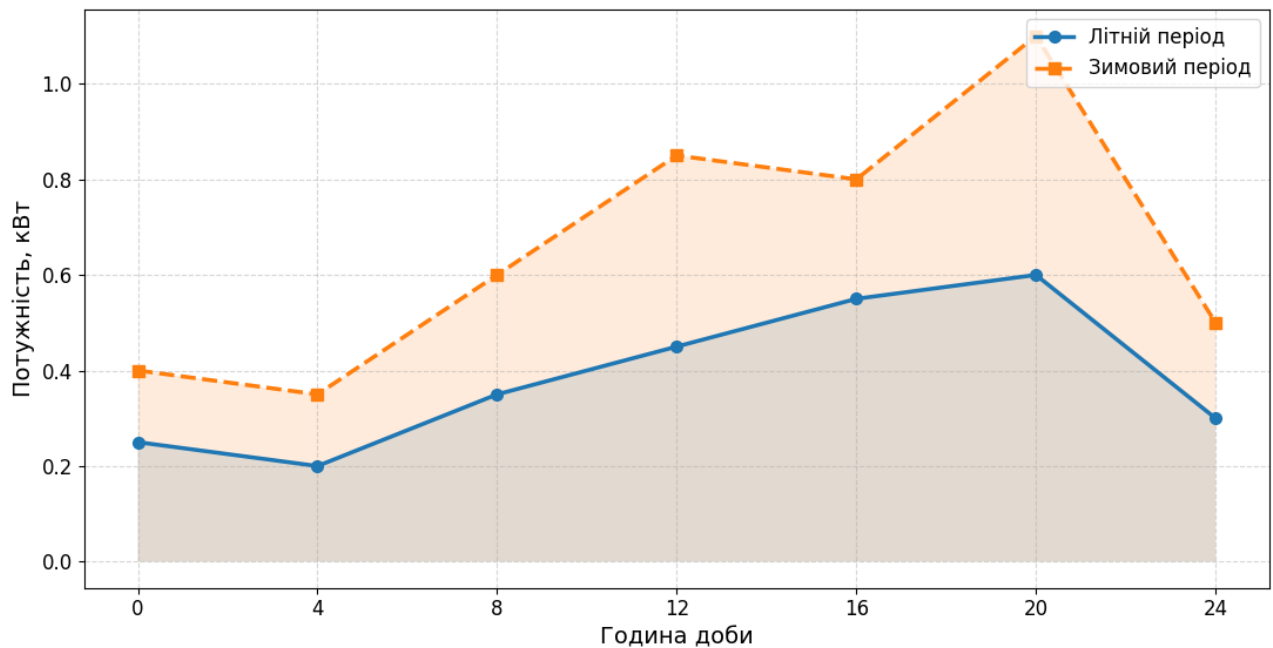


Рисунок 2.2 – Добовий графіки електроспоживання особистим селянським господарством

Аналіз графіків добового навантаження (рис. 2.2) показує, що господарство демонструє чітко виражену добову циклічність споживання електроенергії. У літній період мінімальне навантаження становить близько 0,20...0,25 кВт у нічні години, тоді як максимальні значення припадають на вечірній час і досягають 0,55...0,60 кВт. Середня денна потужність улітку

становить приблизно 0,39 кВт, що відповідає добовому споживанню близько 9,4 кВт·год.

У зимовий період навантаження є суттєво більшим. Нічний мінімум становить близько 0,35...0,40 кВт, а вечірній пік сягає 1,10 кВт, що у 1,8 раза перевищує максимальне літнє значення. Середня потужність протягом доби становить приблизно 0,66 кВт, що відповідає орієнтовному добовому споживанню близько 15,8 кВт·год. Таким чином, зимове середнє навантаження перевищує літнє приблизно у 1,7 раза, що пов'язано з роботою обігрівальних приладів, тривалішим освітленням та підвищеною активністю технічних систем утримання тварин.

Отримані числові значення свідчать, що фотоелектрична система повинна забезпечувати різні режими роботи у теплий і холодний періоди року. Для літнього режиму достатньо генерації на рівні 9...10 кВт·год/добу, тоді як зимою необхідно покривати споживання не менше 15...16 кВт·год/добу, що обґрунтовує потребу у збільшенні встановленої потужності або подвоєній ємності акумуляторної батареї.

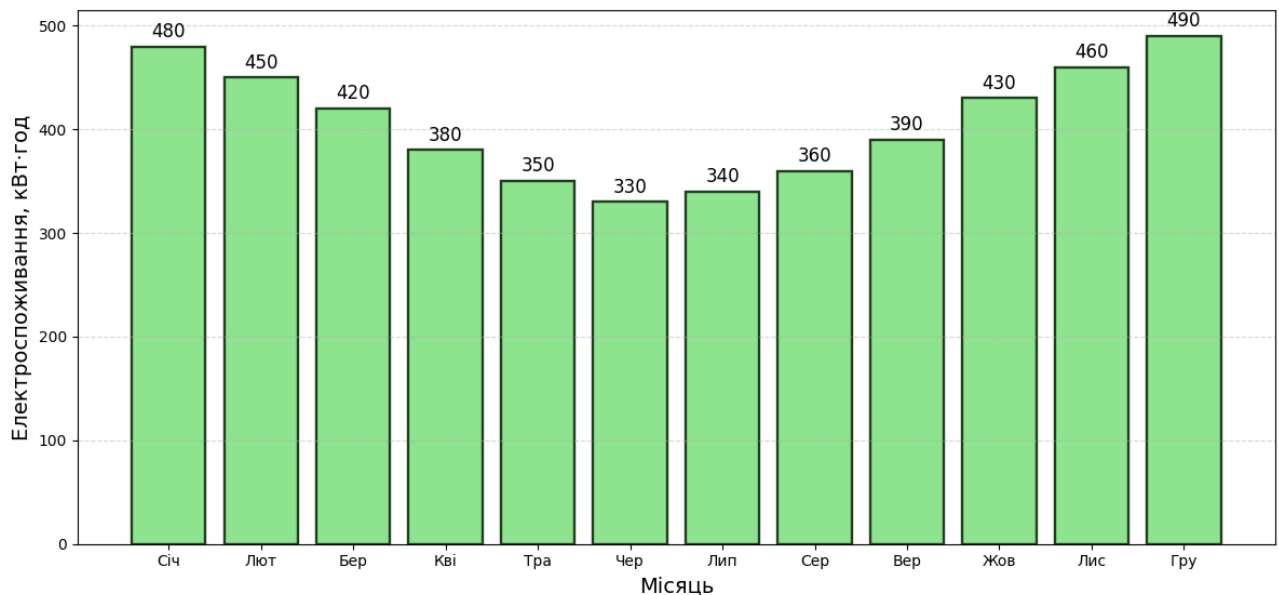


Рисунок 2.3 – Місячний графіки електроспоживання особистим селянським господарством

Графік демонструє виражену сезонність енергоспоживання, характерну для сільських домогосподарств із тваринництвом та допоміжними будівлями. Найменше навантаження спостерігається у літні місяці, тоді як максимальні значення припадають на зимовий період.

У літні місяці (травень–серпень) добове споживання має найнижчі значення – 330...360 кВт·год/місяць, що пов'язано зі скороченням тривалості освітлення, мінімальним використанням обігріву та меншою активністю обладнання для утримання тварин. Абсолютний мінімум припадає на червень – 330 кВт·год, що майже на 33 % менше порівняно з піковими значеннями.

В осінній період (вересень–листопад) споживання поступово зростає від 390 до 460 кВт·год/місяць, що зумовлено збільшенням тривалості освітлення та підвищеним використанням вентиляційних систем у тваринницьких приміщеннях. Особливо помітне збільшення на межі жовтня та листопада – на 30 кВт·год, що відповідає темпу приросту близько 7 %.

Найвищі значення навантаження припадають на зимові місяці. У січні електроспоживання становить 480 кВт·год, а в грудні – 490 кВт·год, що є максимальним значенням за рік. Це приблизно 40...45 % більше, ніж у літні місяці. Основними причинами є використання систем обігріву тваринницьких приміщень, підігрів води, збільшення тривалості освітлення, а також зростання споживання в житлових приміщеннях.

У середньому особисте селянське господарство споживає 408...410 кВт·год на місяць, що становить приблизно 4900...5000 кВт·год на рік, або близько 5 МВт·год на рік, що узгоджується з типовими значеннями для домогосподарств з активною господарською діяльністю та утриманням худоби.

Результати аналізу засвідчують, що особисте селянське господарство має виражену потребу у частковій або повній автономізації електропостачання, особливо в умовах сезонного підвищення навантажень та потенційних перебоїв у роботі електромережі. Це дає змогу обґрунтувати доцільність створення фотоелектричної установки з оптимізованою конфігурацією генерації та накопичення.

2.2. Збір та обробка вихідних даних для моделювання сонячної генерації

Ефективність проектування фотоелектричної установки значною мірою залежить від коректності вихідних даних, які описують природні, просторові та технічні умови роботи системи. Для моделювання генерації використовуються кліматичні показники, характеристики сонячної радіації, географічні параметри місцевості та інформація про покрівлю або земельну ділянку. Узагальнений підхід до збору цих даних наведено на рисунку 2.3.

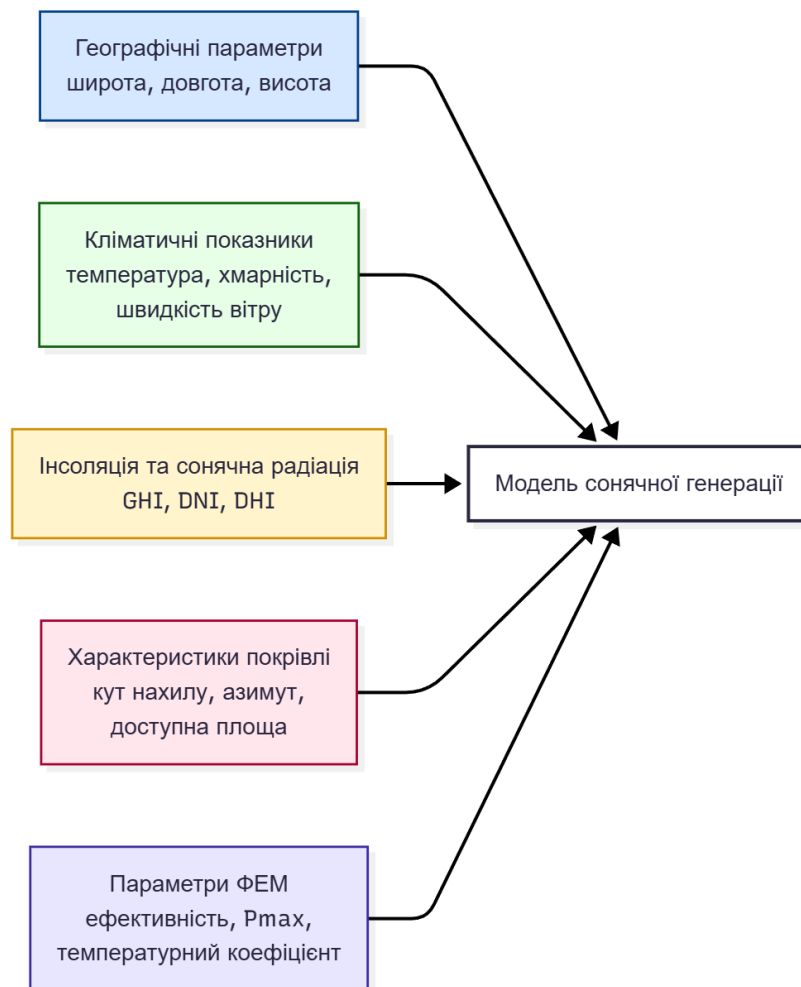


Рисунок 2.3 – Основні групи вхідних даних для моделювання сонячної генерації

У першому етапі формуються географічні параметри локальної точки, оскільки вони визначають траєкторію руху сонця та тривалість світлового дня.

Для с. Жулин Стрийського району координати становлять 49.180082° N та 23.767828° E, що відповідає помірній кліматичній зоні з річною сумарною горизонтальною інсоляцією на рівні 1180...1290 кВт·год/м². На основі широти φ обчислюється сонячна висота β та зенітний кут θ_z за залежністю:

$$\theta_z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega, \quad (2.2)$$

де δ – сонячна деклінація; ω – годинний кут.

Формула (2.2) дозволяє визначати прямий компонент сонячного випромінювання для конкретної години доби.

Кліматичні показники включають середньодобові й помісячні значення температури повітря, відносної вологості, хмарності та швидкості вітру. Ці параметри впливають на робочу температуру фотоелектричних модулів, а отже й на їх реальний ККД. Робоча температура T_R визначається як:

$$T_R = T_a + \frac{G \cdot NOCT - 20}{800}, \quad (2.3)$$

де T_R – робоча температура фотоелектричного модуля, °C; T_a – температура навколишнього середовища, °C; G – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²; $NOCT$ – номінальна робоча температура модуля, °C (зазвичай 42...48°C при стандартних умовах 800 Вт/м², 20°C, вітер 1 м/с).

