

**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 обладнання для
виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для
фермерського господарства»**

Виконав: студент групи Ен-62

Спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Іваночко Руслан Миколайович

(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 ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО 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

Іваночку Руслану Миколайовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського 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 забійним комплексом; добові обсяги органічних відходів для визначення потенціалу біогазової установки; методика розрахунку річної генерації СЕС та визначення параметрів гібридної енергетичної системи.

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

Вступ.

1. Аналіз стану виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського господарства та завдання кваліфікаційної роботи.

2. Аналіз об'єкту дослідження та оцінювання енергетичного балансу.

3. Результати обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для забійного комплексу фермерського господарства.

4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

5. Економічна ефективність.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів): аналіз стану виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського господарства та завдання кваліфікаційної роботи; аналіз об'єкту дослідження та оцінювання енергетичного балансу; результати обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для забійного комплексу фермерського господарства; економічна ефективність.

6. Консультанти з розділів:

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

7. Дата видачі завдання

28 лютого 2025 р.

Календарний план

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

Студент _____ Іваночко Р. М.
(підпис)

Керівник роботи _____ Боярчук В.М.
(підпис)

УДК 620.92:631.164

Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського господарства.

Іваночко Р. М. Кафедра енергетики – Дубляни, ЛНУВМ, 2025.

Кваліфікаційна робота: 77 с. текст. част., 18 рис., 8 табл., 14 арк. ілюстраційного матеріалу, 43 джерела.

У кваліфікаційній роботі здійснено комплексне обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел у фермерському господарстві, що працює з енергоємним забійним комплексом. Проведено аналіз сучасного стану розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі та визначено технологічні рішення, придатні для автономного та гібридного енергозабезпечення. Детально досліджено об'єкт, оцінено структуру споживання електроенергії та сформовано енергетичний баланс. На основі моделювання визначено параметри сонячної та біоенергетичної підсистем, а також побудовано сезонні режими роботи гібридної енергетичної системи. Проведено аналіз охорони праці, пожежної безпеки і дій у надзвичайних ситуаціях. Оцінено економічну ефективність запропонованого рішення, встановлено очікуваний термін окупності та річну економію електроенергії. Робота підтверджує доцільність впровадження гібридної системи як інструменту підвищення енергетичної стійкості фермерських господарств.

Ключові слова: відновлювана енергетика; фермерське господарство; сонячна електростанція; біогазова установка; гібридна енергосистема; енергетичний баланс; моделювання; економічна ефективність; енергетична стійкість.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З	
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ТА	
ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	
1.1. Технології відновлюваної енергетики для фермерських господарств	10
1.2. Сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики в	
аграрному секторі.....	14
1.3. Технологічні рішення для виробництва електроенергії на основі сонячної,	
вітрової та біоенергетики	16
1.4. Завдання кваліфікаційної роботи	22
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ	
ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ	
2.1. Аналіз об'єкту дослідження	24
2.2. Характеристика споживачів та загальне навантаження	
забійного комплексу	29
2.3. Вибір складових гібридної системи виробництва електроенергії	32
2.3.1. Вибір складових сонячної електростанції	32
2.3.2. Вибір складових біогазової установки.....	34
2.4. Оцінювання енергетичного балансу	35
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ	
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З	
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ЗАБІЙНОГО КОМПЛЕКСУ	
ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	
3.1. Вибір схеми гібридної системи виробництва електроенергії з	
відновлюваних джерел для забійного комплексу фермерського господарства	39
3.2. Результати моделювання річного обсягу виробництва електроенергії	
сонячною підсистемою	42

3.3. Методика та результати визначення параметрів обладнання сонячної та біоенергетичної підсистем	46
3.4. Режими роботи енергетичної системи в різні періоди року	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1. Шкідливі виробничі чинники та їхні джерела	57
4.2. Створення безпечних умов праці під час електропостачання забійного комплексу	59
4.3. Заходи пожежної безпеки	62
4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	64
РОЗДІЛ 5.	66
ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЗАБІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	66
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ВСТУП

Енергетична трансформація, яка відбувається в Україні та світі, поступово змінює роль сільського господарства в енергетичному балансі. Якщо раніше фермерські господарства розглядалися лише як споживачі електроенергії, то сьогодні вони дедалі частіше виступають одночасно і виробниками, і споживачами енергії з відновлюваних джерел. Це зумовлено зростанням цін на енергоносії, посиленням вимог до декарбонізації економіки, а також зростаючими ризиками перерв енергопостачання, що стали особливо відчутними в умовах війни та руйнування енергетичної інфраструктури [1; 24]. У таких умовах питання раціонального енергозабезпечення фермерських господарств перестає бути суто технічним і перетворюється на елемент їхньої економічної стійкості та довгострокової конкурентоспроможності.

Сучасні дослідження демонструють, що використання відновлюваних джерел енергії на сільськогосподарських підприємствах може забезпечити не лише часткову або повну енергетичну автономію, а й створити додаткові джерела доходів за рахунок продажу надлишкової електроенергії в мережу або зменшення витрат на традиційні енергоресурси [21; 38]. Зокрема, на основі статистичних даних щодо сімейних ферм у країнах ЄС показано, що виробництво енергії з відновлюваних джерел дозволяє суттєво знизити частку енергетичних витрат у структурі собівартості продукції, навіть якщо енергетичні установки покривають лише частину потреб господарства [4]. У вітчизняних та зарубіжних роботах також наголошується, що для аграрного сектору найбільш перспективними є сонячна енергетика, біогазові комплекси, малі вітроенергетичні установки та комбіновані (гібридні) системи [1; 21; 19].

Разом із тим, попри значну кількість публікацій, більшість досліджень зосереджується або на макрорівні (державна політика, загальні сценарії розвитку відновлюваної енергетики), або на оцінюванні економічної доцільності окремих технологій без прив'язки до конкретних умов фермерського господарства [24; 32; 29]. У практиці проектування енергетичних

систем для аграрного виробництва часто використовуються типові рішення з фіксованою потужністю сонячних електростанцій чи біогазових установок, які не враховують реальний графік електроспоживання, сезонні коливання навантаження, структуру виробництва та наявний ресурсний потенціал (сонячна радіація, органічні відходи, вітрові ресурси) конкретного господарства. У результаті обладнання може працювати поза оптимальними режимами, мати завищену або занижену встановлену потужність, що призводить до подорожчання проєкту та зниження його окупності.

Окрему увагу в сучасній науковій літературі приділено агрофотовольтаїці, яка дає змогу поєднати вирощування сільськогосподарських культур і виробництво електроенергії на одній і тій самій земельній ділянці [21; 19]. Дослідження показують, що за правильного підбору висоти, кута нахилу та конфігурації фотомодулів можна не лише зберегти, а й підвищити ефективність використання земельних ресурсів, поєднавши товарне виробництво з «енергетичним врожаєм». Водночас технічні параметри таких систем мають бути узгоджені як з агротехнологіями вирощування культур (ширина колій, габарити техніки, допустимий рівень затінення), так і з енергетичними потребами фермерського господарства. У цьому контексті завдання обґрунтування параметрів обладнання виходить за межі простого розрахунку встановленої потужності й охоплює комплекс технічних, економічних та просторових рішень.

Після початку повномасштабної агресії проти України питання децентралізації енергопостачання та підвищення енергетичної безпеки набули особливої актуальності для сільських територій. Пошкодження магістральних та розподільчих мереж, зростання ризику тривалих відключень, обмеження приєднання нових потужностей до мережі змушують фермерів шукати рішення, які забезпечать роботу критично важливих споживачів (сховища продукції, системи зрошення, доїльні зали, вентиляційні установки тощо) навіть за умов нестабільного зовнішнього енергопостачання [24; 29]. За таких умов особливої ваги набувають методики, які дозволяють для конкретного фермерського

господарства обґрунтувати оптимальні параметри обладнання відновлюваних джерел енергії та допоміжних елементів (інвертори, системи накопичення, обладнання приєднання до мережі), спираючись на реальні дані споживання й доступний ресурсний потенціал.

Таким чином, актуальність теми «Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського господарства» зумовлена одночасною дією кількох чинників: потребою у зниженні енергетичних витрат, підвищенні автономності господарств, виконанні вимог кліматичної та енергетичної політики, а також необхідністю адаптації аграрного сектору до умов воєнного та післявоєнного відновлення. На цьому тлі науково обґрунтований вибір та параметризація обладнання відновлюваних джерел енергії стає важливим інструментом підвищення стійкості фермерських господарств, забезпечення прогнозованих термінів окупності інвестицій і зниження ризиків невдалих енергетичних проєктів.

Мета роботи – теоретично й практично обґрунтувати параметри обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для конкретного фермерського господарства з урахуванням його енергетичних потреб, ресурсного потенціалу та економічних обмежень.

Об’єкт дослідження – процес енергозабезпечення фермерського господарства на основі використання відновлюваних джерел енергії.

Предмет дослідження – параметри та режими роботи обладнання системи виробництва електроенергії з відновлюваних джерел у фермерському господарстві, а також підходи до їхнього техніко-економічного обґрунтування.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ЗАВДАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1.1. Технології відновлюваної енергетики для фермерських господарств

Упродовж останнього десятиліття відновлювана енергетика з периферійного напрямку енергетичної політики перетворилася на один із ключових драйверів трансформації енергосистеми. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), сумарна встановлена потужність відновлюваних джерел електроенергії у світі зросла з приблизно 1690 ГВт у 2013 р. до понад 3370 ГВт у 2022 р., причому головний внесок забезпечили сонячна та вітрова енергетика [1; 35]. У 2023 р. відновлювальні джерела забезпечили рекордний обсяг нових приєднаних потужностей, а частка проектів, собівартість електроенергії яких є нижчою за викопне паливо, перевищила дев'ять десятих [36; 15]. Це створює передумови для того, щоб аграрний сектор не лише споживав енергію, а й ставав активним її виробником, інтегрованим у локальні та регіональні енергетичні ринки.

Окремим об'єктом дослідження останніх років є структура споживання енергії в сільському господарстві, лісовому господарстві та рибальстві. Згідно з аналітикою REN21, частка відновлюваної енергії в цих галузях зросла з 10,8 % у 2011 р. до 15,4 % у 2021 р., причому понад половину цієї частки становить відновлювана електроенергія, близько третини – сучасна біоенергетика, а решта припадає на сонячне теплопостачання й геотермальну енергію [33]. Для оцінювання ролі відновлюваних джерел використовують показник їхньої частки в загальному кінцевому споживанні енергії в аграрному секторі, який можна подати у вигляді співвідношення:

$$p_{ВДЕ} = \frac{E_{ВДЕ}}{E_{заг}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $E_{ВДЕ}$ – обсяг споживання енергії з відновлюваних джерел у сільському господарстві; $E_{заг}$ – загальне кінцеве споживання енергії у відповідних видах діяльності.