Одним із основних компонентів є дані про інсоляцію – глобальне горизонтальне випромінювання (GHI), пряме нормальне випромінювання (DNI) та дифузне випромінювання (DHI). Ці три показники дають змогу оцінити кількість енергії, яку потенційно може отримати ФЕУ протягом року. Узагальнені показники інсоляції для координат домогосподарства наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Річні показники сонячної інсоляції для території с. Жулин

Показник	Позначення	Середнє значення
Глобальна горизонтальна радіація	GHI	1240 кВт·год/м ² ·рік
Пряма нормальна радіація	DNI	820 кВт·год/м ² ·рік
Дифузна складова	DHI	460 кВт·год/м ² ·рік
Середньорічна температура	Ta	+9.2 °C

Розрахунок генерації фотоелектричних модулів також залежить від конфігурації покрівлі або земельної ділянки. Основними параметрами є поверхня, доступна для встановлення, кут нахилу θ та азимут α . Для будівель у даному регіоні типовим є ухил покрівлі $25...35^\circ$, що відповідає близькому до оптимального значення для максимізації річного виробітку. У разі установки на земельній ділянці параметри можна оптимізувати, забезпечивши точне орієнтування на південь ($\alpha = 0^\circ$) і нахил $\theta \approx \varphi - 10^\circ$.

Паралельно формується набір технічних характеристик фотоелектричних модулів, що включає максимальну потужність $P_{\max}$, ефективність η , габаритні розміри, температурний коефіцієнт та паспортні криві I–V. На основі цих даних обчислюється очікуваний вихід енергії з урахуванням похибок, втрат у проводах, інверторі та системі монтажу. Розрахунок миттєвої потужності PV проводиться за формулою:

$$P_{PV} = G_t \cdot A \cdot \eta \cdot (1 - \gamma \cdot (T_R - 25)), \quad (2.4)$$

де G_t – радіація на площину модуля, Вт/м²; A – площа фотоелемента, м².

Сумарна обробка зазначених даних дозволяє отримати достовірну модель очікуваної генерації протягом року, що є основою для підбору встановленої потужності ФЕУ та акумуляторної системи. Отже, якість вихідних даних безпосередньо визначає точність проєктних рішень та ефективність майбутньої фотоелектричної установки.

2.3. Методика визначення необхідної потужності фотоелектричної системи та ємності акумуляції

Проектування конфігурації фотоелектричної системи починається з визначення енергетичного балансу господарства, який поєднує добове та сезонне споживання, потенційну генерацію фотоелектричних модулів, а також можливі втрати та коефіцієнти використання енергії. Основою розрахунків є добові графіки споживання, які дозволяють визначити пікові навантаження та

оцінити необхідний рівень встановленої потужності. Узагальнений підхід подано на рисунку 2.4.

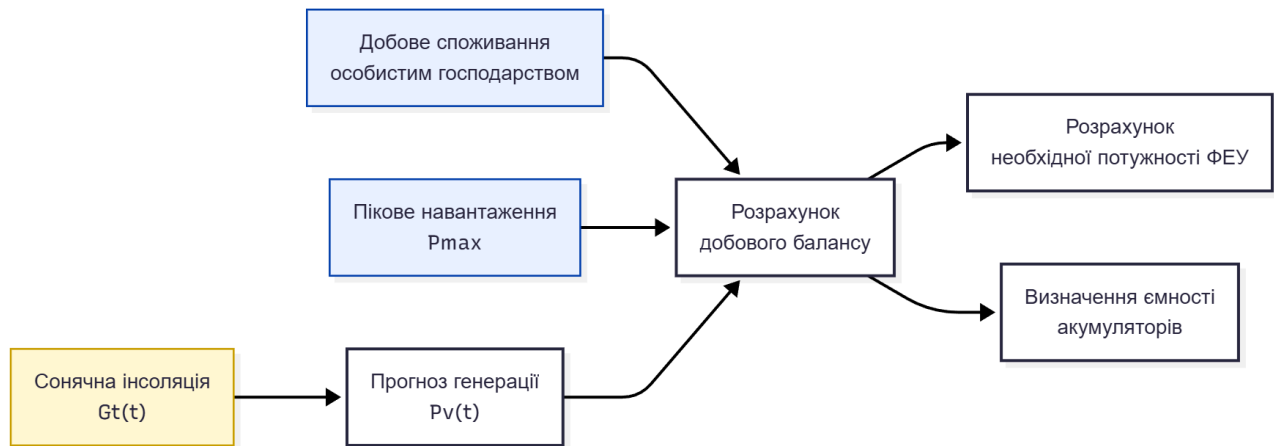


Рисунок 2.4 – Загальна схема визначення параметрів ФЕУ та акумуляції

В основі визначення потужності фотоелектричної установки лежить модель балансу добового споживання. Для координат особистого селянського господарства в с. Жулин добове споживання становить у середньому 11,2 кВт·год у літній період та до 16 кВт·год узимку. Генерація фотоелектричної системи описується залежністю:

$$E_{PV} = P_{inst} \cdot H \cdot P_R, \quad (2.5)$$

де E_{PV} – добове виробництво електроенергії, кВт·год / добу; P_{inst} – встановлена потужність системи, кВт; H – сонячна інсоляція за добу, кВт·год/м²·добу; P_R – коефіцієнт продуктивності, що враховує втрати в інверторі, кабелях та нагріванні (типово 0,72–0,82).

Для регіону дослідження середня інсоляція в літні місяці становить 5,2...5,6 кВт·год/м²·добу, що дозволяє приблизно оцінити вихід енергії.

Оцінка встановленої потужності виконується через рівняння балансу:

$$P_{inst} = \frac{E_{load}}{H \cdot P_R}, \quad (2.6)$$

де E_{load} – добове споживання, кВт·год / добу.

Для зимового режиму, який є визначальним, при $E_{load} = 16 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ та $H = 1.8 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ у грудні необхідна встановлена потужність становить:

$$P_{inst} = \frac{16}{1.8 \cdot 0.75} \approx 11.8 \text{ кВт}.$$

Це означає, що для повністю автономного режиму в зимовий період доцільно використовувати систему потужністю 10...12 кВт або комбіноване джерело з резервуванням.

Окремим етапом є визначення пікової потужності споживання. Для домогосподарства, що включає холодильник, насос, обладнання для тваринництва та побутову техніку, миттєве навантаження може досягати 2,5...3,0 кВт. Інверторна частина системи повинна враховувати цей запас, тому номінальна потужність інвертора має бути не меншою за 3,5...4 кВт.

Визначення ємності акумуляторної батареї здійснюється на основі автономності та добового споживання. Ємність у ват-годинах визначається через:

$$C_{bat} = \frac{E_{aut} \cdot N}{DOD \cdot \eta}, \quad (2.7)$$

де E_{aut} – добове споживання, кВт·год / добу; N – бажана кількість діб автономності (для особистого селянського господарств зазвичай 1–2 доби), од; DOD – допустима глибина розряду (0.8 для LiFePO_4); η – ККД акумуляторної системи (0.9–0.95).

Для $E_{aut} = 16 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ та $N = 1 \text{ доба}$:

$$C_{bat} = \frac{16}{0.8 \cdot 0.9} \approx 22.2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Це відповідає доцільності застосування батареї ємністю не менш ніж 20...25 кВт·год при роботі в гібридному або автономному режимі.

Для узагальненого представлення впливу параметрів на розмір системи складено табл. 2.3, що дозволяє оцінити можливі комбінації встановленої потужності та ємності АКБ.

Таблиця 2.3 – Оціночні параметри конфігурації ФЕУ

Параметр	Значення
Добове споживання (зима)	16 кВт·год
Пікове навантаження	2.5...3.0 кВт
Необхідна потужність ФЕУ	10...12 кВт
Рекомендована ємність АКБ	20...25 кВт·год
Кількість діб автономності	1...2 доби

Розрахунки показують, що зростання потужності модулів дає змогу зменшити необхідну ємність батареї, однак при цьому збільшується капітальна вартість системи. З іншого боку, збільшення акумуляції дозволяє ефективно покривати вечірні та нічні піки, а також уникати залежності від коливань погодних умов. Таким чином, вибір конфігурації є компромісом між вартістю, рівнем автономності та бажаними параметрами енергетичного забезпечення.

2.4. Вибір структури фотоелектричної установки та критерії її технічної оптимізації

Структура фотоелектричної установки визначається сукупністю компонентів, їх взаємним розташуванням, електричними режимами роботи та умовами взаємодії із внутрішнім навантаженням домогосподарства. На етапі проектування важливо встановити, чи буде система працювати в автономному, гібридному або мережевому режимі, оскільки це впливає на вибір інвертора, необхідну ємність акумуляції та загальний обсяг капітальних витрат. Загальна логіка формування структури наведена на рисунку 2.5.

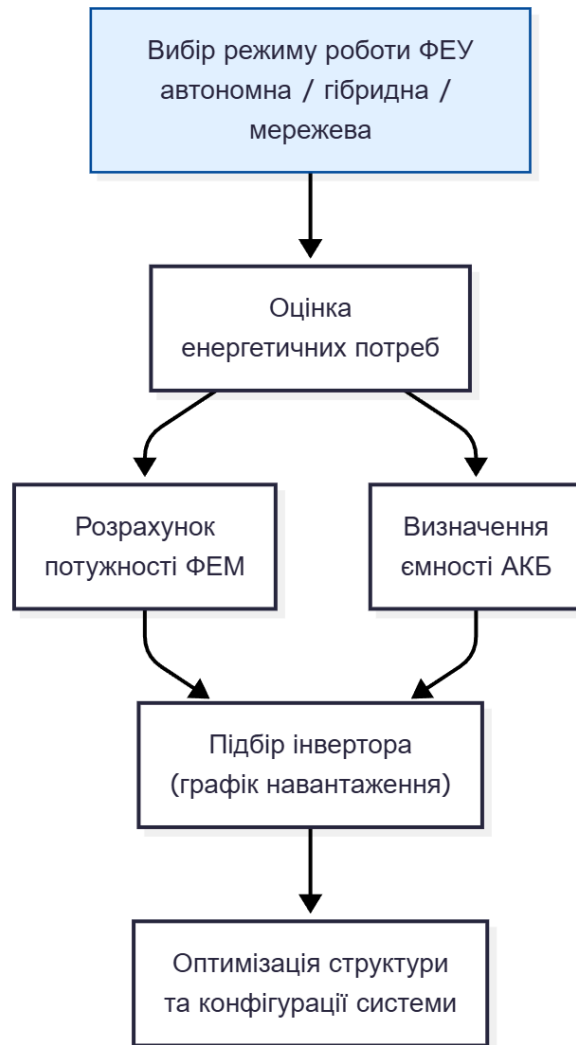


Рисунок 2.5 – Загальна схема формування структури фотоелектричної системи

Одним із аспектів оптимізації є співвідношення між встановленою потужністю модулів та ємністю акумуляторної батареї. Для домогосподарства в с. Жулин характерна наявність сезонних коливань споживання, тому система повинна забезпечувати покриття як літнього денного споживання, так і підвищених зимових навантажень. Основу технічної оптимізації становить баланс між виробництвом і споживанням, описуваний рівнянням:

$$E_{PV}(t) \geq E_{load}(t), \quad (2.8)$$

Умова (2.8) має виконуватися для більшості годин доби за умови достатньої інсоляції. Критичними є нічні години, які покриваються акумуляторами, а тому їх оптимальна ємність визначається за формулою:

$$C_{opt} = \frac{E_{night}}{DOD \cdot \eta}, \quad (2.9)$$

де E_{night} – нічне споживання, кВт·год / добу; DOD – глибина розряду; η – ефективність батареї.

Структура фотоелектричної системи може включати різні типи інверторів: мережеві, гібридні та автономні. Для сільських домогосподарств найбільш доцільними є гібридні інвертори, які дозволяють одночасно працювати з мережею, забезпечувати резервне живлення у разі відключень та керувати акумуляторною батареєю. Потужність інвертора має перевищувати максимальне миттєве навантаження домогосподарства на 20...30 %, що запобігає перевантаженню при роботі насосів і компресорів. При піковому навантаженні 3 кВт оптимально обирати інвертор потужністю 4...5 кВт.

Коефіцієнт оптимізації визначається також геометричними параметрами установки. Орієнтація модулів на південь під кутом 30...35° забезпечує максимальне річне виробництво за широти 49°N. У разі обмеження площі покрівлі можливо застосувати двосторонні модулі або комбіноване встановлення на землі. На рисунку 2.6 подано узагальнену структурну схему гібридної фотоелектричної системи.