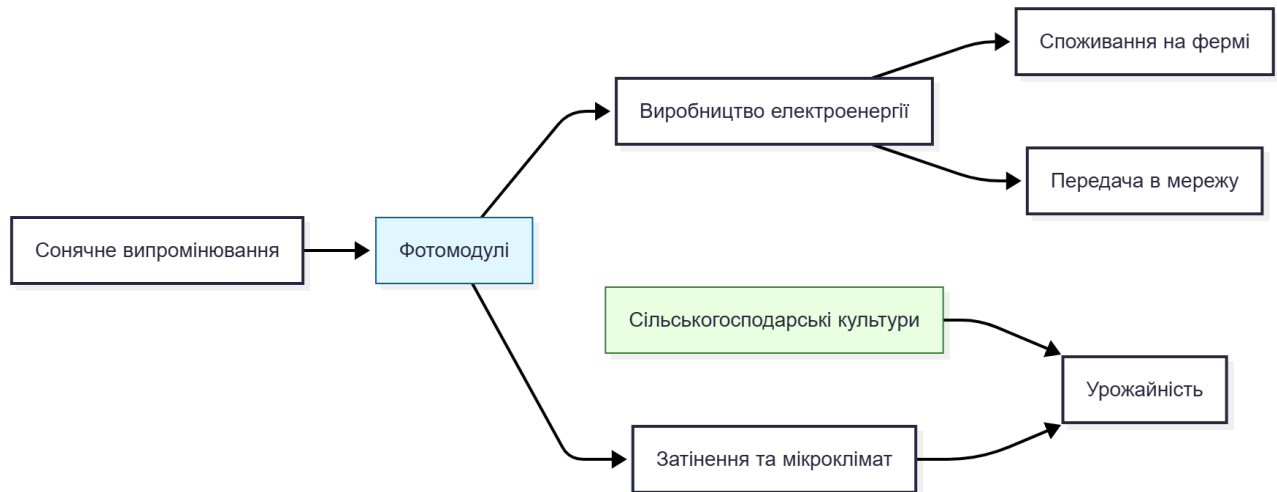


Рисунок 1.1 – Схема взаємодії між фотоелектричними модулями та сільськогосподарськими культурами в агрофотовольтаїчній системі

За останнє десятиліття значення показника $p_{ВДЕ}$ демонструє стійку тенденцію до зростання, хоча й нерівномірну між країнами та регіонами [27].

На рівні окремих фермерських господарств відновлювана енергетика розвивається у двох основних напрямках: як джерело електроенергії для власних виробничих і побутових потреб та як інвестиційний актив, що генерує дохід від продажу надлишкової електроенергії в мережу. Систематичний огляд публікацій, присвячених енергетичним системам на фермах, показує зростання кількості робіт, у яких ферма розглядається як одночасно споживач і виробник енергії (prosumer), а проєкти з використанням сонячних, вітрових і біогазових установок розглядаються у контексті підвищення економічної стійкості та зниження енергетичних ризиків [30; 37].

Однією з основних технологій для аграрного сектору залишається сонячна фотоенергетика. Її привабливість пояснюється масштабованістю

рішень – від кількох кіловат на покрівлі фермерських будівель до сотень кіловат і мегават на наземних станціях – та зниженням питомої вартості фотомодулів і електроенергії, що ними виробляється [1; 36]. Окремо виділяють напрям агрофотовольтаїки (agrivoltaics), коли фотоелектричні установки інтегруються безпосередньо в сільськогосподарські угіддя. Дослідження показують, що системи агрофотовольтаїки, за умови правильного вибору висоти монтажу, геометрії та прозорості конструкцій, дають змогу одночасно забезпечувати до 30% додаткового енергетичного «врожаю» та, у низці випадків, оптимізувати мікроклімат для окремих культур [20; 39; 43].

Узагальнені характеристики поширених технологій виробництва електроенергії на фермерських господарствах наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Поширені технології відновлюваної енергетики для фермерських господарств

Технологія	Типовий діапазон потужності для ферми	Основні переваги	Типові обмеження та особливості застосування
Сонячні фотоелектричні установки	10–500 кВт	Модульність, низькі витрати на обслуговування, простота інтеграції з мережею	Залежність від сонячної радіації, потреба у вільних площах або дахах
Малі вітроенергетичні установки	5–100 кВт	Можливість генерації вночі, доповнення сонячної генерації	Високі вимоги до вітрових ресурсів, візуальний та шумовий вплив
Біогазові установки на відходах	50–500 кВт	Переробка гною й відходів, регульоване виробництво енергії	Високі капіталовкладення, потреба в стабільній сировинній базі
Гібридні системи (сонце + вітер + біогаз + накопичувачі)	50–1000 кВт	Підвищена надійність та автономність, гнучке керування навантаженнями	Складніше проектування й управління, інтеграція різних типів обладнання

Джерело: узагальнено за [30; 37; 41; 5].

Іншим важливим напрямом є біогазові технології, що базуються на переробці органічних відходів рослинництва, тваринництва та харчової промисловості. Для України цей сегмент особливо перспективний з огляду на значну сировинну базу та потребу у вирішенні проблеми органічних відходів. Разом з тим, за даними досліджень, участь малих і середніх фермерських господарств у біогазових проєктах досі залишається обмеженою; переважають установки, що належать великим аграрним підприємствам та переробним комплексам [41; 5]. Основні бар'єри – значні капіталовкладення, складність доступу до фінансування та нестача типових інженерних рішень для невеликих ферм.

Сонячні фотоелектричні установки характеризуються невеликою питомою потребою в обслуговуванні, високою модульністю та доброю придатністю для поєднання з іншими джерелами. Малі вітроустановки ефективні переважно в регіонах зі стабільними вітровими ресурсами та можуть доповнювати сонячні системи в нічний час і в зимовий період. Біогазові установки, попри вищу складність проєктування та експлуатації, мають перевагу у вигляді можливості регульованого виробництва енергії, а також внеску в розв'язання проблеми утилізації гною та інших органічних відходів. Інтегровані (гібридні) системи – поєднання сонячних, вітрових і біогазових джерел із накопичувачами енергії – розглядаються як перспективний напрям забезпечення автономності ферм, особливо за умов нестабільного мережевого енергопостачання [30; 37; 9].

Для оцінювання динаміки впровадження відновлюваної енергетики в аграрному секторі, окрім частки відновлюваної енергії, часто аналізують енергетичну місткість виробництва, тобто обсяг споживання енергії на одиницю виробленої сільськогосподарської продукції або на одиницю площі. Один із поширених показників – енергоємність на одиницю площі:

$$I_e = \frac{E_{\text{заг}}}{A}, \quad (1.2)$$

де I_e – енергоємність, МДж/га; $E_{заг}$ – загальне споживання енергії в аграрному виробництві, МДж; A – площа сільськогосподарських угідь, га.

Зменшення показника I_e за рахунок впровадження енергоефективних технологій та власного виробництва відновлюваної енергії розглядається як один із індикаторів переходу до більш сталих моделей господарювання [6; 21].

1.2. Сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі

Візуальне унаочнення глобальних тенденцій до зростання частки відновлюваної енергетики в аграрному секторі доцільно виконати у вигляді двох ілюстрацій. На рисунку 1.2 наведена частка приросту потужностей відновлюваних джерел енергії за технологіями у 2023 році на регіональному рівні за даними IRENA [35].

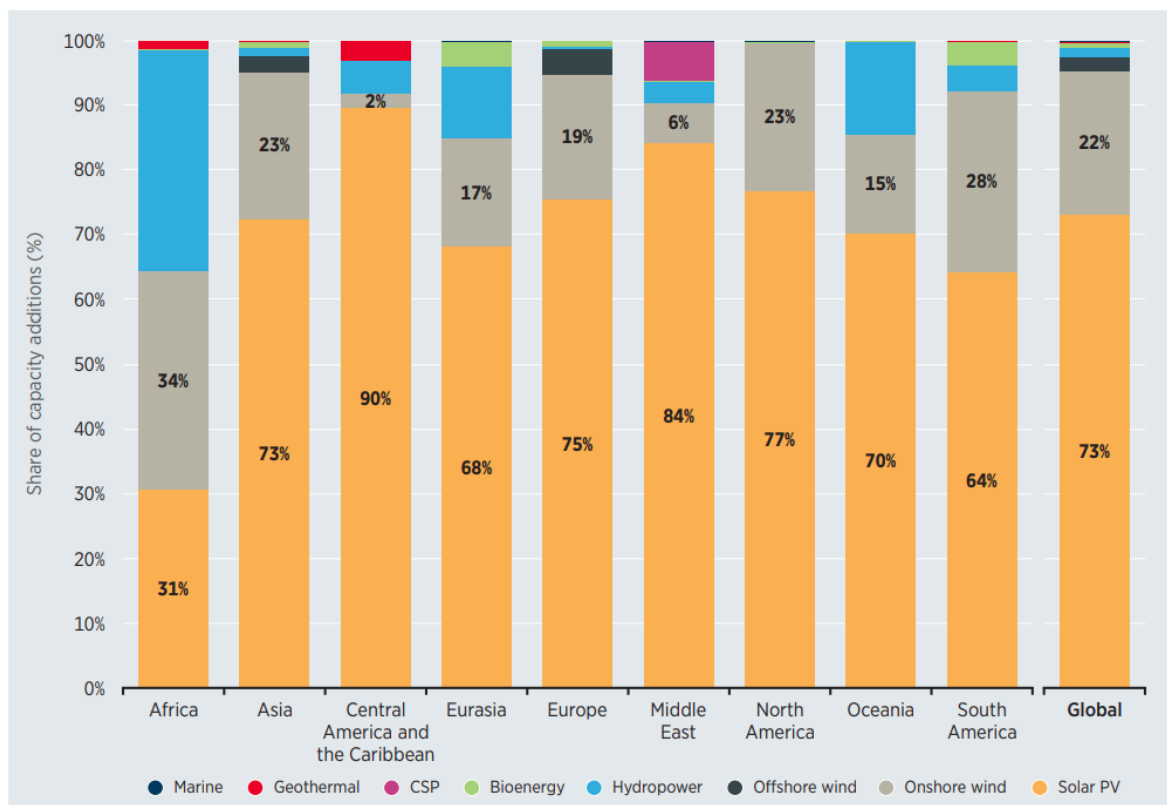


Рисунок 1.2 – Частка приросту потужностей відновлюваних джерел енергії за технологіями у 2023 році на регіональному рівні [35]

На рисунку 1.3 подано тенденції глобального щорічного збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії, 2010-2023 рр [35], що наочно демонструє поступове, але стає зростання ролі відновлюваних джерел у цих видах діяльності.