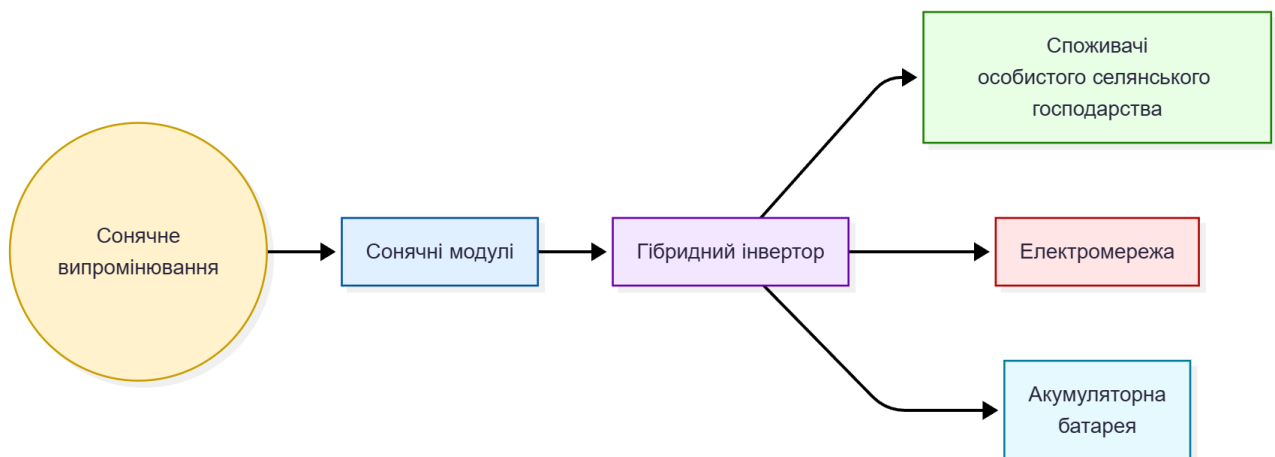


Рисунок 2.6 – Узагальнена структурна схема гібридної фотоелектричної установки

Технічна оптимізація також включає аналіз втрат, які визначають фактичну продуктивність. Загальна ефективність системи може бути подана у вигляді:

$$P_R = \eta_{inv} \cdot \eta_{cable} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_{soiling}, \quad (2.10)$$

де η_{inv} – ККД інвертора; η_{cable} – втрати у проводах; η_{temp} – температурні втрати модулів; $\eta_{soiling}$ – втрати від забруднення.

Типові значення наведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні втрати фотоелектричної системи

Вид втрат	Позначення	Типове значення
Втрати в інверторі	η_{inv}	0.94...0.97
Втрати в кабелях	η_{cable}	0.97...0.99
Температурні втрати	η_{temp}	0.90...0.95
Забруднення модулів	$\eta_{soiling}$	0.95...0.98

На основі отриманих результатів робимо висновок, що оптимізація фотоелектричної системи полягає у досягненні рівноваги між встановленою потужністю, рівнем автономності, сезонними коливаннями інсоляції та допустимою вартістю обладнання. Для умов особистого селянського господарства в с. Жулин доцільно використовувати гібридну структуру з модульною потужністю 10...12 кВт та акумулятором 20...25 кВт·год, що забезпечує стабільне енергозабезпечення навіть за низької зимової інсоляції.

2.5. Розрахунок прогнозованої генерації та рівня автономності домогосподарства

Оцінка доцільності впровадження фотоелектричної установки для особистого селянського господарства неможлива без кількісного прогнозу річної генерації та аналізу того, яку частку власних потреб ця система здатна

покривати. У попередніх підпунктах було обґрунтовано добове й місячне електроспоживання господарства в с. Жулин, а також підібрано орієнтовну встановлену потужність фотоелектричної системи на рівні 10...12 кВт. Наступним кроком є розрахунок прогнозованої річної генерації та визначення показників власного споживання, енергетичної автономності й ефективності роботи системи.

Розрахунок річної генерації доцільно виконувати за помісячною схемою, використовуючи дані про сонячну інсоляцію та коефіцієнт продуктивності системи. Узагальнена модель для визначення річного виробітку енергії має вигляд:

$$E_{PV}^{year} = P_{inst} \cdot \sum_{m=1}^{12} H_m \cdot P_R, \quad (2.11)$$

де E_{PV}^{year} – прогнозована річна генерація фотоелектричної системи, кВт·год/рік; P_{inst} – встановлена потужність ФЕУ, кВт; H_m – середньомісячна еквівалентна інсоляція, кВт·год/кВт_р (умовні «сонячні години» для місяця m); P_R – коефіцієнт продуктивності, який враховує всі системні втрати (інвертор, кабелі, нагрівання, забруднення модулів).

Для якісно спроектованої системи в умовах Львівської області значення P_R можна приймати в межах 0,75...0,8.

Якщо для координат домогосподарства прийняти, що середньорічний вихід на 1 кВт встановленої потужності становить приблизно 1050 кВт·год/рік, то для системи потужністю 10 кВт прогнозована річна генерація буде:

$$E_{PV}^{year} \approx 10 \cdot 1050 = 10500 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

За умови, що річне споживання домогосподарства за результатами аналізу становить близько 5000 кВт·год/рік, фотоелектрична установка потенційно здатна виробляти удвічі більше енергії, ніж потрібно господарству. При цьому питання полягає не лише в загальному обсязі генерації, а й у тому, яка частка цієї енергії буде використана самим домогосподарством, а яка – піде в мережу або залишиться невикористаною.

Ключовими показниками тут є коефіцієнт власного споживання і коефіцієнт енергетичної автономності. Коефіцієнт власного споживання характеризує, яка частка виробленої фотоелектричною системою енергії була спожита самим домогосподарством:

$$K_{\text{влас}} = \frac{E_{\text{self}}}{E_{\text{PV}}^{\text{year}}}, \quad (2.12)$$

де E_{self} – обсяг електроенергії, виробленої системою і безпосередньо спожитої домогосподарством (включно з енергією, що пройшла через акумуляторну батарею).

Коефіцієнт енергетичної автономності показує, яку частку річного споживання особистого селянського господарства вдалося забезпечити за рахунок власної фотоелектричної генерації:

$$K_{\text{авт}} = \frac{E_{\text{self}}}{E_{\text{load}}^{\text{year}}}, \quad (2.13)$$

де $E_{\text{load}}^{\text{year}}$ – річне споживання електроенергії домогосподарством.

За результатами попередніх розрахунків можна припустити, що за наявності акумуляторної батареї ємністю близько 20–25 кВт·год домогосподарство здатне використати приблизно 60–70 % усієї виробленої фотоелектричною системою енергії. Тоді при

$E_{\text{PV}}^{\text{year}} \approx 10500 \text{ кВт·год} / \text{рік}$ і $E_{\text{self}} \approx 7000 \text{ кВт·год} / \text{рік}$ коефіцієнт власного споживання становитиме:

$$K_{\text{влас}} = \frac{7000}{10500} \approx 0,67, \quad (2.14)$$

Тобто приблизно 67%. Оскільки річне споживання домогосподарства оцінюється на рівні 5000 кВт·год/рік, коефіцієнт енергетичної автономності дорівнюватиме:

$$K_{\text{авт}} = \frac{7000}{5000} = 1,4.$$

Фізично це означає, що фотоелектрична система не лише повністю покриває річні потреби домогосподарства, а й формує певний надлишок енергії,

який може бути використано для експорту в мережу або збільшення навантаження (наприклад, додаткове обладнання у господарстві чи електротранспорт).

Для наочності узагальнені розрахункові показники наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні показники прогнозованої генерації та автономності особистого селянського господарства

Показник	Орієнтовне значення
Встановлена потужність ФЕУ	10 кВт
Річна генерація ФЕУ	10 500 кВт·год/рік
Річне споживання домогосподарства	5 000 кВт·год/рік
Власне споживання від ФЕУ	7 000 кВт·год/рік
Надлишок генерації (експорт / невикористана енергія)	3 500 кВт·год/рік
Коефіцієнт власного споживання	0,67
Коефіцієнт енергетичної автономності	1,40

Для подальшого аналізу зручно розглядати процес розрахунку рівня автономності у вигляді послідовних кроків: від вихідних даних до отримання інтегральних показників. Логічні зв'язки між основними параметрами показано на рисунку 2.7.

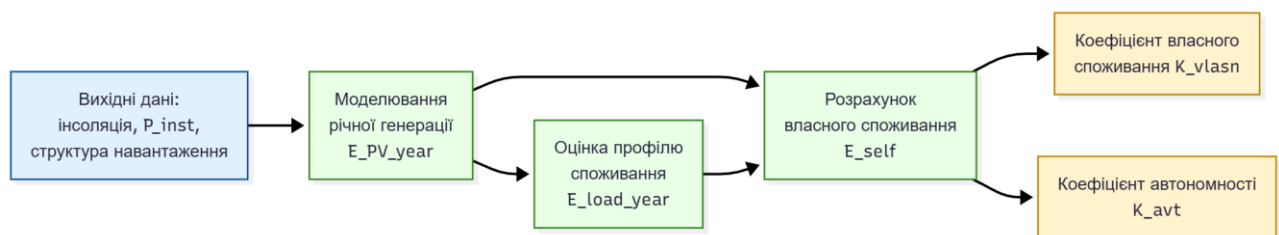


Рисунок 2.7 – Узагальнена схема розрахунку показників генерації та автономності

Отримані показники дають змогу оцінити не лише енергетичну спроможність фотоелектричної системи, а й логіку подальшої оптимізації її структури. Якщо коефіцієнт власного споживання є надто низьким, доцільно розглянути зменшення встановленої потужності або впровадження додаткових

споживачів, здатних працювати у періоди пікової генерації (наприклад, електричні бойлери, системи зберігання тепла). Якщо ж коефіцієнт автономності менший за одиницю, необхідно переглянути конфігурацію системи, збільшити ємність акумулятора або переглянути логіку пріоритезації навантажень. Таким чином, методика розрахунку прогнозованої генерації та рівня автономності є основною ланкою між енергетичним моделюванням та практичним проєктуванням фотоелектричної установки для конкретного домогосподарства.

РОЗДІЛ 3.

ПРОЄКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

3.1. Вибір схеми фотоелектричної системи

Проекткування фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства починається з узгодження розрахованих енергетичних потреб із технічними можливостями реального обладнання. За результатами аналізу споживання та інсоляції для особистого селянського господарства в с. Жулин прийнято орієнтовну встановлену потужність фотоелектричної частини на рівні $P_{inst} \approx 10 \text{ кВт}$, що дозволяє покривати добове зимове споживання 15...16 кВт·год за рахунок власної генерації з урахуванням коефіцієнта продуктивності системи. Узагальнена структурна схема гібридної фотоелектричної установки, адаптована до умов особистого селянського господарства, наведена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема гібридної фотоелектричної установки, адаптована до умов особистого селянського господарства

У схемі (рис. 3.1) відображено взаємодію сонячних модулів, акумуляторної батареї, гібридного інвертора, зовнішньої електромережі та побутових споживачів, а також реалізацію двонапрявленого потоку енергії між домогосподарством і мережею.

З урахуванням наведених характеристик можна зробити висновок, що обрана конфігурація забезпечує узгодженість напруг і струмів на всіх рівнях – від фотоелектричних модулів до інвертора та акумуляторного блоку. Система здатна працювати в режимі максимально можливого власного споживання з можливістю обмеженого експорту надлишкової енергії в мережу. Рисунок 3.1, на якому показано структуру гібридної системи з двонаправленим потоком енергії, логічно відображає взаємодію між сонячним масивом, накопичувачем енергії, інвертором і побутовими навантаженнями та може бути використаний як базова схема для подальших розрахунків режимів роботи ФЕУ.

3.2. Розрахунок обладнання фотоелектричної системи та формування її конфігурації

Розрахунок кількості сонячних модулів виконується на основі співвідношення між бажаною встановленою потужністю та номінальною потужністю одного модуля. Для сучасних панелей класу 540...560 Вт доцільно прийняти модуль потужністю $P_{\text{mod}} = 550 \text{ Вт}$ із робочою напругою $V_{\text{mp}} \approx 42 \text{ В}$ та струмом $I_{\text{mp}} \approx 13,1 \text{ А}$. Необхідна кількість модулів визначається за формулою:

$$N_{\text{mod}} = \frac{P_{\text{inst}}}{P_{\text{mod}}}. \quad (3.1)$$

За умови $P_{\text{inst}} \approx 9,9 \text{ кВт}$ отримуємо:

$$N_{\text{mod}} = \frac{9900}{550} = 18 \text{ модулів.}$$

Таке значення дозволяє сформувати дві паралельні послідовні гілки по дев'ять модулів у кожній (конфігурація 9S2P). Послідовне з'єднання дев'яти

модулів забезпечує напругу на рівні $V_{\text{string}} \approx 9 \cdot 42 \approx 378 \text{ В}$ при робочому режимі та приблизно $V_{\text{oc, string}} \approx 9 \cdot 50 = 450 \text{ В}$ у холостому ході, що не перевищує допустиму вхідну напругу більшості гібридних інверторів на 5...10 кВт. Сумарний струм масиву в точці максимальної потужності становитиме $I_{\text{array}} \approx 2 \cdot 13,1 = 26,2 \text{ А}$, що враховується при виборі перерізу кабелів і захисної апаратури.