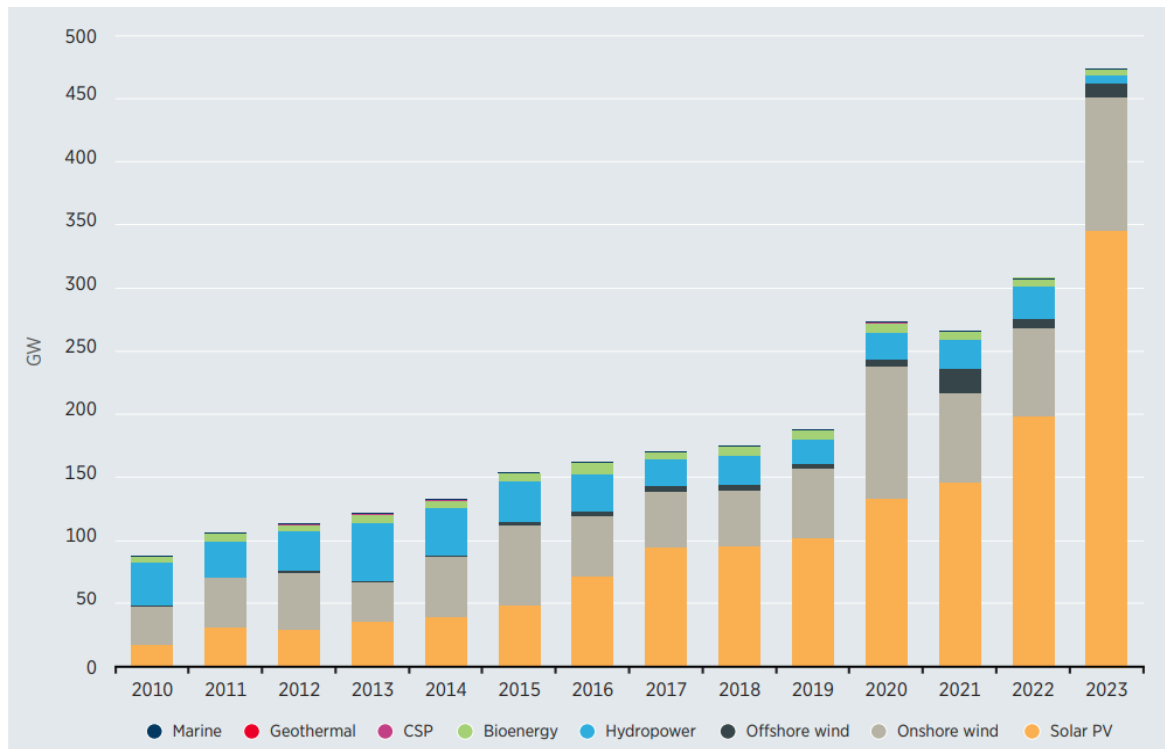


Рисунок 1.3 – Глобальне щорічне збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії, 2010-2023 рр. [35]

Вагомою тенденцією останніх років є зміщення акцентів з одиничних демонстраційних проєктів до системного інтегрування відновлюваних джерел енергії в бізнес-моделі фермерських господарств. Йдеться не лише про підбір встановленої потужності фотоелектричних або біогазових установок, а й про проєктування систем управління навантаженнями, накопичувачами енергії, а також цифрових платформ моніторингу виробництва й споживання. У дослідженнях, присвячених економічній ефективності впровадження сонячних панелей у зрошувальному землеробстві, показано, що поєднання оптимізованих графіків роботи насосних станцій із власним виробництвом електроенергії дає

змогу істотно знизити експлуатаційні витрати та скоротити строк окупності проєктів [9].

Таким чином, сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі характеризуються збільшенням частки відновлюваних джерел у структурі енергоспоживання, появою нових технологічних рішень, зокрема агрофотовольтаїки та гібридних енергетичних систем на фермах, а також поступовим переходом до інтегрованого підходу, коли енергетика розглядається як невід’ємний елемент виробничої й економічної стратегії фермерського господарства. Для ефективного використання цих можливостей необхідні методики, які дозволяють з урахуванням реального енергобалансу господарства, ресурсного потенціалу та економічних обмежень обґрунтовувати параметри енергетичного обладнання, що й стає предметом наступних підрозділів роботи.

1.3. Технологічні рішення для виробництва електроенергії на основі сонячної, вітрової та біоенергетики

Технологічна база відновлюваної енергетики для фермерських господарств сьогодні охоплює три групи рішень, які найчастіше зустрічаються в практиці: сонячні фотоелектричні системи, малі вітроенергетичні установки та біогазові комплекси. Кожна з цих технологій має власну фізичну природу перетворення енергії, особливості апаратної реалізації й вимоги до умов експлуатації, тому завдання обґрунтування параметрів обладнання потребує порівняльного аналізу та формалізованих критеріїв вибору.

Базовим елементом сонячної енергетики є фотоелектричний модуль, у якому випромінювання з потужністю сонячної радіації G , що падає на площу A , перетворюється на електричну потужність P_{PV} з урахуванням ККД модуля η_{PV} :

$$P_{PV} = \eta_{PV} \cdot G \cdot A, \quad (1.3)$$

Добовий або річний виробіток електроенергії визначається інтегруванням цієї потужності в часі, що в практичних розрахунках реалізується через сумування за погодинними або денними інтервалами на основі даних метеостанцій чи супутникових сервісів. Сучасні дослідження демонструють, що малі та середні фотоелектричні станції потужністю 20...200 кВт можуть забезпечувати суттєву частку електроспоживання фермерських господарств, особливо за умов коректного підбору кута нахилу, орієнтації та топології системи з урахуванням добового профілю навантаження [42; 14].

На рисунку 1.3 наведено узагальнену структурну схему автономної сонячної електростанції для сільськогосподарського споживача, де показано потоки енергії від сонячних модулів до навантажень та накопичувача.

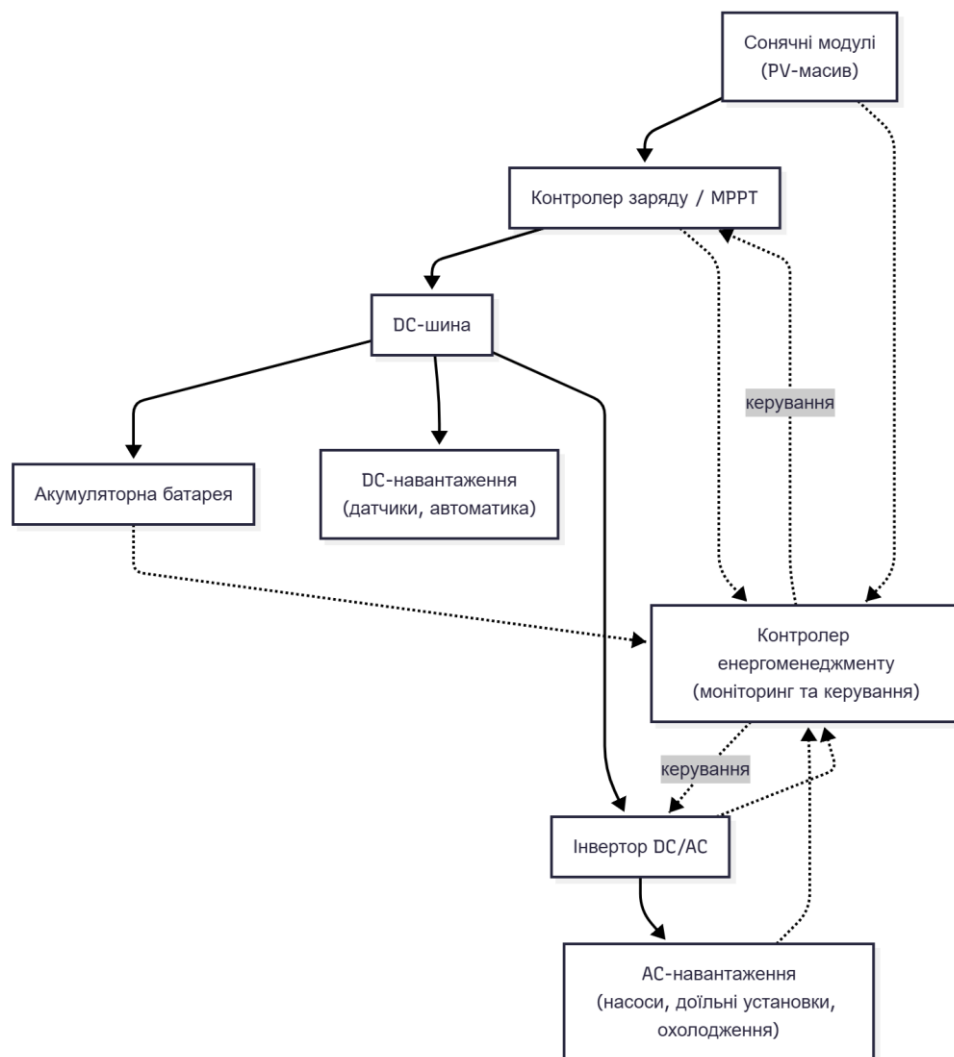


Рисунок 1.3 – Структурна схема автономної сонячної електростанції для сільськогосподарського споживача

Перспективним різновидом фотоелектричних систем стали агрофотовольтаїчні установки, у яких сонячні модулі розміщують над сільськогосподарськими культурами на спеціальних опорах. При проектуванні таких систем окрім формули (1.3) враховують вплив коефіцієнта затінення на врожайність та мікроклімат поля, а також геометричні параметри конструкцій. У низці робіт запропоновано оптимізаційні методики, що дозволяють варіювати висоту установки модулів, крок між рядами та їхню прозорість для досягнення компромісу між енергетичним виробітком і продуктивністю рослинництва [26; 25].

На рисунку 1.4 подано приклад тривимірної схеми агровольтаїчної системи з розташуванням фотоелектричних панелей над посівами, яка подано у науковій публікації [26].

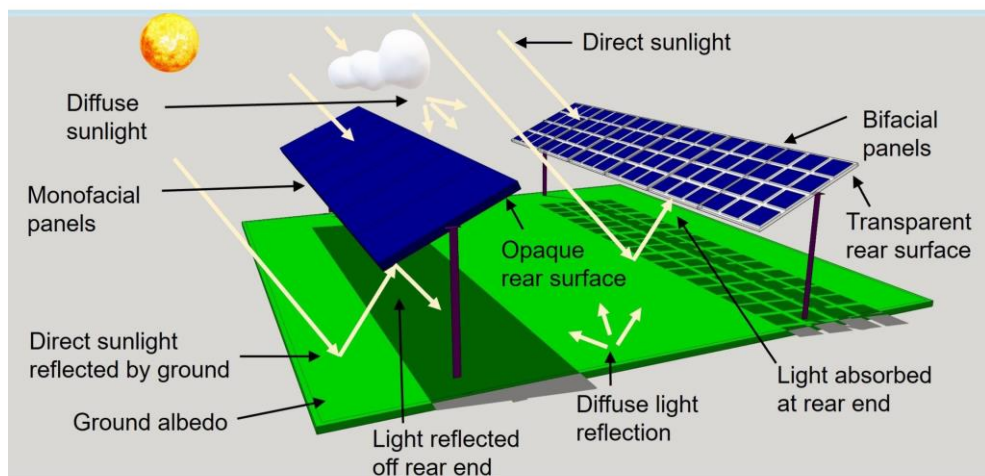


Рисунок 1.4 – Тривимірна схема агровольтаїчної системи з розташуванням фотоелектричних панелей над посівами [26].

Вітроенергетичні установки для фермерських господарств, як правило, належать до класу малих вітрових турбін (Small Wind Turbines, SWT) з одиничною потужністю від кількох кіловат до 50...100 кВт. Потужність, що теоретично може бути знята з вітрового потоку, у спрощеному вигляді описується рівнянням:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta_w, \quad (1.4)$$

де P_w – корисна електрична потужність; ρ – густина повітря; A – площа, охоплена ротором турбіни; v – швидкість вітру; η_w – сукупний ККД вітротурбіни та генератора з урахуванням обмеження за теоремою Беца.

Останні оглядові роботи вказують на суттєве підвищення енергоефективності малих вітрових турбін завдяки вдосконаленню аеродинаміки лопатей, систем керування кутом атаки та електроніки перетворення [16; 23; 40]. Водночас наголошується на великій чутливості фактичного виробітку до локальних вітрових умов, турбулентності потоку та орографії місцевості, що особливо актуально для господарств, розташованих у складному рельєфі.

На рисунку 1.5 подано приклад вертикально-осьової малої вітрової турбіни із зазначенням геометричних параметрів ротора та схеми електричної частини [16; 23].

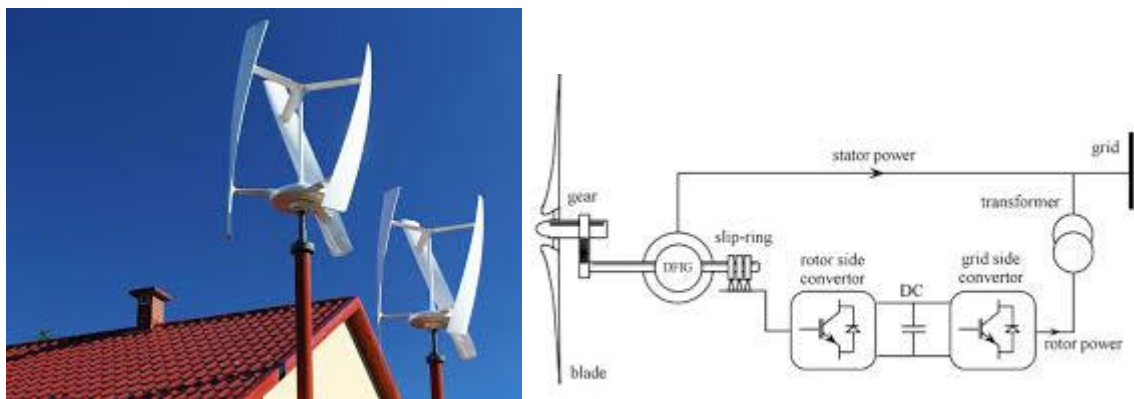


Рисунок 1.5 – Приклад вертикально-осьової малої вітрової турбіни із зазначенням геометричних параметрів ротора та схеми електричної частини

Третьою важливою складовою технологічного ландшафту є біоенергетика, яка у випадку фермерських господарств найчастіше реалізується у формі біогазових установок. Біогаз утворюється внаслідок анаеробного зброджування органічної сировини (гній, силос, відходи переробки продукції), а його енергетичний потенціал для виробництва електроенергії можна оцінити за співвідношенням;

$$E_{bg} = V_{bg} \cdot H_u \cdot \eta_{el}, \quad (1.5)$$

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика технологій виробництва електроенергії для фермерського господарства

Технологія	Типова встановлена потужність для ферми	ККД енергоперетворення (діапазон)	Ключові особливості в умовах ферми	Основні обмеження застосування
Сонячна фотоенергетика	10...200 кВт	16...22 %	Добре прогнозований ресурс, невелике обслуговування, модульність	Залежність від сонячної радіації та сезону, потреба у площі
Малі вітроенергетичні установки	5...100 кВт	25...40 % (механічний), 15–30 % (електричний)	Нічний виробіток, доповнення до сонячних систем	Висока залежність від локальних вітрових умов, шум, візуальний вплив
Біогазові установки	20...500 кВт	30...40 % (електричний ККД когенерації)	Переробка відходів, керований графік виробництва, побічний продукт – добрива	Високі капітальні витрати, потреба в стабільному обсязі сировини
Гібридні PV–вітер–біогаз системи	30–500 кВт	Залежить від конфігурації	Підвищена надійність, можливість вирівнювання графіка навантаження	Складність проектування та управління, потреба в цифрових системах моніторингу

де E_{bg} – корисна електроенергія за розрахунковий період; V_{bg} – об’єм біогазу, що надходить на спалювання; H_u – нижча теплота згоряння біогазу; η_{el} – ККД електричної частини когенераційної установки.

У сучасних роботах наголошується, що сільськогосподарські біогазові комплекси, окрім електроенергії, забезпечують ферму тепловою енергією для технологічних і побутових потреб, а також дають стабілізований органічний добривний продукт у вигляді дигестату [31; 22; 17].

З метою систематизації переваг та обмежень кожної технології в контексті фермерського господарства доцільно навести узагальнену порівняльну характеристику (табл. 1.2).

Параметри в таблиці є орієнтовними й конкретизуються для кожного господарства за результатами розрахунків та моделювання з урахуванням місцевих природних умов і структури виробництва [28].

Останні роки позначені активним розвитком гібридних енергосистем, у яких сонячна, вітрова та біогазова підсистеми поєднуються з накопичувачами енергії та, за потреби, дизельними резервними генераторами. Для таких систем широко застосовують оптимізаційні моделі, у яких мінімізується приведена вартість енергії або сумарні дисконтовані витрати за умови обмежень на надійність електропостачання й обсяги викидів. У ряді робіт розроблено методики комбінованого проектування PV/вітер/біогаз систем для малих населених пунктів і ферм, де в якості змінних розглядаються встановлені потужності генераторів, ємність акумуляторів і параметри керування навантаженнями [18].

Особливу увагу в сучасній літературі приділяють цифровим засобам підтримки проектування та експлуатації таких систем. Застосування спеціалізованих програмних комплексів для моделювання (HOMER, PVsyst, власні оптимізаційні моделі на основі Python чи MATLAB) дає змогу з високою точністю відтворювати річні профілі генерації й споживання, аналізувати чутливість техніко-економічних показників до зміни кліматичних умов, цін на обладнання та енергоресурси [28]. У контексті фермерського господарства це

створює передумови для переходу від типових рішень «за каталогом» до індивідуально спроектованих систем, параметри яких обґрунтовуються як з позицій енергетичної ефективності, так і з позицій інтеграції у виробничий процес.

Таким чином, технологічні рішення для виробництва електроенергії на основі сонячної, вітрової та біоенергетики формують широкий інструментарій для забезпечення енергетичних потреб фермерських господарств. Сонячні системи визначають базовий потенціал за рахунок простоти та доступності, вітрові установки можуть доповнювати їх у відповідних кліматичних умовах, а біогазові комплекси дозволяють перетворювати органічні відходи на кероване джерело енергії. Гібридизація цих технологій, підкріплена цифровим моделюванням і системами керування, відкриває можливості для створення автономних або слабкозалежних від мережі енергетичних рішень. Подальший аналіз у межах роботи буде спрямований на те, щоб, спираючись на наведені технічні принципи та математичні моделі, розробити підхід до обґрунтування параметрів конкретних енергетичних установок для фермерського господарства.

1.4. Завдання кваліфікаційної роботи

За результатами проведеного аналізу встановлено, що ефективне енергозабезпечення фермерських господарств значною мірою залежить від коректного вибору, масштабування та функціонування обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Це формує необхідність у виконанні комплексного дослідження за темою «Обґрунтування параметрів обладнання для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для фермерського господарства». Поставлена мета потребує виконання кількох взаємопов'язаних завдань, логічна послідовність яких забезпечує отримання обґрунтованих технічних рішень для конкретних умов функціонування ферми.

З урахуванням актуальності теми та енергетичних потреб сільськогосподарських виробництв необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасних технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, що застосовуються у фермерських господарствах;
- обґрунтувати технічні характеристики, можливості та обмеження використання сонячних, вітрових і біоенергетичних установок у сільськогосподарських умовах з урахуванням сезонності навантажень;
- провести оцінювання енергетичного балансу фермерського господарства та визначити основні групи критичних і некритичних споживачів;
- обґрунтувати параметри обладнання відновлюваних джерел енергії (потужність, конфігурація, режим роботи);
- визначити показники економічної ефективності проекту впровадження обладнання ВДЕ;
- запропонувати комплекс заходів з охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконуватиметься із застосуванням сучасних аналітичних підходів, математичного моделювання, методів прогнозування енергетичних потоків та оцінювання технічних параметрів обладнання. У роботі використані фактичні дані про споживання електроенергії фермерським господарством, кліматичні показники регіону та інформація про потенціал відновлюваних джерел енергії.

Отримані результати мають практичне значення. Вони можуть бути застосовані для розроблення проектів енергетичної автономізації фермерських господарств, зниження залежності від зовнішнього енергопостачання, підвищення енергоефективності виробництва та формування економічно доцільних рішень щодо впровадження обладнання з відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ

2.1. Аналіз об'єкту дослідження

Фермерське господарство «УЛАР», розташоване на околиці села Київець Стрийського району Львівської області, характеризується поєднанням кількох видів діяльності – тваринництва, овочівництва, тепличного господарства та складських потужностей. Вагоме місце у діяльності господарства займає птахобійний комплекс. На супутниковому знімку (рис. 2.1) добре видно його розташування та виробничу частину, включно з будівлями, під'їзною інфраструктурою та зонами зберігання матеріалів і сировини.



Рисунок 2.1 – Супутниковий знімок території птахобійного комплексу фермерського господарства «УЛАР» (с. Київець, Стрийський район Львівська область)

Наявність значних відкритих площ, а також агровиробничих конструкцій створює сприятливі умови для впровадження гібридної енергетичної системи на основі сонячної, вітрової та біоенергетики.

Будівлі та об'єкти птахобійного комплексу господарства розташовані компактно, що спрощує питання внутрішнього енергорозподілу. Разом з тим,

залежність технологічних процесів від електроенергії потребує високої надійності живлення. Найбільш енергоємними є системи вентиляції, освітлення, клімат-контролю, холодильні камери, насосні станції та обладнання для переробки продукції. У літній період навантаження істотно зростає за рахунок охолодження та зрошення; взимку – через роботу систем опалення та підтримання мікроклімату.

Для вибору обладнання гібридної енергетичної системи оцінювалися природні ресурси, доступні на території господарства. Район має сприятливий сонячний потенціал, що становить у середньому 1100...1250 кВт·год/м² на рік, що дозволяє ефективно використовувати сонячні електростанції. У межах господарства наявні великі площі дахів будівель, а також відкриті ділянки, придатні для монтажу наземних фотоелектричних модулів.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики птахобійного комплексу фермерського господарства «УЛАР», що впливають на вибір енергетичного обладнання

Параметр	Характеристика
Розташування	с. Київець, Стрийський район, Львівська область
Домінуючий тип виробництва	Птахобійня продуктивністю 6000 шт./год
Пікові навантаження	Вентиляція, насоси, холодильні камери
Сезонність	Високе споживання влітку й зимою
Сонячний потенціал	1100...1250 кВт·год/м ² за рік
Вітровий потенціал	3,8...4,5 м/с
Органічні відходи для біогазу	Відходи від переробки
Площі для монтажу СЕС	Даки теплиць, виробничі корпуси, наземні ділянки
Потреба в резервуванні	Висока – для холодильних установок

Вітрові умови регіону є помірними. За даними кліматичної статистики, середньорічна швидкість вітру становить 3,8...4,5 м/с, що відповідає мінімальним вимогам для малої вітроенергетики. Це відкриває можливість використання вертикально-осьових мікротурбін, які краще працюють за умов турбулентності та змінних вітрових потоків, характерних для територій поблизу лісових масивів.