Оскільки обрана топологія системи є гібридною, функції MPPT-контролера заряду реалізуються безпосередньо в інверторі. Це дозволяє відмовитися від окремого контролера та зменшити кількість силових з'єднань. Базовим елементом системи є гібридний інвертор/зарядний пристрій потужністю 5,5 кВт із можливістю паралельної роботи двох пристроїв, що забезпечує сумарну потужність до 11 кВт. Номінальна вхідна напруга по постійному струму для такого інвертора становить 360...400 В, максимально допустима – близько 500...550 В, що узгоджується з розрахованими параметрами масиву з 18 модулів. По змінному струму інвертор здатен забезпечити живлення критичного навантаження домогосподарства потужністю до 4...5 кВт у безперебійному режимі, а надлишок енергії за наявності мережі може експортуватися до зовнішнього електропостачальника.

Наступним кроком є вибір акумуляторної батареї. Для забезпечення автономності щонайменше на одну добу в умовах зимового режиму використовується розрахунок ємності за добовим споживанням і глибиною розряду. Енергія, яку необхідно зберегти, дорівнює добовому споживанню $E_{\text{aut}} = 16 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Для системи на 48 В ємність у ампер-годинах обчислюється як:

$$C_{\text{Ah}} = \frac{E_{\text{aut}}}{U_{\text{sys}} \cdot DOD \cdot \eta} \quad (3.2)$$

де U_{sys} – номінальна напруга акумуляторної ланки, $U_{\text{sys}} = 48 \text{ В}$; DOD – допустима глибина розряду для LiFePO_4 акумуляторів, $DOD = 0,8$; η – ККД циклу заряд–розряд, $\eta = 0,9$.

Таблиця 3.1 – Розрахункові параметри конфігурації фотоелектричної системи

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Встановлена потужність ФЕМ	кВт	9,9
Потужність одного модуля	Вт	550
Кількість модулів	шт.	18
Схема з'єднання масиву	–	9S2P
Робоча напруга масиву	В	≈ 378
Струм масиву в точці МРР	А	≈ 26
Номінальна потужність інвертора	кВт	2×5,5 (паралельна робота)
Номінальна напруга АКБ	В	48
Розрахункова ємність АКБ	А·год	≈ 462
Прийнята ємність АКБ	–	48 В, 500 А·год (24 кВт·год)

Підставивши числові значення у формулу (3.2), одержуємо:

$$C_{Ah} = \frac{16000}{48 \cdot 0,8 \cdot 0,9} \approx 462 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням запасу за ємністю доцільно обрати батарейний блок 48 В 500 А·год, що відповідає енергетичній ємності близько 24 кВт·год. Це дає змогу покривати нічне споживання та короткочасні періоди зниженої інсоляції без залучення енергії з мережі.

На основі отриманих результатів формуються узагальнені параметри конфігурації фотоелектричної системи, наведені в таблиці 3.1.

Кінцевий етап добору обладнання полягає в уточненні технічних характеристик конкретних моделей, наявних на ринку. У таблиці 3.2 наведено приклад технічного паспорта обраних компонентів, узгоджених між собою за електричними параметрами.

Аналіз вартості та технічних характеристик підібраних компонентів фотоелектричної системи свідчить про збалансованість конфігурації як з погляду енергетичних можливостей, так і з погляду економічної доцільності.

Сонячний масив складається з вісімнадцяти модулів потужністю по 550 Вт, що забезпечує сумарну встановлену потужність 9,9 кВт. Вартість одного модуля становить близько 4000 грн, а загальна вартість масиву досягає орієнтовно 72 тис. грн. Ця величина є типовою для сучасних монокристалічних панелей преміум-класу й забезпечує значний ресурс генерації протягом усього світлового дня.

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики обраних компонентів фотоелектричної системи

Компонент	Тип / модель (виробник)	Номінальні параметри	Орієнтовна ціна
Сонячний модуль	Jinko Solar Tiger Neo N-type 550 Вт	Потужність – 550 Вт; Напруга $V_{mp} \approx 42$ В; Струм $I_{mp} \approx 13,1$ А; $V_{oc} \approx 50$ В; $ККД \approx 20,5\%$	4000 грн за модуль (оцінка на основі моделі 440Вт) [15]
Гібридний інвертор	Growatt SPF 5500 ES (Growatt)	Потужність АС – 5,5 кВт; Напруга АКБ – 48 В; Вхід DC до ~ 450 В; ККД $\sim 95 \dots 97\%$	27000 грн [1]
Акумуляторна батарея	Felicity ESS LiFePO ₄ 48 В 500 А·год (≈ 24 кВт·год)	Напруга – 48 В; Ємність – 500 А·год; Енергія ≈ 24 кВт·год; DOD 80 %; Цикли > 6000	258000 грн [2]
Силові кабелі DC	Мідь 6–10 мм ² (PV1-F)	Перетин 6–10 мм ² ; Струм 40–60 А; Ізоляція до 1 кВ	66 грн/м [9]
Захисна апаратура	ABB / Schneider DC/AC автомати	Номінальний струм DC 32–40 А, АС 25–40 А; Клас захисту, дугогасіння	Орієнтовно 2000...4000 грн за блок (залежно від комплектації)

Гібридний інвертор номінальною потужністю 5,5 кВт, вартістю приблизно 27 тис. грн, здатний працювати з масивом до 10 кВт завдяки можливості перевантаження по постійному струму. Його технічні параметри дозволяють реалізувати паралельну роботу, забезпечувати резервне живлення та управляти процесами заряджання акумуляторної батареї. Така конфігурація забезпечує не лише перетворення енергії, а й гнучке керування потоками в системі.

Акумуляторна батарея типу LiFePO_4 номінальною ємністю 500 А·год і енергетичним запасом близько 24 кВт·год є найбільш капіталомістким елементом системи. Її вартість становить близько 258 тис. грн, що обумовлено високою питомою енергоємністю, великим ресурсом (понад 6000 циклів) та безпечними робочими характеристиками. Саме акумулятор визначає рівень автономності домогосподарства та дозволяє компенсувати нічне споживання.

Додаткові елементи, зокрема силові кабелі та захисна апаратура, формують незначну частку від загальної вартості системи. Орієнтовна вартість кабелів становить близько 2300 грн, а комплект автоматів і запобіжників – близько 3500 грн. Ці витрати забезпечують безпечну роботу системи, правильний розподіл навантажень і захист обладнання від аварійних режимів.

Сумарна приблизна вартість проєктованої фотоелектричної системи становить близько 362,8 тис. грн. Основну частку займає акумуляторний блок, тоді як сонячні панелі та інвертор формують близько третини цієї суми. У цілому система забезпечує встановлену потужність майже 10 кВт, можливість повної добової автономності та високий рівень енергетичної незалежності домогосподарства в умовах сільської місцевості.

3.3. Побудова структурної та електричної схем фотоелектричної установки

Проектування фотоелектричної установки для енергозабезпечення особистого селянського господарства передбачає формування двох взаємопов'язаних технічних моделей – структурної схеми, яка відображає логічні взаємозв'язки між елементами системи, та електричної схеми, що деталізує силові та керуючі з'єднання між обладнанням. Обидві схеми використовуються для обґрунтування вибору конфігурації, розрахунку режимів роботи та подальшої експлуатації системи.

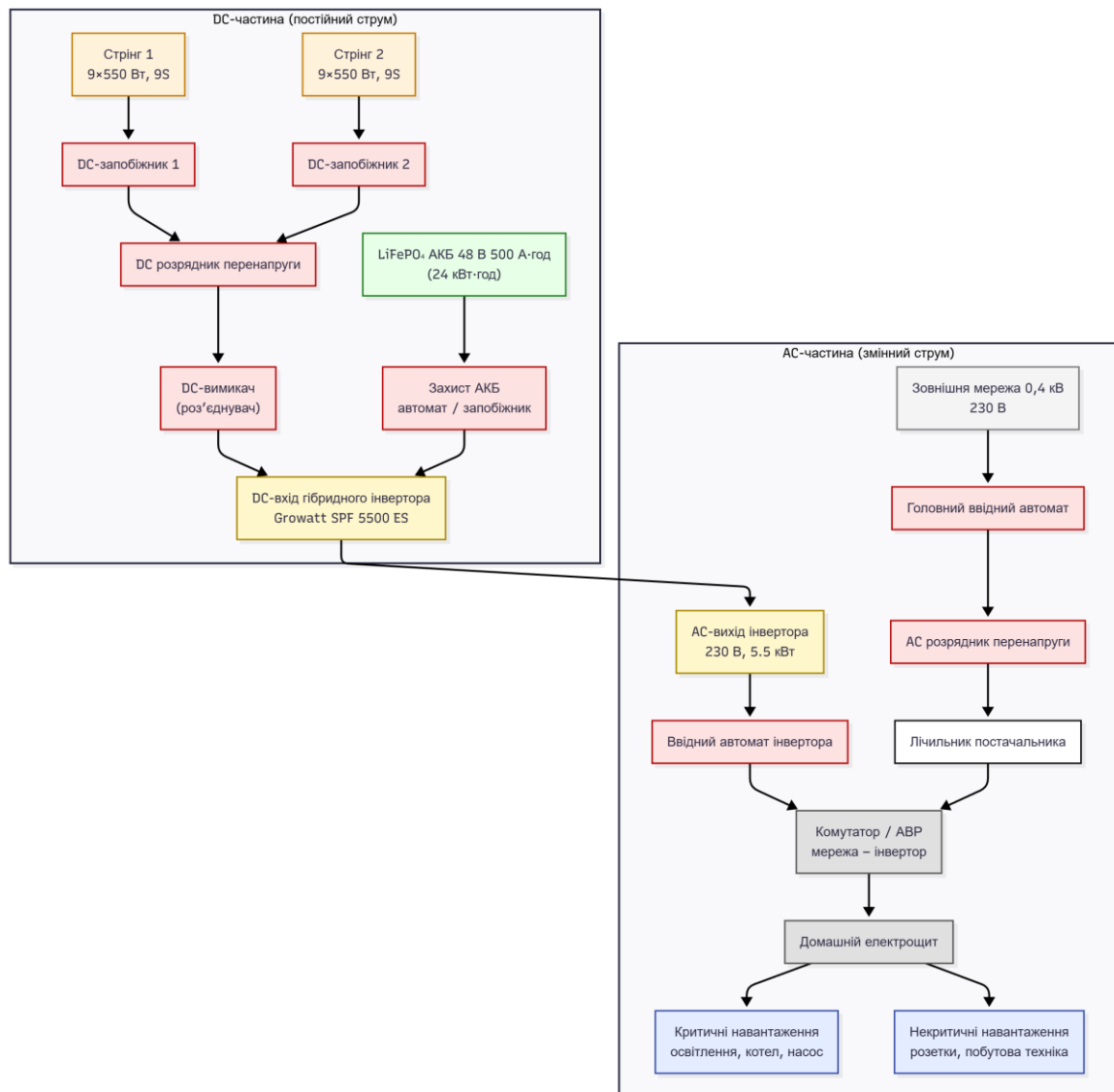


Рисунок 3.2 – Узагальнена структурна схема фотоелектричної установки для домогосподарства

Структурна схема дозволяє узагальнити основні функціональні блоки, серед яких: сонячний масив, гібридний інвертор, акумуляторна батарея, мережеве підключення та навантаження домогосподарства. На ній відображено потоки енергії між компонентами, включно з двонапрямленою взаємодією між інвертором і зовнішньою електромережею. Такий тип подання є доцільним на етапі проєктування, оскільки забезпечує повне розуміння роботи системи в нормальних і аварійних режимах. Структурна схема на рисунку 3.2 демонструє логічну послідовність перетворення енергії – від сонячного випромінювання до споживача – та інтеграцію резервного живлення.