Однією зі специфічних особливостей ФГ «УЛАР» є наявність органічних відходів від переробки птиці, що створює потенціал для малої біогазової установки. Біоенергетика може забезпечити господарство керованим джерелом енергії, що є важливим у нічний період та в зимовий сезон, коли сонячне виробництво є низьким.

Для систематизації характеристик об'єкта наведено таблицю 2.1, у якій зведені основні вихідні параметри, що впливають на вибір обладнання.

Птахобійний комплекс фермерського господарства, який розглядається у цьому дослідженні, є спеціалізованим виробничим об'єктом із продуктивністю до 6000 голів/год, що відносить його до високопродуктивних підприємств переробної галузі. Загальна компоновка підприємства охоплює зону приймання живої птиці, технологічний корпус забою та обробки, відділення для охолодження й доробки тушок, камери короткострокового зберігання, мийні станції для тари, дільниці потрошіння та сортування. Технологічна лінія працює у безперервному режимі, що зумовлює значні та стабільні енергетичні навантаження впродовж усієї виробничої зміни.

На рисунку 2.2 наведено спрощену схему електроживлення об'єкта, отриману зі щита живлення забійного цеху. Вона демонструє наявність кількох трансформаторних підстанцій (ТПп-1 та ТПп-3) та ліній АС70/11 із різною довжиною, що забезпечують живлення технологічного обладнання. Для великих промислових споживачів це важливий чинник, оскільки довжина ліній та характер підключення впливають на якість напруги, здатність витримувати пускові струми та можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії.

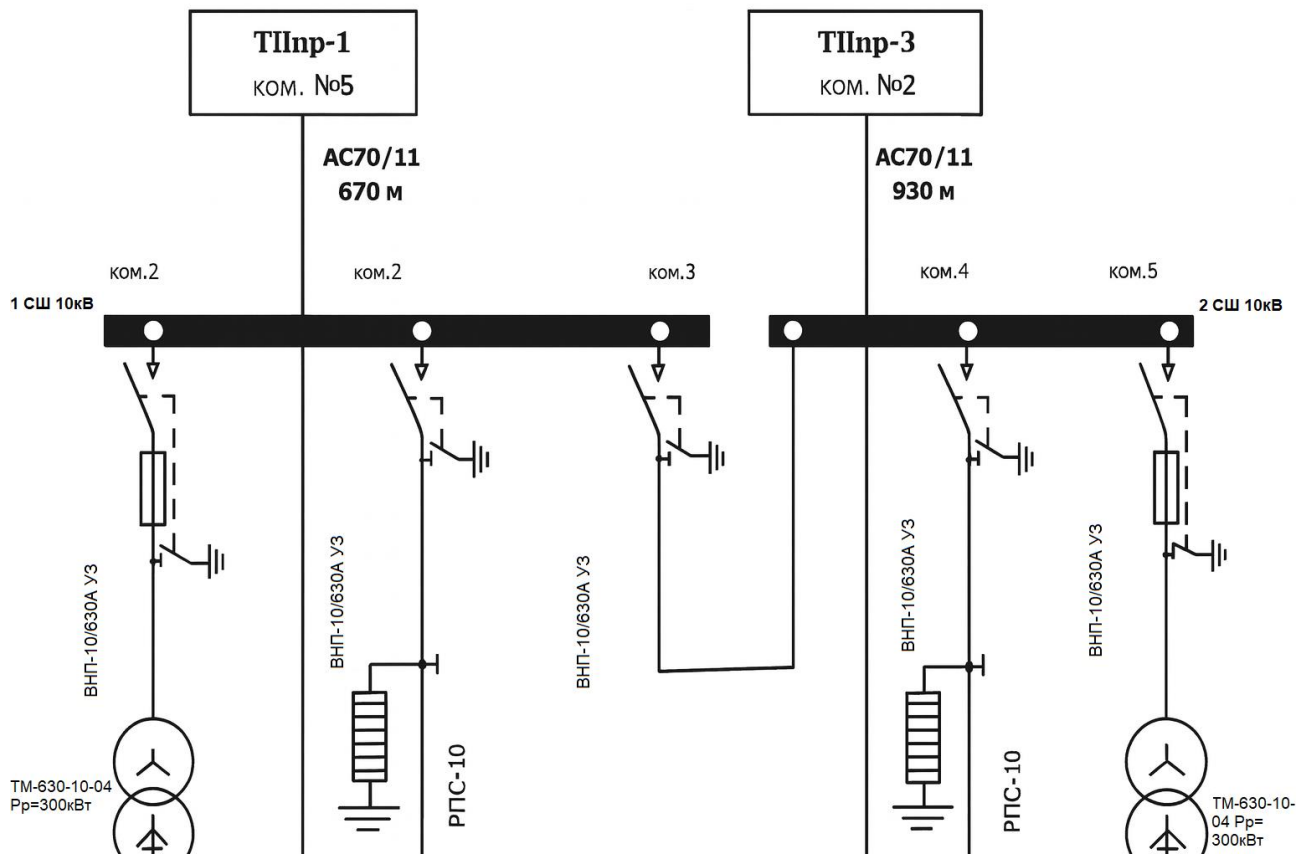


Рисунок 2.2 – Однолінійна схема електричних з'єднань 10кВ ТПп-1 та ТПп-3 птахобійного комплексу

В основі виробничої діяльності забійного комплексу лежить багатостадійний технологічний процес, що включає оглушення, знекровлення, обробку, ванни ошпарки, scuвання, потрошіння, охолодження та сортування тушок. Робота кожного елемента технологічної лінії пов'язана з використанням електроприводів, насосів, транспортерів та установок підтримання температури й санітарних параметрів. Сукупна енергопотреба обладнання формується як комбінація постійних та пікових навантажень, а частина машин потребує врахування пускових струмів, особливо електроприводи транспортерів, мийні барабани та механізми обробки тушок.

Зведений перелік обладнання містить понад 100 найменувань машин та механізмів. Для енергетичної оцінки їх було згруповано за технологічними блоками (таблиця 2.2). Такий підхід дозволяє оцінити вимоги до розподілу

електроенергії та вибрати оптимальну конфігурацію обладнання відновлюваних джерел енергії.

Таблиця 2.2 – Основні технологічні групи обладнання забійного комплексу та їх призначення

Група обладнання	Приклади машин	Характер роботи	Вплив на енергоспоживання
Транспортери забійної лінії	Підвісні конвеєри, транспортери подачі	Безперервна робота	Стабільне навантаження, можливі пускові струми
Ванни ошпарки	Парові або електронагрівні ванни	Циклічно-постійний режим	Високе теплове та електричне навантаження
Скубарки	Машини рядового скубання	Циклічна робота	Пікові навантаження під час запусків
Мийки контейнерів	Автоматичні та напівмеханізовані	Періодична робота	Суттєве водоспоживання, навантаження на насоси
Лінія потрошіння	Машини енуклеації, тримери, пилки	Безперервна робота	Стабільне електричне споживання
Холодильні камери	Чилери, компресори, тунелі охолодження	Безперервна робота	Найбільше базове навантаження доби

Особливе місце в структурі споживання займають холодильні системи, що забезпечують охолодження тушок одразу після виходу з технологічної лінії. Ці установки працюють цілодобово, формуючи базове нічне навантаження, яке не синхронізується із сонячною генерацією, і саме тому потребує резервування та акумуляційних систем під час інтеграції відновлюваних джерел енергії.

2.2. Характеристика споживачів та загальне навантаження забійного комплексу

Енергетичне навантаження забійного комплексу формується під дією багатьох споживачів, які працюють у різних режимах та мають відмінну інтенсивність використання протягом доби. Основними групами електроприймачів є підвісні та напрямні транспортери, ванни ошпарки, машини scuвання, мийні установки, обладнання для потрошіння, холодильні компресорні агрегати, вентиляційні установки та допоміжні системи. Кожен технологічний елемент функціонує або в безперервному, або в циклічному режимі, що впливає на величину пікових та середніх навантажень.

Технологічні особливості об'єкта зумовлюють наявність значних пускових струмів, характерних для електродвигунів транспортерів, барабанів мийок та окремих механізмів обробки тушок. Особливо високими є навантаження у відділенні охолодження, де компресорні станції працюють у майже безперервному режимі, забезпечуючи стабільну температуру зберігання м'яса. Саме холодильні агрегати формують базове навантаження, яке присутнє незалежно від часу доби, що істотно впливає на побудову енергетичного балансу та визначення можливостей компенсації споживання за рахунок сонячної генерації.

Сумарне електроспоживання забійного комплексу залежить від тривалості технологічного циклу, кількості змін та інтенсивності роботи холодильних установок. Загальне навантаження визначається як:

$$P_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot k_i, \quad (2.1)$$

де P_i – номінальна потужність i -го електроприймача, кВт; k_i – коефіцієнт використання потужності (0,4...0,9 залежно від типу обладнання).

Для забійного комплексу продуктивністю 6000 шт/год сукупне робоче навантаження у період активної роботи лінії становить близько:

$$P_{\text{денне}} \approx 1,8...2,5 \text{ MВт}.$$

Таблиця 2.3 – Основні групи електроспоживачів забійного комплексу та їхня характеристика

Група обладнання	Використовувана потужність, кВт	Режим роботи	Вплив на добовий профіль
Підвісні транспортери та механізми переміщення	50...120	Безперервний	Стабільне денне навантаження
Ванни ошпарки	40...90	Циклічний	Пікові навантаження у першій половині зміни
Машини скубання	20...60	Повторно-короткочасний	Підвищення піків при запуску
Мийки контейнерів та тари	10...30	Періодичний	Нерівномірна участь у добовому графіку
Насосні станції та відкачування стоків	8...20	Залежно від технології	Формують короткочасні піки
Машини потрошіння та доробки	25...70	Безперервний	Постійне навантаження в межах зміни
Холодильні станції (компресори, вентилятори, конденсатори)	150...350	Цілодобовий	Базове добове навантаження
Вентиляційні та витяжні системи	15...40	Денний режим	Ще один стабільний компонент навантаження
Світильники, допоміжні системи	5...15	Постійний	Незначна частка у балансі

У таблиці 2.3 наведено групування основних споживачів електроенергії забійного комплексу разом із типовими інтервалами потужності, характером роботи та впливом на добовий графік навантаження.

Це відповідає показникам, отриманим у виробничих вимірюваннях протягом повної зміни. Нічне навантаження забезпечується здебільшого холодильними компресорами, тому його величина знижується незначно:

$$P_{\text{нічне}} \approx 0,45 \dots 0,65 \text{ МВт}.$$

Баланс навантаження логічно відтворюється у вигляді добової діаграми (рисунок 2.3), де видно суттєве зростання споживання із початком роботи технологічної лінії та відносно плавне зниження після її завершення.

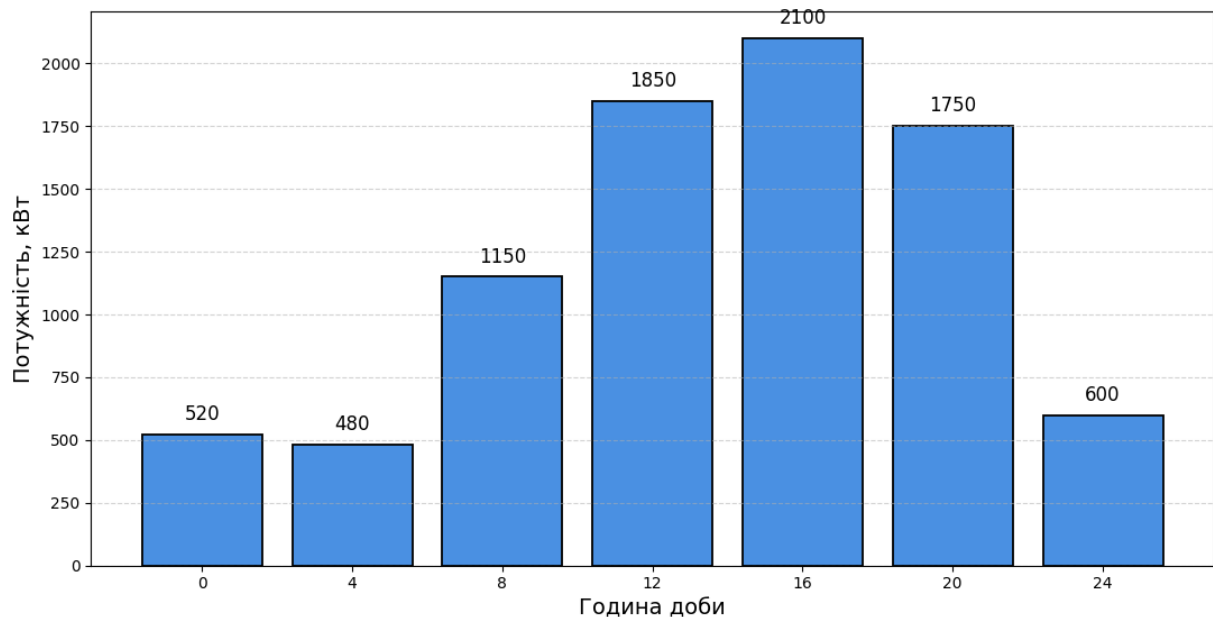


Рисунок 2.3 – Гістограма добового графіку навантаження забійного комплексу

Враховуючи наведені особливості, система енергоживлення забійного комплексу повинна забезпечувати можливість покриття як базових, так і пікових навантажень, а також володіти достатнім резервом для компенсації пускових струмів високопотужного обладнання. Це визначає специфічні вимоги до вибору відновлюваних джерел енергії: потужність сонячної генерації має бути достатньою для компенсації денних піків, а інверторне обладнання повинно підтримувати короточасні перевантаження та роботу у складі гібридної системи.

Особливу роль відіграє структура споживання: оскільки близько 30–40 % енергетичного навантаження припадає на холодильні установки, які працюють у режимі 24/7, впровадження систем накопичення енергії може значно

підвищити рівень енергоавтономності. Саме потреба у забезпеченні стійкості роботи критичного обладнання визначає актуальність проектування гібридної енергетичної системи для забійного комплексу.

2.3. Вибір складових гібридної системи виробництва електроенергії

2.3.1. Вибір складових сонячної електростанції

З огляду на зростання вартості електроенергії та необхідність зниження виробничої собівартості, доцільним є впровадження сонячної електростанції як основного джерела покриття денного навантаження. На рисунку 2.2 наведено технічні характеристики пропонованого проекту СЕС, який пропонується використати як прототип для добору параметрів генерації та інверторного обладнання.

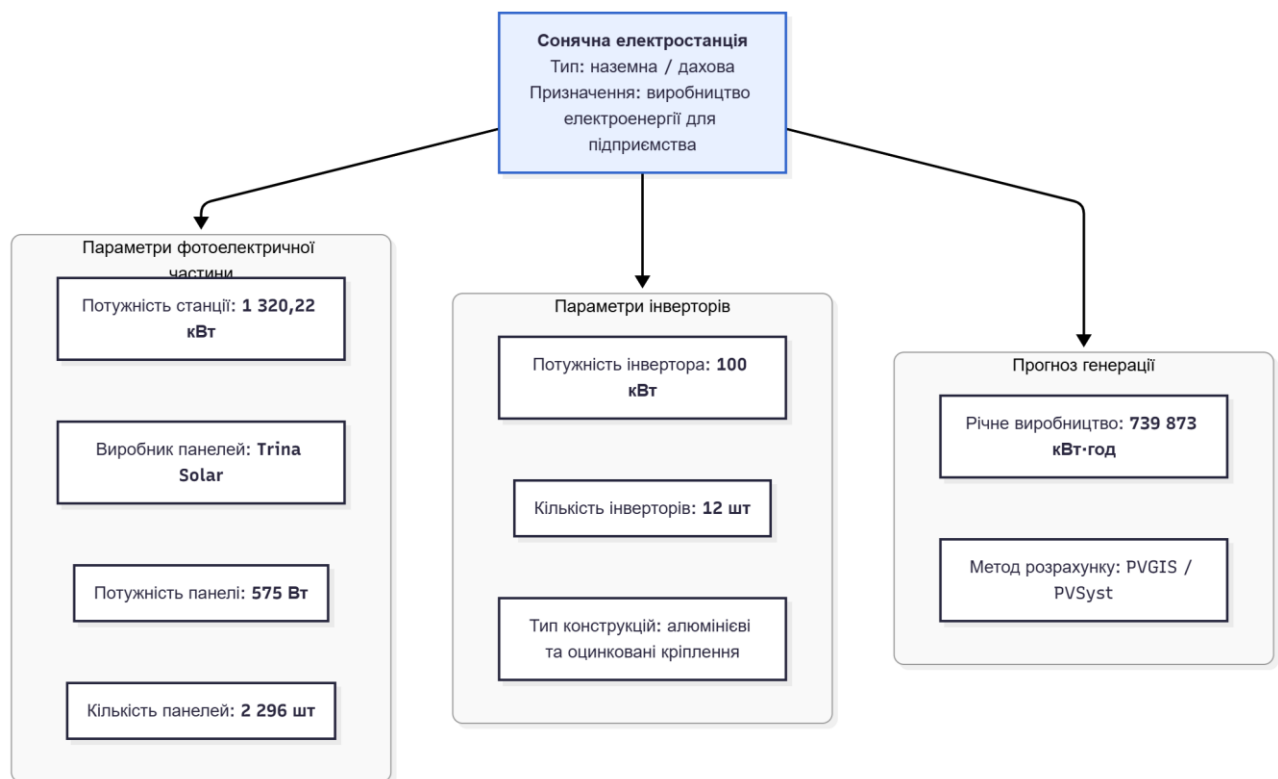


Рисунок 2.4 – Основні параметри сонячної електростанції

Станція потужністю 1,320 МВт, побудована на основі модулів Trina Solar потужністю 575 Вт та комплекту з дванадцяти інверторів по 100 кВт, забезпечує річний виробіток близько 739873 кВт·год, що підтверджено моделлю PVGIS. За своєю конфігурацією ця станція є типовою для промислових споживачів і добре відповідає добовій структурі навантаження птахобійного підприємства, де основна частка споживання припадає на денні години роботи технологічної лінії, а базове нічне навантаження забезпечують холодильні установки.

Враховуючи орієнтовне річне споживання забійного комплексу на рівні 8,0...8,5 ГВт·год, внесок сонячної станції становить приблизно 8...10 % річного енергоспоживання. У пікові денні години, за сприятливих умов освітленості, СЕС може частково компенсувати до 20–25 % миттєвого навантаження, проте середньорічне покриття не перевищує десятої частини загального обсягу.

За умови інтеграції з акумуляторною системою та оптимізації внутрішнього споживання підприємства частка використання власної генерації може зрости до 12...15 %, однак повністю замінити денну технологічну потужність СЕС не здатна через високий рівень споживання і значні пікові навантаження. У гібридній системі, що включає також біогазову когенераційну установку, сонячна генерація відіграє допоміжну роль, зменшуючи навантаження на мережу та скорочуючи витрати на електроенергію.

На основі даних про конфігурацію електроживлення, структуру обладнання та реальні характеристики СЕС є можливим подальше обґрунтування оптимальної потужності відновлюваних джерел, оцінювання режимів роботи інверторів та визначення потреби у резервуванні критичних блоків. Це створює базу для побудови гібридної енергетичної системи, здатної забезпечити стабільну роботу забійного цеху навіть за умов коливань у мережі або аварійних відключень.

2.3.2. Вибір складових біогазової установки

Також пропонується встановлення біогазової установки для переробки органічних відходів від діяльності забійного комплексу. У центральному блоці подана біогазова установка як частина гібридної енергосистеми підприємства (рис. 2.5). Біогазова установка підприємства передбачає переробку відходів забою та первинної обробки птиці, добовий обсяг яких становить близько 25...26 тон. Така кількість органічної маси забезпечує отримання приблизно 2,6...2,9 тис. м³ біогазу на добу, що дозволяє стабільно жити когенераційну установку електричною потужністю 250...300 кВт. У такому режимі добове виробництво електроенергії становить близько 7,4 тис. кВт·год, а річне – близько 2,4...2,5 ГВт·год.