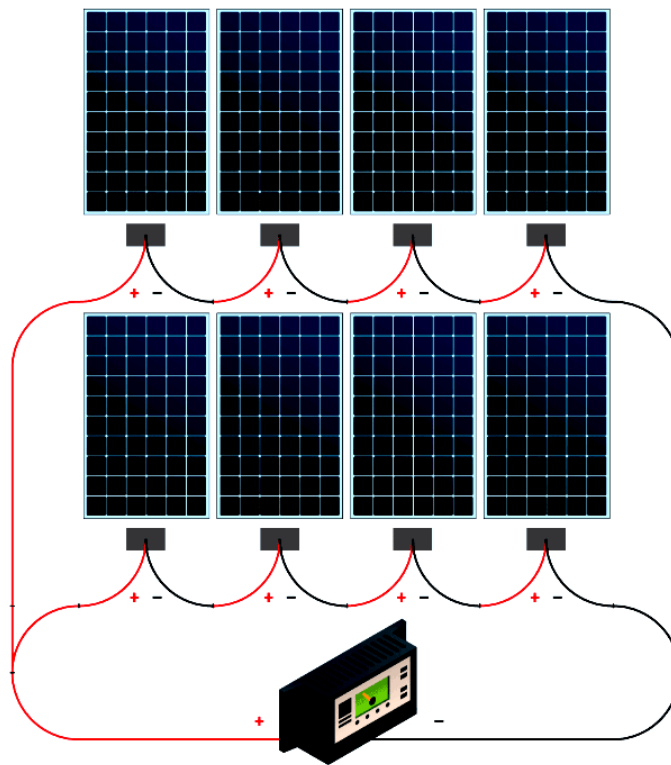


Рисунок 3.3 – Послідовно-паралельна схема (9S2P) з MPPT-контролем

Послідовно-паралельна конфігурація 9S2P передбачає формування двох стрінгів, у кожному з яких дев'ять фотоелектричних модулів з'єднані послідовно. Таке з'єднання забезпечує підвищення робочої напруги масиву до рівнів, необхідних для оптимальної роботи MPPT-контролера та гібридного інвертора. Після з'єднання модулі кожного стрінгу паралеляються між собою, що

дозволяє подвоїти доступний струм та збільшити загальну потужність генерації без зміни напруги робочої шини.

MPPT-контролер виконує безперервний пошук точки максимальної потужності модулів (Maximum Power Point Tracking), що дозволяє компенсувати нерівномірне освітлення, часткове затінення та температурні коливання. У результаті система працює стабільніше, ніж у конфігураціях із традиційними ШІМ-контролерами.

Така структура масиву забезпечує збалансоване співвідношення напруги та струму, мінімізує втрати в кабелях та підвищує ефективність зарядження акумуляторної батареї й роботи інвертора в гібридному режимі.

Електрична схема (силова) деталізує всі елементи підключення: послідовно-паралельне з'єднання сонячних модулів, кабельні лінії, захисну апаратуру на боці постійного та змінного струму, а також точки підключення споживачів. Вона є основою для вибору перерізів проводів, номіналів автоматів і параметрів захисту. На рисунку 3.4 зображена практична електрична схема гібридної ФЕУ, що найбільш наближена до проєктної моделі, а її компоненти відповідають обраним у попередньому пункті інвертору, акумуляторній батареї та фотоелектричному масиву.

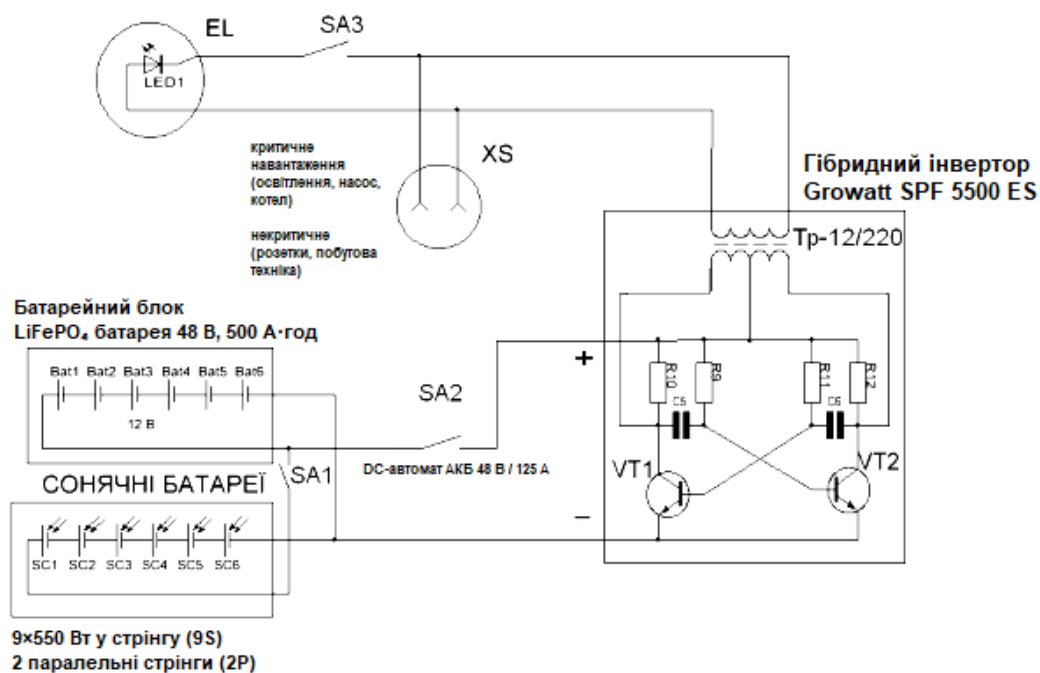


Рисунок 3.4 – Електрична схема гібридної фотоелектричної установки

Для систематизації основних параметрів структурної та електричної частини складено таблицю 3.3, що містить ключові характеристики та призначення елементів установки.

Таблиця 3.3 – Основні елементи структурної та електричної схеми ФЕУ

Елемент	Призначення	Ключові параметри
Сонячний масив	Генерація електроенергії з сонячного випромінювання	18 модулів по 550 Вт; конфігурація 9S2P; загальна потужність 9,9 кВт
Гібридний інвертор	Перетворення енергії, управління зарядом АКБ, паралельна робота з мережею	Growatt SPF 5500 ES; вихідна потужність 5,5 кВт; MPPT 2×18 А
Акумуляторна батарея	Забезпечення автономності, стабілізація енергопотоків	LiFePO ₄ 48 В 500 А·год; енергія 24 кВт·год
Кабельні лінії	Передавання DC/AC потужності між елементами	PV1-F 6–10 мм ² ; припустимий струм до 60 А
Захисна апаратура	Захист від перевантаження, КЗ, перенапруг	Автомати ABB/Schneider 32...40 А DC, 25...40 А AC
Домашній електрощит	Розподіл і захист споживачів	Введення 230 В; групові автомати
Зовнішня мережа	Додаткове живлення та можливий експорт надлишків	Лінія 0,4 кВ; лічильник двонапрявлений

Таким чином, структурна та електрична схеми забезпечують повне уявлення про роботу фотоелектричної установки та підтверджують технічну логіку обраної конфігурації. Структурна схема відображає функціональні взаємозв'язки, тоді як електрична – конкретні з'єднання, номінали та точки інтеграції, що дозволяє виконувати подальші розрахунки, монтаж і тестування системи у реальних умовах.

3.4. Оцінювання технічної надійності та режимів експлуатації фотоелектричної системи

Оцінювання технічної надійності фотоелектричної установки є необхідним елементом під час проектування системи для приватного домогосподарства, оскільки робота в умовах нерівномірної генерації, зміни погодних параметрів та значних пікових навантажень створює додаткові вимоги до вибору обладнання та режимів експлуатації. Надійність системи визначається сукупністю показників, що охоплюють стабільність роботи сонячних модулів, циклічну стійкість акумуляторної батареї, поведінку інвертора під час переходів між режимами та коректність роботи захисної апаратури. Визначення цих показників дозволяє оцінити очікуваний термін служби ключових компонентів та ймовірність виникнення відмов протягом експлуатації.

У роботі основна увага приділяється гібридному інвертору як центральному елементу системи, здатному працювати одночасно з фотоелектричним масивом, акумуляторною батареєю та зовнішньою електромережею. Для забезпечення коректного переходу між режимами «PV – навантаження», «АКБ – навантаження» та «мережа – навантаження» застосовується внутрішній алгоритм керування на основі порівняння напруги та доступної потужності (рис. 3.5).

Умовою стабільної роботи інвертора є дотримання допустимого діапазону напруги на батареї, що визначається виразом:

$$U_{bat}^{min} \leq U_{bat} \leq U_{bat}^{max} \quad (3.3)$$

де U_{bat}^{min} – мінімальна робоча напруга LiFePO₄ батареї (44,8 В); U_{bat}^{max} – верхня межа зарядженого стану (54,0 В).

Відхилення за межі діапазону призводить до зростання ризику деградації елементів та зменшення фактичного ресурсу батареї.

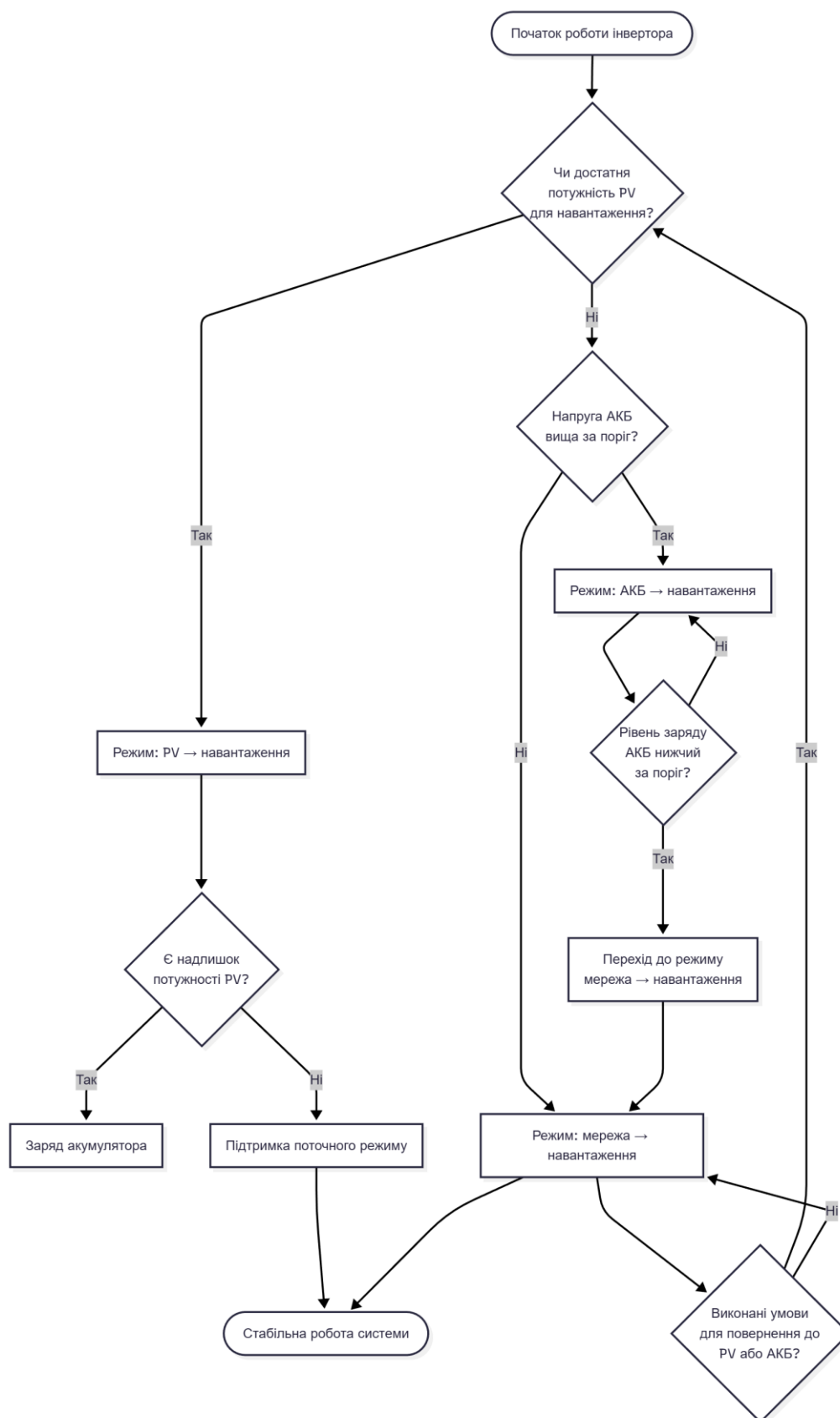


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму розподілу енергопотоків у гібридній фотоелектричній установці

Оцінювання теплового режиму інвертора виконується на основі розрахунку внутрішніх втрат, які пропорційні перетворюваній потужності. Для номінального режиму потужності $P_{AC}=5.5$ кВт теплові втрати визначаються формулою:

$$P_{loss} = P_{AC} \cdot (1 - \eta) \quad (3.4)$$

де η – коефіцієнт корисної дії гібридного інвертора.

Для моделі Growatt SPF 5500 ES типовий ефективний ККД становить 0,95...0,97. Враховуючи ці значення, теплові втрати у номінальному режимі досягають 165...275 Вт, що потребує наявності нормованого повітряного охолодження та дотримання вимог щодо монтажу.

Надійність акумуляторної батареї оцінюється через аналіз глибини розряду DOD та кількості допустимих циклів. Для LiFePO₄ батареї з ємністю 500 А·год параметр життєвого циклу становить понад 6000 циклів при DOD=80%. У разі зменшення глибини розряду до 50 % кількість стабільних циклів збільшується до 9000...10000, що підтверджує необхідність оптимального керування зарядом та розрядом. Добове енергоспоживання домогосподарства становить близько 18...22 кВт·год у літній період та 28...32 кВт·год узимку, що дозволяє забезпечити нормований режим експлуатації батареї та уникати надмірних глибоких розрядів.

Надійність сонячних модулів визначається температурним впливом та умовами опромінення. Температурний коефіцієнт потужності для модулів на 550 Вт становить приблизно – 0,34 %/°C. Ефективність модулів знижується при підвищенні температури, і це враховується під час місцевого аналізу режимів роботи. Для типових умов у Львівській області максимальні робочі температури модулів становлять 55...65 °C, що відповідає зменшенню потужності приблизно на 7...10 % від номінальної. Втрати включаються у розрахунок річної генерації через коефіцієнт продуктивності P_R .

Для узагальнення показників технічної надійності сформовано таблицю 3.4, що охоплює базові параметри роботи ключових компонентів.

Таблиця 3.4 – Основні показники технічної надійності системи

Компонент	Нормальний режим	Критичні обмеження	Ресурс
Сонячні модулі 2×9S	7...9 кВт миттєвої потужності	$T > 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, затінення	25...30 років
Інвертор 5,5 кВт	$P_{AC} \leq 5.5\text{ кВт}$, $\eta=95\text{--}97\%$	Перевантаження, перенапруга	10...12 років
АКБ LiFePO ₄ 24 кВт·год	$DOD \leq 80\%$, $I \leq 120\text{ А}$	$DOD > 90\%$, перегрів	6000...8000 циклів
Захисна апаратура	відповідність номіналам	коротке замикання, перенавантаження	10 років

Проведений аналіз показує, що забезпечення стабільної роботи фотоелектричної системи можливе за умови вибору оптимальних режимів заряду та розряду акумуляторної батареї, дотримання вимог до температурного режиму модулів та забезпечення захисної апаратури відповідними номіналами. Гібридний інвертор, що працює в багаторежимному середовищі, потребує контролю параметрів вхідної напруги та потужності, проте за умови правильного монтажу та експлуатації його надійність повністю відповідає вимогам до систем приватного домогосподарства.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Небезпечні виробничі чинники та їхні джерела

Функціонування фотоелектричної установки в особистому селянському господарстві пов'язане з дією низки шкідливих і небезпечних виробничих факторів, що виникають під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування обладнання. Їх своєчасне виявлення та оцінювання необхідні для формування безпечних умов праці та розроблення заходів щодо зниження виробничих ризиків. На характер та інтенсивність впливу факторів суттєво впливають потужність системи, тип установлення сонячних панелей, наявність акумуляторної батареї та спосіб підключення до внутрішньої електромережі.

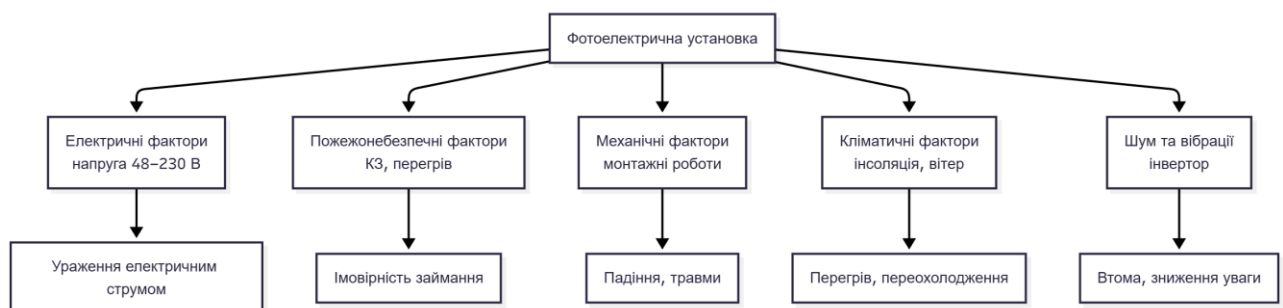


Рисунок 4.1 – Структура основних небезпечних факторів при експлуатації ФЕУ

Основні небезпечні фактори пов'язані з електричним струмом, адже елементи системи працюють під напругою від 48 В на боці акумуляторної батареї до 230 В на АС-виході інвертора. До потенційно небезпечних належать також теплові ефекти нагрівання кабелів, ризики займання у разі короткого замикання та можливість ураження людини під час втручання у роботу інвертора чи електрощита. Серед шкідливих факторів значення мають метеорологічні умови під час зовнішніх робіт, шум від силового обладнання, ультрафіолетове випромінювання та підвищена фізична втома при виконанні монтажних операцій.

Для системи фотоелектричного живлення характерне поєднання факторів фізичної, електричної та пожежної небезпеки, що обумовлює необхідність комплексного підходу до організації безпечної експлуатації. Узагальнений перелік основних виробничих факторів подано у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Шкідливі та небезпечні виробничі фактори при експлуатації фотоелектричної установки

Група факторів	Джерело виникнення	Характер впливу на працівника	Можливі наслідки
Електричні	Інвертор, АКБ, мережа 230 В, з'єднувальні кабелі	Дотик до частин під напругою, некоректне занулення або заземлення	Ураження електричним струмом, опіки, фібриляція серця
Термічні	Нагрівання проводів та інвертора, сонячні панелі під інсоляцією	Контакт із перегрітими елементами	Опіки, термічні травми
Пожежонебезпечні	Короткі замикання, пошкодження ізоляції, перевантаження АКБ	Іскріння та займання	Пожежа, руйнування обладнання
Механічні	Монтажні роботи на висоті, фіксація панелей	Падіння, травмування під час встановлення	Забої, переломи
Метеорологічні	Вітрові та температурні навантаження під час монтажу	Погіршення самопочуття, перегрів або переохолодження	Сонячні опіки, гіпотермія
Хімічні	Електроліт у дефектних АКБ (якщо не LiFePO ₄)	Контакт із токсичними речовинами	Подразнення шкіри, хімічні опіки
Шумові	Робота інвертора та автоматики	Тривалий вплив шуму	Погіршення слуху, підвищена втома

Аналіз узагальнених даних таблиці 4.1 показує, що під час експлуатації фотоелектричної установки домінують саме електричні та пожежонебезпечні

фактори, які становлять понад 60% потенційних виробничих ризиків. Це пов'язано з роботою системи під напругою 48 В DC на боці акумуляторної батареї та 230 В AC після інвертора, що створює ймовірність ураження електричним струмом та локального перегріву кабельних ліній. Пожежні фактори займають близько 25% ризикової структури, оскільки короткі замикання, перевантаження АКБ або пошкодження ізоляції можуть призвести до займання.

Механічні та кліматичні фактори становлять приблизно 10...12% від загального обсягу небезпек і найбільш характерні на етапі монтажу сонячних панелей. Їхній вплив проявляється через падіння з висоти, травмування при встановленні конструкцій або перегрів працівника під час роботи на відкритому повітрі. Частка шумових та хімічних факторів залишається мінімальною – не більше 3...5 %, однак вони також потребують контролю, особливо при використанні акумуляторів зі рідким електролітом або при тривалому перебуванні поблизу інвертора.

Вцілому забезпечення безпеки праці у системі фотоелектричної установки потребує комплексного підходу, де пріоритетними є електрозахисні заходи, система пожежної профілактики та регламентований порядок виконання монтажних робіт.

4.2. Безпечні умови праці під час електропостачання особистого селянського господарства

Створення безпечних умов праці при експлуатації фотоелектричної установки є ключовим елементом забезпечення надійності електропостачання та запобігання нещасним випадкам. В умовах особистого селянського господарства це завдання ускладнюється тим, що роботи виконуються зазвичай у побутових приміщеннях, на відкритому повітрі або в місцях, де одночасно перебувають члени сім'ї. Тому необхідно врахувати особливості монтажу,

експлуатації і ремонту установки, дотримуючись затверджених правил електробезпеки та пожежної профілактики.

Безпечні умови праці забезпечуються правильним вибором захисних пристроїв, належним станом електромонтажних елементів, організацією робіт із використанням засобів індивідуального захисту та дотриманням вимог нормативних документів. Особливо важливо контролювати справність інвертора, акумуляторної батареї, кабельних ліній та комутаційної апаратури, оскільки саме ці елементи становлять найбільшу потенційну небезпеку під час експлуатації.

Під час виконання робіт на покрівлі, де встановлено сонячні модулі, важливим є дотримання правил безпеки на висоті. Необхідно враховувати метеорологічні умови, зокрема опади та пориви вітру, які можуть спричинити ковзання або падіння. Монтажні роботи допускається проводити тільки із застосуванням страхувальних засобів та драбин зі стійкою конструкцією.



Рисунок 4.2 – Основні напрямки забезпечення безпеки під час електропостачання домогосподарства

Захист від ураження електричним струмом забезпечується шляхом встановлення автоматичних вимикачів відповідного номіналу, пристроїв захисного відключення (ПЗВ), запобіжників, а також правильного заземлення інвертора та всіх металевих конструкцій. Для гібридних інверторів особливо

важливим є контроль перехідних процесів при переключенні між джерелами живлення, оскільки в такі моменти можливі короточасні перенавантаження.

Таблиця 4.2 – Основні заходи забезпечення безпечних умов праці при експлуатації ФЕУ

Напрямок безпеки	Заходи	Мета
Електробезпека	Встановлення автоматів, ПЗВ, правильне заземлення, маркування кабелів	Запобігання ураженню струмом та коротким замиканням
Пожежна безпека	Контроль перетину кабелів, наявність вогнегасника, захист інвертора від перегріву	Попередження займання обладнання та кабельних ліній
Механічна безпека	Страховальні засоби, надійні монтажні конструкції, недопущення перевантажень	Зменшення ризику падінь і травм
Організаційні заходи	Інструктаж, обмеження доступу, регулярні огляди обладнання	Підвищення культури безпеки праці
Санітарно-гігієнічні умови	Вентиляція, освітлення, відсутність вологи	Забезпечення комфортних та безпечних умов роботи

Для акумуляторних батарей LiFePO_4 необхідно дотримуватися умов експлуатації, оскільки порушення температурного режиму або механічне пошкодження може призвести до термічної нестабільності. У приміщенні, де знаходиться АКБ, має бути забезпечена вентиляція та обмежений доступ сторонніх осіб.

Узагальнені вимоги до організації безпечної роботи подані в таблиці 4.2.

4.3. Заходи із електро та пожежної безпеки

Забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки при експлуатації фотоелектричної установки в особистому селянському господарстві є вирішальною умовою надійної та безпечної роботи всієї системи. Наявність постійної та змінної напруги, високих струмів короткого замикання, а також значного тепловиділення елементів інвертора і кабельних ліній створюють підвищений ризик ураження електричним струмом та виникнення пожежі. Запропоновані заходи ґрунтуються на вимогах електротехнічних норм та практичному досвіді експлуатації гібридних фотоелектричних систем у приватному секторі.