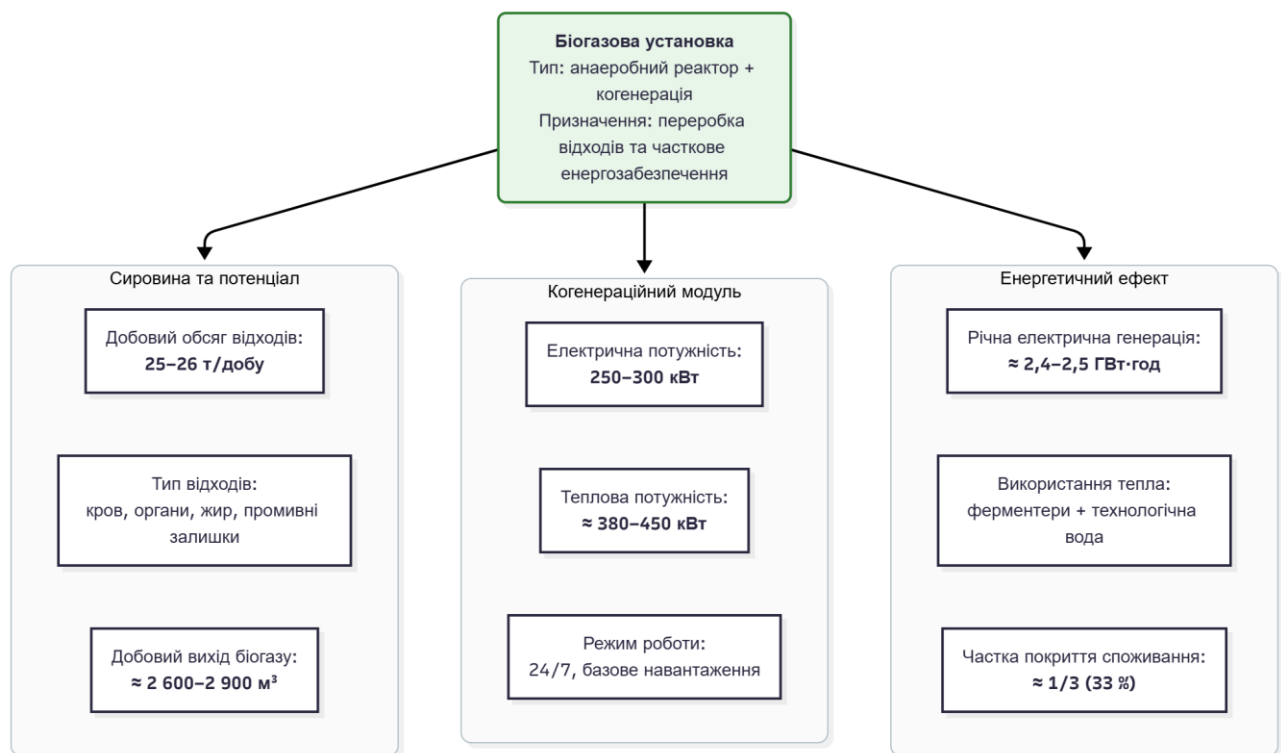


Рисунок 2.5 – Основні параметри біогазової установки забійного комплексу

Отримане значення є достатнім для покриття орієнтовно однієї третини загального електроспоживання забійного комплексу. Решта енергії забезпечується за рахунок сонячної електростанції та зовнішньої мережі.

Теплова енергія когенераційного блоку використовується для підтримки температури ферментерів і частково – для технологічних потреб, що підвищує загальний ККД системи.

2.4. Оцінювання енергетичного балансу

Енергетичний баланс забійного комплексу формується під впливом декількох ключових чинників – добового споживання електроенергії, структури технологічних навантажень, режимів роботи обладнання, а також присутності власних джерел генерації у вигляді сонячної електростанції та біогазової когенераційної установки. Визначення річного енергобалансу дає змогу оцінити рівень енергонезалежності підприємства, частку покриття навантажень за рахунок відновлюваних джерел та необхідність залучення зовнішньої електромережі.

У межах аналізу добовий графік навантаження показав наявність чітко виражених денних піків, що співпадають із роботою технологічної лінії. Нічне навантаження залишається на рівні 0,45...0,65 МВт і формується переважно холодильними установками та вентиляційним обладнанням. На рисунку 2.6 наведено узагальнену гістограму добового електроспоживання, що відображає характерний розподіл навантаження протягом доби.

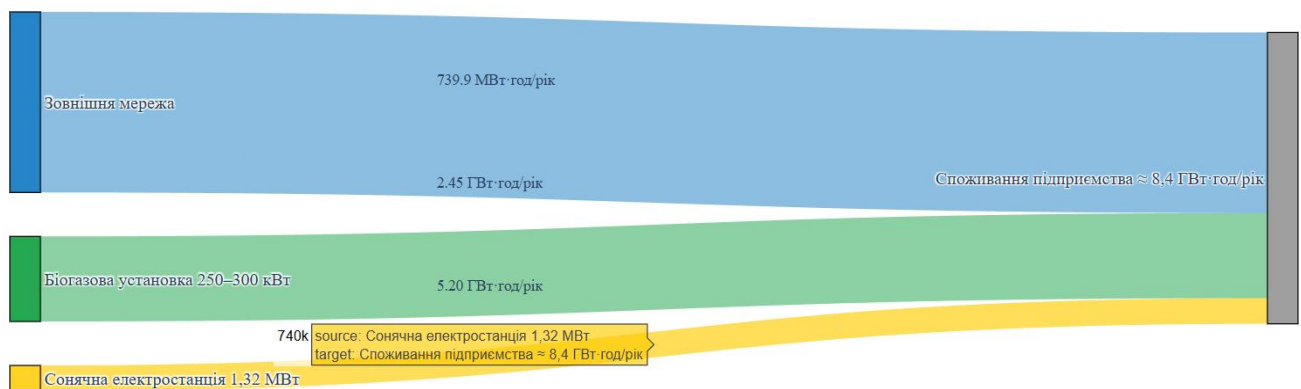


Рисунок 2.6 – Енергетичний баланс забійного комплексу у складі гібридної системи енергозабезпечення (Sankey-діаграма)

Встановлено, що пікова миттєва потужність споживання забійного комплексу є на рівні 2,5 МВт. Для оцінювання річного енергоспоживання використовується інтегральний підхід, коли добова енергія множиться на кількість робочих днів. Припускаючи, що комплекс працює 300 днів на рік, річне споживання електроенергії можна визначити за формулою:

$$E_{річ} = E_{доб} \cdot N_{днів}, \quad (2.2)$$

де $E_{доб}$ – середнє добове споживання, МВт·год; $N_{днів}$ – тривалість роботи, днів
 $N_{днів} = 300 \text{ днів}$.

З урахуванням проведеної оцінки добове споживання становить приблизно 28 МВт·год, тому:

$$E_{річ} = 28 \cdot 300 = 8400 \text{ МВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Для визначення внеску сонячної електростанції у загальний баланс використовується її річний виробіток, який згідно з розрахунком PVGIS становить 739873 кВт·год. Частка покриття споживання визначається як відношення річної генерації СЕС до річного споживання підприємства:

$$k_{СЕС} = \frac{E_{СЕС}}{E_{рік}}, \quad (2.3)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (2.3) отримаємо:

$$k_{СЕС} = \frac{739873}{8400000} \approx 0,088.$$

Це становить приблизно 8...10 % річного енергоспоживання. Незважаючи на невисокий відносний показник, сонячна станція здатна істотно розвантажувати підприємство у денні години, коли працюють основні технологічні механізми.

Значно більшу частку покриття забезпечує біогазова когенераційна установка, яка виробляє приблизно 2,4...2,5 ГВт·год електроенергії на рік. Її частка покриття споживання визначається аналогічно:

$$k_{БГУ} = \frac{E_{БГУ}}{E_{рік}}, \quad (2.4)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (2.4) отримаємо:

$$k_{\text{БГУ}} = \frac{2,45}{8,4} \approx 0,29.$$

Отже, біогазова установка покриває орієнтовно третину річного електроспоживання підприємства, працюючи в режимі базового навантаження протягом доби. Найбільшу ефективність вона демонструє у години відсутності сонячної генерації, тобто у вечірній та нічний час, коли холодильні та вентиляційні установки формують базову частку навантаження.

Зведений енергетичний баланс гібридної системи наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Річний енергетичний баланс забійного комплексу

Джерело	Річна генерація, кВт·год	Частка покриття, %
Сонячна електростанція, 1,32 МВт)	739873	8...10 %
Біогазова когенераційна установка	2400000...2500000	29...30 %
Зовнішня електромережа	≈ 5200000	60...63 %
Разом	8400000	100%

Структурно гібридна система дозволяє раціонально комбінувати генерацію з відновлюваних джерел. Сонячна електростанція забезпечує покриття частини денних пікових навантажень, знижуючи потребу у купівлі електроенергії з мережі. Біогазова установка виступає стабільним джерелом базової генерації, що працює цілодобово та дозволяє компенсувати споживання у нічні та ранкові години. Загалом використання обох джерел забезпечує до 40 % річного покриття, що підвищує енергонезалежність підприємства і знижує ризики, пов'язані з коливаннями вартості електроенергії.

Підсумовуючи, можна зазначити, що застосування гібридної енергосистеми з використанням фотоелектричної станції та біогазової когенерації значно оптимізує енергетичний баланс забійного комплексу,

сприяючи зменшенню витрат і підвищенню стійкості виробничих процесів. Якщо додатково інтегрувати систему накопичення електроенергії, підприємство може ще більше підвищити ефективність власного використання генерації та зменшити залежність від зовнішньої мережі.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ЗАБІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

3.1. Вибір схеми гібридної системи виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для забійного комплексу фермерського господарства

Енергетична інфраструктура забійного комплексу характеризується нерівномірним графіком електроспоживання, у якому ранкові та денні піки визначаються роботою технологічних ліній, а нічне навантаження формується переважно холодильними камерами та вентиляційним обладнанням. Відсутність стабільності в навантаженнях, висока вартість електроенергії з мережі та наявність значного обсягу органічних відходів створюють передумови для впровадження гібридної системи енергозабезпечення. До її складу доцільно включити дві автономні підсистеми – сонячну електростанцію (СЕС) та біогазову когенераційну установку, які взаємодіють між собою через шини постійного та змінного струму.

Сонячна підсистема забезпечує найбільшу генерацію у світлу пору доби та дозволяє покрити частину технологічного навантаження без залучення зовнішньої мережі. З огляду на доступну площу дахових і наземних майданчиків, а також враховуючи технічний паспорт наявної СЕС (станція 1,32 МВт на базі 2296 модулів Trina Solar потужністю 575 Вт), вона може забезпечувати близько $E_{СЕС} = 7,4 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$. У свою чергу біогазова установка здатна виробляти електричну та теплову енергію упродовж доби, перетворюючи органічні відходи, яких на підприємстві утворюється в середньому 25...26 т/добу. За результатами попередніх оцінок добовий вихід біогазу становить $V_{\text{біогаз}} = 2,6 - 2,9 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{добу}$, що достатньо для забезпечення

когенераційного модуля електричною потужністю $P_e = 250...300 \text{ кВт}$ та тепловою $P_t = 380...450 \text{ кВт}$.

Взаємодія двох підсистем здійснюється через DC Bus та AC Bus, які виконують функцію внутрішнього вузла енергорозподілу. Потужність від фотоелектричних модулів надходить у шину постійного струму та далі проходить через мережеві інвертори загальною потужністю $12 \times 100 \text{ кВт}$. Біогазовий агрегат, навпаки, працює у контурі змінного струму та може або компенсувати дефіцит генерації СЕС, або працювати автономно під час пікових навантажень.