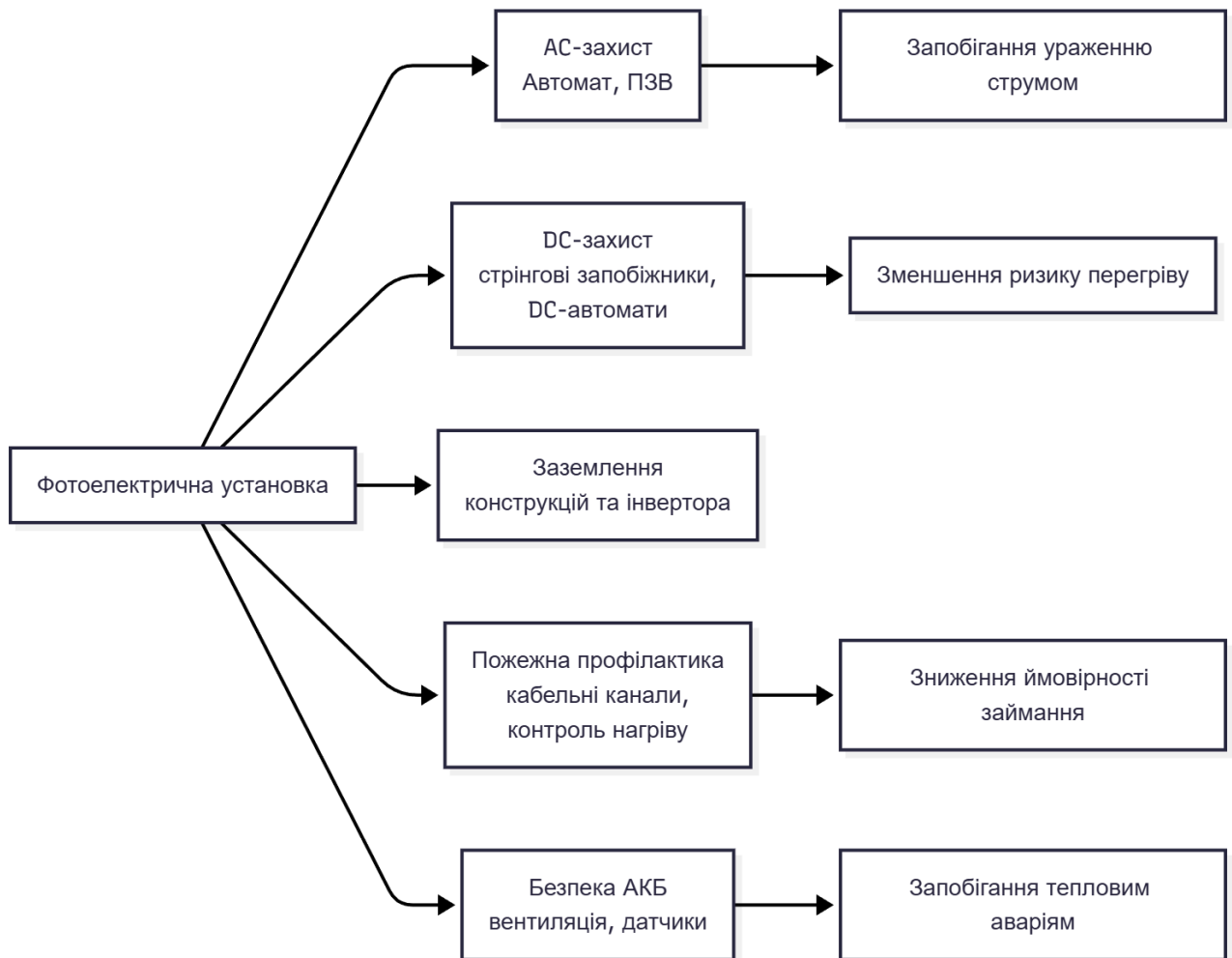


Рисунок 4.3 – Схема основних елементів електробезпеки та пожежного захисту фотоелектричної системи

Основними електробезпечними діями є встановлення автоматичних вимикачів із правильно підібраним номіналом, застосування пристроїв захисного відключення на стороні змінного струму, забезпечення якісного заземлення інвертора та металевих частин конструкції, а також маркування кабельних ліній. Окрему увагу необхідно приділити захисту DC-частини, оскільки постійний струм має більшу небезпеку з точки зору виникнення електричної дуги й перегріву. Для цього застосовуються спеціальні DC-автомати, запобіжники та роз'єднувачі, встановлені між стрінгами та інвертором.

Таблиця 4.3 – Заходи для забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки

Напрямок	Заходи	Призначення
Захист від ураження електричним струмом	Встановлення автоматів АС/DC, ПЗВ 30 мА, заземлення, маркування кабелів	Зниження ризику ураження струмом
Захист DC-частини	Застосування DC-автоматів, стрінгових запобіжників, роз'єднувачів	Запобігання появі електричної дуги і перегріву
Пожежна профілактика	Вогнестійкі кабелі, кабельні канали, контроль нагріву інвертора	Зменшення ймовірності займання
Безпечна експлуатація АКБ	Вентиляція, датчики температури, регламентовані режими заряду	Усунення ризиків термічної нестабільності
Організаційні заходи	Інструктаж, огляди, наявність вогнегасника	Підвищення загальної безпеки системи

Пожежна безпека забезпечується контролем перетину кабелів, правильним вибором матеріалів із негорючою ізоляцією, монтажем кабелів у захисних каналах та своєчасною перевіркою температурних режимів інвертора.

Додатковим фактором пожежного ризику є акумуляторна батарея, яка при пошкодженні або перегріві може спричинити термічну нестабільність. У разі використання LiFePO_4 батареї ймовірність займання є мінімальною, проте приміщення обов'язково повинно бути вентильованим, а зарядно-розрядні режими – регламентованими.

У таблиці 4.3 подано основні заходи, які рекомендовано реалізувати для мінімізації електричних і пожежних ризиків.

4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Надзвичайні ситуації виникають під час експлуатації фотоелектричної установки, охоплюють аварії електротехнічного обладнання, пожежі, пошкодження акумуляторних батарей, руйнування конструкцій унаслідок несприятливих погодних умов, а також зовнішні загрози, пов'язані з аваріями в мережі або стихійними явищами. Розроблення заходів безпеки передбачає визначення типових сценаріїв розвитку подій, оцінювання ступеня небезпеки та встановлення алгоритмів дій для мінімізації наслідків таких ситуацій.

У разі виникнення короткого замикання на DC- або AC-сторонах наслідки можуть призвести до займання кабельних ліній, пошкодження інвертора або акумуляторної батареї. Система захисту повинна забезпечити негайне відключення аварійної ділянки за допомогою автоматичних вимикачів, стрінгових запобіжників і пристроїв захисного відключення. Особливо небезпечними є аварії, пов'язані з пошкодженням LiFePO_4 акумуляторів, оскільки при неправильному режимі їх роботи можливе підвищення температури, вивільнення газів або швидка деградація елементів. Для таких випадків розробляються заходи щодо встановлення температурних датчиків, системи вентиляції та автоматичного відключення батареї при виявленні нестандартних параметрів.

Пожежонебезпечні ситуації виникають також унаслідок перегріву інвертора, пошкодження ізоляції кабельних ліній або неправильних монтажних робіт. Мінімізація ризиків включає використання кабелів з негорючою ізоляцією, монтаж проводки у вогнестійких каналах, наявність вогнегасників у місцях розміщення обладнання та регулярний контроль температури інвертора під час навантаження. Додатково слід передбачити можливість ручного аварійного відключення всієї системи у випадку небезпечних відхилень у роботі.

У разі стихійних явищ, таких як штормовий вітер, град або навантаження на дах унаслідок снігопаду, можливе руйнування монтажних конструкцій сонячних модулів. Для таких випадків заходи спрямовані на посилення несучих елементів, використання корозійностійких матеріалів, перевірку якості кріплень та проведення сезонного технічного огляду. Надзвичайні ситуації, викликані зовнішніми причинами (відключення мережі, перенапруга), локалізуються за рахунок використання пристроїв грозозахисту, стабілізаторів та інверторних алгоритмів, які забезпечують безпечний перехід системи в автономний режим.

РОЗДІЛ 5.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСОБИСТОГО СЕЛЯНСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Техніко-економічне обґрунтування є завершальним етапом аналізу ефективності впровадження фотоелектричної установки для покриття енергетичних потреб домогосподарства. При цьому проводиться визначення економії електроенергії, вартості її заміщення, строку окупності та інтегральної економічної вигоди від запровадження системи. Розглядається фотоелектрична установка потужністю близько 10 кВт із гібридним інвертором та акумуляторною батареєю ємністю 24 кВт·год, яка забезпечує покриття пікових навантажень та підвищення автономності.

Оцінювання економічної ефективності ґрунтується на визначенні річного виробітку електроенергії системою, вартості інвестицій та щорічних фінансових надходжень у вигляді зекономлених коштів на купівлю електроенергії із зовнішньої мережі. Річна генерація обчислюється за формулою:

$$E_{PV} = P_{inst} \cdot H \cdot P_R \quad (5.1)$$

де P_{inst} – встановлена потужність фотоелектричної системи, кВт; H – річна сонячна інсоляція на площину панелей, кВт·год/кВт; P_R – коефіцієнт продуктивності, який враховує температурні, інверторні та кабельні втрати (для сучасних систем приймається у межах 0,74...0,82).

Річна економія коштів визначається як добуток вартості електроенергії та обсягу енергії, який домогосподарство не купує завдяки СЕС:

$$S_{year} = E_{self} \cdot C_{el}, \quad (5.2)$$

де E_{self} – частина енергії, що споживається безпосередньо в домогосподарстві, кВт·год; C_{el} – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Термін окупності розраховується за формулою:

$$T_p = \frac{C_{inv}}{S_{year}}, \quad (5.3)$$

де C_{inv} – загальна вартість інвестицій у проєкт.

Розрахунки виконано для типового сільського домогосподарства, у якому річне споживання електроенергії становить близько 7200 кВт·год. Розрахункова інсоляція для регіону становить $H = 1300$ кВт·год/кВт на рік. Для фотоелектричної системи обрано коефіцієнт продуктивності $P_R = 0.78$.

Вартість комплекту обладнання, згідно з комерційними пропозиціями 2025 року, включає сонячні модулі 10 кВт, гібридний інвертор 5.5 кВт, акумуляторну батарею 24 кВт·год та монтажні матеріали. Загальна інвестиційна вартість становить 255000 грн.

Для домогосподарств з індивідуальним тарифом середня ціна електроенергії становить 4.50 грн/кВт·год.

Розрахункова річна генерація системи визначається як:

$$E_{pv} = 10 \cdot 1300 \cdot 0.78 = 10140 \text{ кВт·год} / \text{рік}.$$

Власне споживання домогосподарства становить 7200 кВт·год/рік. Акумуляторна батарея забезпечує приріст частки власного споживання на 20%, тому приймається $E_{self} = 0.85 \cdot 7200 = 6120 \text{ кВт·год} / \text{рік}$.

Річна економія коштів становить:

$$S_{year} = 6120 \cdot 4.50 = 27540 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Оціночний термін окупності:

$$T_{payback} = \frac{255000}{27540} \approx 9.3 \text{ років}.$$

У таблиці 5.1 наведено узагальнення результатів.

Отримані дані свідчать, що впровадження фотоелектричної установки дозволяє домогосподарству частково або повністю забезпечити власні енергетичні потреби, значно знизити залежність від зовнішньої мережі та підвищити рівень енергетичної безпеки. Незважаючи на строк окупності близько дев'яти років, система забезпечує стабільну економію з року в рік та

фактично працює у безбитковому режимі понад половину свого ресурсу. Враховуючи підвищення тарифів у майбутньому, строк окупності може скоротитися до 7...8 років.

Таблиця 5.1 – Основні результати економічного обґрунтування проєкту

Показник	Значення
Встановлена потужність, кВт	10
Річна генерація, кВт·год	10140
Річне споживання домогосподарства, кВт·год	7200
Частка власного споживання, %	85
Енергія власного споживання, кВт·год	6120
Тариф на електроенергію, грн/кВт·год	4.50
Річна економія, грн	27540
Інвестиції, грн	255000
Строк окупності, років	9.3

У результаті техніко-економічного аналізу встановлено, що запропонована фотоелектрична установка потужністю 10 кВт із річною генерацією 10140 кВт·год здатна забезпечити до 85% власного споживання домогосподарства. Річна економія коштів становить близько 27540 грн, що дозволяє окупити первісні інвестиції у розмірі 255000 грн за приблизно 9,3 року. Отримані результати підтверджують економічну доцільність впровадження системи та її здатність забезпечити довгострокове зменшення витрат на електроенергію.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Специфіка енергоспоживання особистого селянського господарства визначає необхідність комплексного підходу до проєктування фотоелектричної установки. Поєднання побутових та аграрних навантажень формує нерівномірний добовий і річний профіль споживання, що потребує врахування сезонних змін інсоляції та пікових режимів роботи обладнання.

Аналіз реальних енергетичних потреб показує, що раціонально підібрана конфігурація СЕС може забезпечити високий рівень автономності (до 65...75 % у літній період) і значно зменшити залежність господарства від зовнішнього джерела електропостачання. Це підтверджує доцільність застосування гібридної фотоелектричної системи як ефективного засобу енергозабезпечення для умов сільської місцевості.

Аналіз добових і сезонних профілів навантаження свідчить, що енергоспоживання особистих селянських господарств має виражені ранкові та вечірні піки, які не збігаються з максимальною генерацією фотоелектричної установки. Структурні схеми систем підтверджують, що правильно узгоджена взаємодія генерації, споживання та можливого експорту енергії дозволяє значно підвищити автономність домогосподарства.

Підтримка впровадження сонячної генерації відіграє ключову роль у зменшенні фінансового навантаження на домогосподарства та пришвидшує прийняття рішення щодо встановлення ФЕУ. Поєднання цих напрямів дозволяє підвищити економічну доцільність інвестицій у сонячну енергетику та сприяє зростанню енергетичної незалежності домогосподарств.

Автономна система повністю спирається на взаємодію між генерацією та акумуляторним блоком, тоді як у гібридній конфігурації інвертор додатково підключений до електромережі. Досвід України та інших країн демонструє, що раціональний вибір між автономним і гібридним рішенням повинен спиратися на аналіз реальних профілів споживання, стану мережевої інфраструктури та стратегічних цілей домогосподарства щодо рівня енергетичної автономності.

Для виконання нашої роботи було обрано домогосподарство, розташоване у селі Жулин Стрийського району Львівської області. Ця територія характеризується типовою для передгірської зони структурою приватної забудови, наявністю господарських будівель, присадибних ділянок і сезонних зон вирощування сільськогосподарської продукції.

Встановлено, що сумарне добове споживання всіх електроприладів становить 11159 Вт·год, тобто приблизно 11,2 кВт·год/добу. Якщо прийняти, що такий режим є типовим протягом року, річне споживання електроенергії домогосподарством становитиме близько 4073 кВт·год, або орієнтовно 4,1 МВт·год/рік. Середня потужність споживання, розрахована як відношення добового споживання до тривалості доби, дорівнює приблизно 0,46 кВт, що відповідає середньому навантаженню у 460 Вт протягом 24 годин.

Аналіз графіків добового навантаження (рис. 2.2) показує, що господарство демонструє чітко виражену добову циклічність споживання електроенергії. У літній період мінімальне навантаження становить близько 0,20...0,25 кВт у нічні години, тоді як максимальні значення припадають на вечірній час і досягають 0,55...0,60 кВт. Середня денна потужність улітку становить приблизно 0,39 кВт, що відповідає добовому споживанню близько 9,4 кВт·год. Найвищі значення навантаження припадають на зимові місяці. У січні електроспоживання становить 480 кВт·год, а в грудні – 490 кВт·год, що є максимальним значенням за рік.

Узагальнений підхід до збору цих даних наведено на рисунку 2.3. Одним із основних компонентів є дані про інсоляцію – глобальне горизонтальне випромінювання (GHI), пряме нормальне випромінювання (DNI) та дифузне випромінювання (DHI). Ці три показники дають змогу оцінити кількість енергії, яку потенційно може отримати ФЕУ протягом року. Узагальнені показники інсоляції для координат господарства наведено в табл. 2.2.

Проектування конфігурації фотоелектричної системи починається розрахунків добових графіків споживання, які дозволяють визначити пікові навантаження та оцінити необхідний рівень встановленої потужності.

Узагальнений підхід подано на рисунку 2.4. Результати показують, що зростання потужності модулів дає змогу зменшити необхідну ємність батареї, однак при цьому збільшується капітальна вартість системи.

На основі отриманих результатів встановлено, що для умов особистого селянського господарства в с. Жулин доцільно використовувати гібридну структуру з модульною потужністю 10...12 кВт та акумулятором 20...25 кВт·год, що забезпечує стабільне енергозабезпечення навіть за низької зимової інсоляції.

Нами виконано розрахунок прогнозованої річної генерації та визначення показників власного споживання, енергетичної автономності й ефективності роботи системи. За умови, що річне споживання домогосподарства за результатами аналізу становить близько 5000 кВт·год/рік, фотоелектрична установка потенційно здатна виробляти удвічі більше енергії, ніж потрібно господарству.

За результатами аналізу споживання та інсоляції для особистого селянського господарства прийнято орієнтовну встановлену потужність фотоелектричної частини на рівні $P_{inst} \approx 10 \text{ кВт}$, що дозволяє покривати добове зимове споживання 15...16 кВт·год за рахунок власної генерації з урахуванням коефіцієнта продуктивності системи. Узагальнена структурна схема гібридної фотоелектричної установки, адаптована до умов особистого селянського господарства, наведена на рисунку 3.1.

Розрахована конфігурація фотоелектричної системи забезпечує оптимальне поєднання встановленої потужності близько 10 кВт та можливості повної добової автономності завдяки використанню LiFePO₄-акумулятора ємністю 24 кВт·год. Найбільшою статтею витрат є батарейний блок, що формується високою енергоємністю та тривалим ресурсом понад 6000 циклів. Гібридний інвертор потужністю 5,5 кВт забезпечує ефективне керування потоками енергії та стабільну роботу всієї системи. Загальна вартість близько 362,8 тис. грн підтверджує, що запропонована конфігурація є технічно

обґрунтованою та економічно доцільною для умов особистого селянського господарства.

Запропонована структурна схема демонструє логічну послідовність перетворення енергії – від сонячного випромінювання до споживача – та інтеграцію резервного живлення. Нами вибрано послідовно-паралельна конфігурація 9S2P передбачає формування двох стрінгів, у кожному з яких дев'ять фотоелектричних модулів з'єднані послідовно. Таке з'єднання забезпечує підвищення робочої напруги масиву до рівнів, необхідних для оптимальної роботи MPPT-контролера та гібридного інвертора.

На рисунку 3.4 зображена практична електрична схема гібридної ФЕУ, що найбільш наближена до проєктної моделі, а її компоненти відповідають обраним у попередньому пункті інвертору, акумуляторній батареї та фотоелектричному масиву.

Встановлено, що забезпечення стабільної роботи фотоелектричної системи можливе за умови вибору оптимальних режимів заряду та розряду акумуляторної батареї, дотримання вимог до температурного режиму модулів та забезпечення захисної апаратури відповідними номіналами. Гібридний інвертор, що працює в багаторежимному середовищі, потребує контролю параметрів вхідної напруги та потужності, проте за умови правильного монтажу та експлуатації його надійність повністю відповідає вимогам до систем приватного домогосподарства.

Проведений аналіз показав, що експлуатація фотоелектричної установки в умовах особистого селянського господарства пов'язана з низкою небезпечних і шкідливих факторів, серед яких домінують електричні ризики, пожежна небезпека та вплив зовнішніх чинників у разі надзвичайних ситуацій. Запропоновані заходи створюють безпечні умови праці.

Встановлено, що запропонована фотоелектрична установка потужністю 10 кВт із річною генерацією 10140 кВт·год здатна забезпечити до 85% власного споживання домогосподарства. Річна економія коштів становить близько 27540 грн, що дозволяє окупити первісні інвестиції у розмірі 255000 грн за приблизно

9,3 року. Отримані результати підтверджують економічну доцільність впровадження системи та її здатність забезпечити довгострокове зменшення витрат на електроенергію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автономний однофазний інвертор Growatt SPF 5000 ES (5кВт/48В). URL: https://intersolar.ua/inventoryi/gibridnyie-inventoryi/avtonomnij-odnofaznij-%D1%96nvertor-growatt-spf-5000-es-5kvt-48v.html?srsltid=AfmBOoquLQoAWHGx2pMEBKOVrbkGS20Ii4A00fSpvqm357HuM4Z9xI93&utm_source=chatgpt.com
2. Акумуляторна батарея LiFePO4 51,2V 500Ah, 25kWh FelicityESS FLA48500. URL: https://stream-energy.com.ua/ua/p2340317087-akkumulyatornaya-batareya-lifepo4.html?srsltid=AfmBOooAz8U385ayxy2_y0rfoe340Cfn58JMqQSUe9WocUibm3BefrBd&utm_source=chatgpt.com
3. Бодунов В. М. Забезпечення допустимих рівнів напруги в низьковольтних мережах при проектуванні сонячних електричних станцій приватних домогосподарств / В. М. Бодунов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2021. – № 1 (2). – С. 23–27.
4. Боярчук В. М., Фтома О. В., Боярчук О. В. Економічна та енергетична ефективність виробництва ріпаку озимого, пшениці озимої, кукурудзи, цукрового буряку та біопалива на їх основі. Аграрна економіка. 2012. Т. 5, № 1-2. С. 102-110.
5. Боярчук В. М., Фтома О. В., Боярчук О. В. Ефективність інвестицій у виробництво ріпаку та біопалива на його основі. Проблеми і перспективи розвитку підприємництва. 2014. № 2(1). С. 77-83.
6. Гальчак В. П., Боярчук В. М., Сиротюк С. В., Коробка С. В., Станицький Т. О. Сонячна енергія та інсоляція: монографія. Львів: Магнолія 2006, 2024. 242 с
7. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця : навчальний посібник. – Львів : Вид-во ЛНАУ, 2008. – 135 с.

8. Заяць Т. М., Юркін І. М., Іваницький В. П. Монтаж та обслуговування сонячних електростанцій з системами накопичення енергії : методичні вказівки. – Ужгород : ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2025. – 28 с.
9. Кабель SOLAR PV1-F 1x10 black Одескабель. URL: https://emyr.com.ua/kabel-solar-pv1-f-1kh10-black-odeskabel/?srsltid=AfmBOop6VTjYS_4XHwhfZqHWHkSGZQPl4wLwfjax9feo91FTg4P6Nb-5&utm_source=chatgpt.com
10. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
11. Лехман Ф.Д., Рубльов В.І. Запобігання аварійності і травматизму в сільському господарстві. К.: Урожай, 1993. 272с.
12. Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 18.09.2025 р.).
13. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://ur0.jp/7wLyJ>
14. Посібник з сонячних фотоелектричних технологій. – Київ : Фонд розвитку підприємництва, 2023. – 17 с.
15. Сонячна панель Aiko AIKO-A440-MAH54Mb 440 Вт. URL: https://ek.ua/ua/AIKO-AIKO-A440-MAH54MB.htm?utm_source=chatgpt.com
16. Tryhuba A., Boyarchuk V., Boiarchuk O., Pavlikha N., Kovalchuk N., Study of the impact of the volume of investments in agrarian projects on the risk of their value (ITPM-2021) In: CEUR Workshop Proceedings vol. 2851.
17. Тригуба А. М., Тригуба І. Л., Боярчук О. В. Модель формування виробничо-технологічного ризику у інтегрованих програмах агропромислового виробництва. Управління проектами у розвитку суспільства: Управління проектами та програмами в умовах глобалізації світової економіки: тези доп. XV Міжнар. конф. Київ: КНУБА, 2018. С. 212-214.

18. Трипольська Г. С., Письменна У. Є., Кубатко О. В. Схеми державної підтримки розвитку автономних генеруючих потужностей відновлюваної енергії у приватних домогосподарствах України / Г. С. Трипольська, У. Є. Письменна, О. В. Кубатко // Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія : економіка, управління, безпека, технології. – 2024. – Т. 3, № 2. – DOI 10.56197/2786-5827/2024-3-2-7.
19. Cherevko H. Solar energetics in Ukraine and the experience of Visegrad Group countries. *Science Horizon*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 68–75.
20. European Commission. Energy consumption in rural households: analytical report. Brussels: EC, 2023. 42 p. URL: <https://energy.ec.europa.eu>
21. European Commission. The European Green Deal. Brussels: EC, 2020. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
22. European Patent Office. Advances in photovoltaics : Technology insight report. Munich : EPO, 2025. 88 p.
23. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report 2024. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2024.
24. Honcharov O. Evaluating the impact of solar generation investments in Ukraine. Kyiv School of Economics, 2024. 46 p. URL: <https://kse.ua> (дата звернення: 17.11.2025).
25. Huang J., Yu Z., Yang D. A Review on Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Current Status and Future Challenges. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 16, p. 4327. DOI: 10.3390/en18164327.
26. IEA PVPS. Photovoltaic Applications in Weak Grids. International Energy Agency, 2023. 56 p.
27. IEA PVPS. PVPS Annual Report 2024: Country Updates. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2024.
28. IEA. Empowering the Solar Prosumer. International Energy Agency, Paris, 2022.

29. International Energy Agency. Solar Energy: Tracking Report 2023. Paris: IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/solar-energy> (дата звернення: 17.11.2025).
30. International Energy Agency. Solar PV. Energy system – Renewables. Paris : IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> (дата звернення: 01.11.2025).
31. IRENA. Innovation Landscape for Smart Electrification. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. 132 p.
32. Iwaszczuk A., Khovrak I. Prospects for the Development of Photovoltaics in Ukraine. European Research Studies Journal, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 291–308.
33. Jäger-Waldau A. Snapshot of photovoltaics – February 2024. Renewable Energy Focus, 2024.
34. Kabir, E., Kumar, P., Kim, K.-H., Yip, A. W., Szulejko, J. E. Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, Vol. 173, 113055. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113055.
35. Low Carbon Ukraine. Assessing the economics of prosumer provisions for residential rooftop PV. Berlin : Low Carbon Ukraine, 2023. 40 p.
36. Mousa, G., Mgamal, M., Al-Mahdawi, A., Al-Saffar, M. Performance evaluation and optimization of photovoltaic systems using high-resolution meteorological data. Energy Conversion and Management, 2022, Vol. 268, 115928. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115928.
37. National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell Efficiency Chart. NREL, 2025. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення: 08.11.2025).
38. Trina Solar sets world record for solar technology. Reuters, 06.01.2025. URL: <https://www.reuters.com> (дата звернення: 15.10.2025).
39. Tryhuba A., Ratushnyi R., Tryhuba I. The model of projects creation of the fire extinguishing systems in community territories. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2020, №68(2), C.419-431.