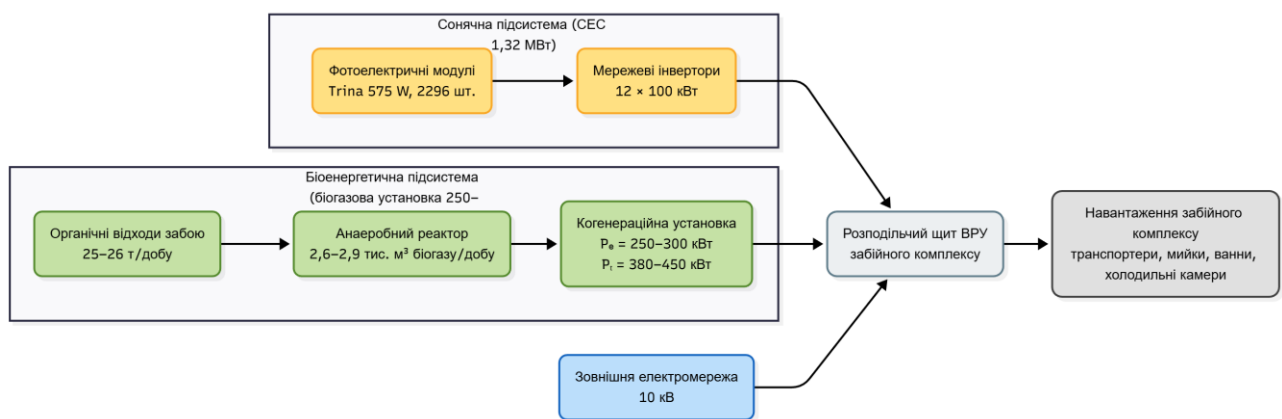


Рисунок 3.1 – Фрагмент структурної схеми сонячної та біоенергетичної підсистем забірного комплексу

У вибраній конфігурації сонячна й біоенергетична підсистеми інтегровані через розподільчий щит ВРУ, який забезпечує пріоритетне використання власної генерації та мінімізацію споживання електроенергії з мережі 10 кВ. Це дозволяє зменшити частку зовнішнього електропостачання, підвищити надійність роботи технологічних ліній та забезпечити гнучкість у разі аварій або пікових перевантажень.

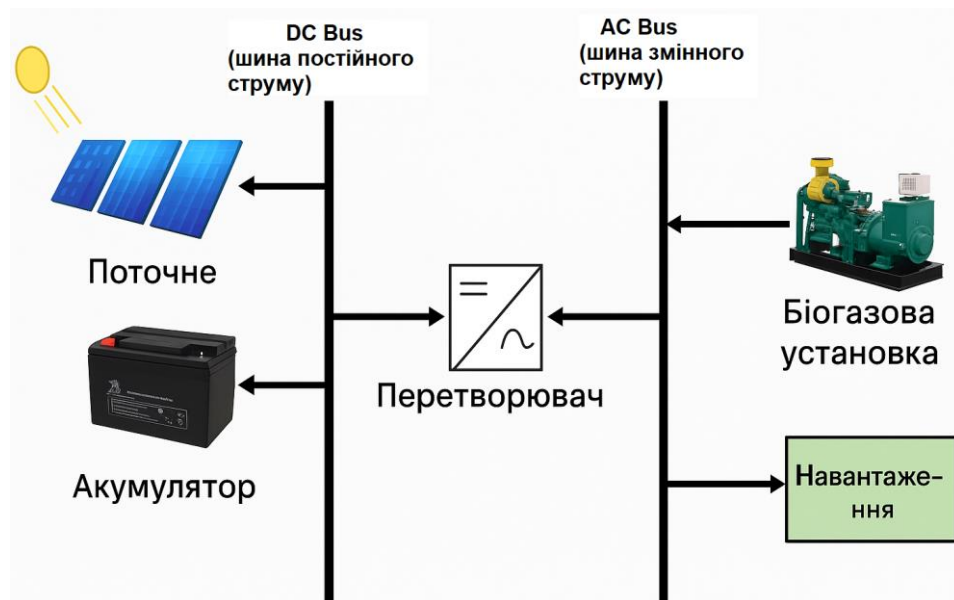


Рисунок 3.2 – Уніфікована схема гібридної енергосистеми
(PV + біогаз + мережа)

Для порівняння і подальшої оптимізації наведено орієнтовну характеристику потужностей підсистем (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні параметри підсистем гібридної енергетичної системи

Підсистема	Основні характеристики	Річна генерація
Сонячна електростанція	1,32 МВт, 2296 модулів Trina 575 Вт, 12 інверторів по 100 кВт	0,74 ГВт·год
Біогазова когенераційна установка	25–26 т відходів/добу, 2,6–2,9 тис. м ³ біогазу/добу, $P_e = 250\text{--}300$ кВт	2,4–2,5 ГВт·год
Зовнішня електромережа	Підключення 10 кВ	Покриття дефіциту

Гібридна система дозволяє узгоджувати виробництво та споживання енергії так, щоб денне навантаження було максимально забезпечене за рахунок СЕС, тоді як у нічний час основну частку покриває когенераційна установка. Сумарний баланс електроенергії визначається співвідношенням:

$$E_{\text{спож}} = E_{\text{CEC}} + E_{\text{біогаз}} + E_{\text{мережа}}, \quad (3.1)$$

де $E_{\text{спож}}$ – загальне річне електроспоживання забійного комплексу, кВт·год/рік;
 E_{CEC} – річна генерація сонячної електростанції (CEC), кВт·год/рік; $E_{\text{біогаз}}$ –
 річна генерація біогазової когенераційної установки, кВт·год/рік,
 $E_{\text{біогаз}} \approx 2,4 \dots 2,5 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$.

Таким чином, вибір саме такої конфігурації гібридної системи обумовлений наявністю значного біогазового потенціалу, високим рівнем денного споживання електроенергії та потребою в резервуванні критичних навантажень. Інтеграція сонячної та біоенергетичної підсистем забезпечує комплексний підхід до енергозабезпечення забійного комплексу, підвищує його енергетичну автономність і створює можливості для подальшої оптимізації режимів роботи.

3.2. Результати моделювання річного обсягу виробництва електроенергії сонячною підсистемою

Для визначення очікуваної річної генерації сонячної електростанції фермерського господарства було проведено моделювання у програмному середовищі PVGIS 5.3 (European Commission) [12]. Географічні координати, що відповідають фактичному розташуванню забійного комплексу у с. Київець Стрийського району Львівської області, становили:

$$\varphi = 49.4223^\circ, \quad \lambda = 24.0301^\circ.$$

Вихідні параметри моделі відповідали характеристикам запланованої сонячної підсистеми: встановлена потужність 1.32 МВт, кремнієві фотоелектричні модулі, фіксоване кріплення, оптимізований кут нахилу та орієнтація на південь. Загальні втрати системи становили 14%, що відповідає типовим значенням для комерційних CEC (втрати інверторів, кабельні втрати, забруднення панелей, температурні втрати тощо) (рис. 3.3).

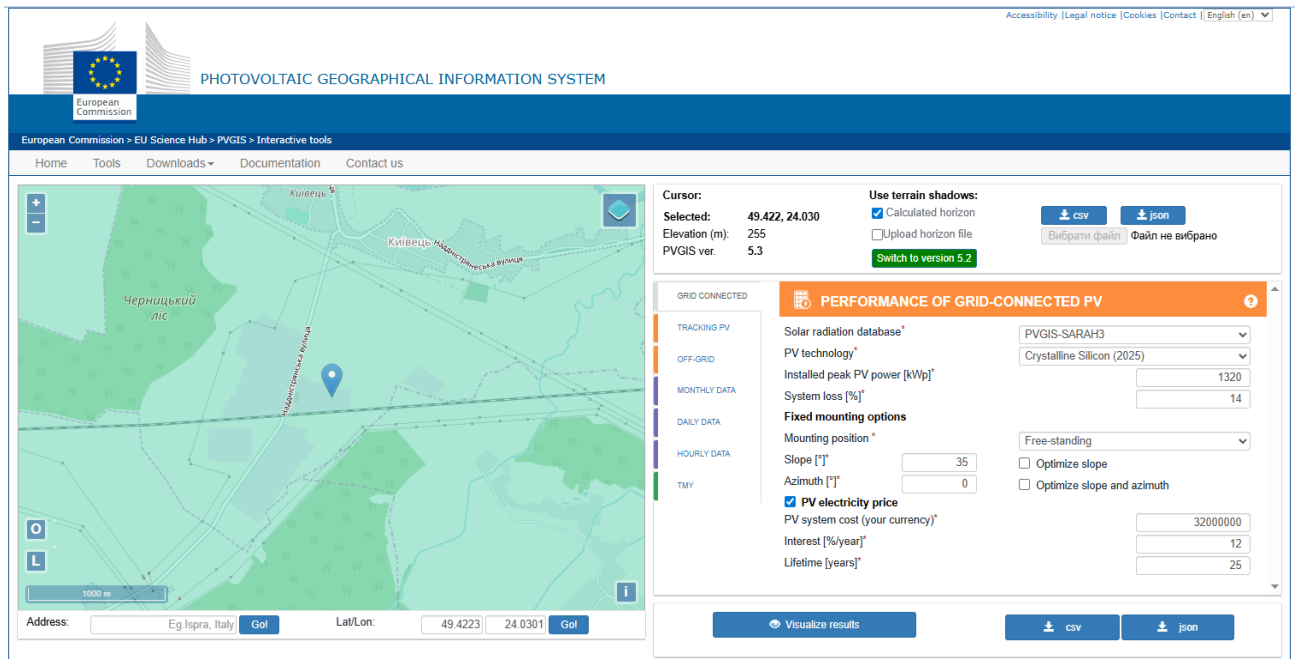


Рисунок 3.3 – Вихідні параметри моделювання сонячної електростанції в інтерфейсі PVGIS

Для розташування в с. Київець характерний відкритий горизонт зі слабкою затіненістю з боку півдня та південного сходу, що підтверджено діаграмою висоти горизонту.

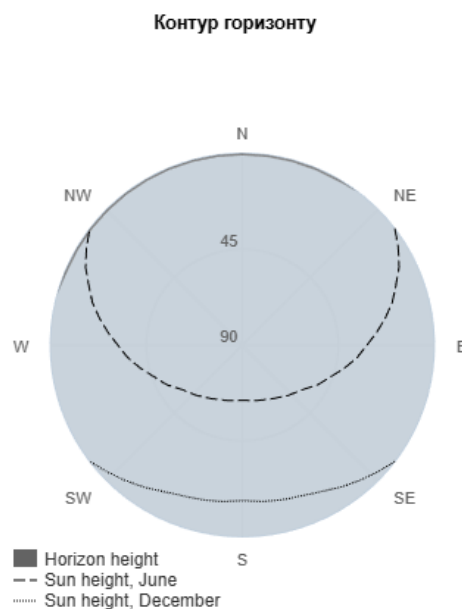


Рисунок 3.4 – Контур горизонту в точці встановлення СЕС

Оцінювання річної продуктивності у PVGIS результат визначається на основі:

$$E_{річн} = P_{inst} \cdot H_{річ} \cdot (1 - \eta_{втрат}), \quad (3.2)$$

де P_{inst} – встановлена потужність енергетичної установки (Installed Capacity), $P_{inst} = 1,32 \text{ MBm}$; $H_{річ}$ – річна сонячна інсоляція в еквіваленті годин повної потужності, $H_{річ} = 950 \text{ год/рік}$; $\eta_{втрат}$ – відносні системні втрати, $\eta_{втрат} = 0.14$.

Після виконання розрахунку отримано щомісячні та річні показники генерації. Річна продуктивність СЕС становить:

$$E_{річн} = 1368\,240 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{рік}.$$

Згідно з результатами PVGIS річна генерація становить 1.368 ГВт·год/рік. Однак для виробничих умов забійного комплексу характерні додаткові втрати, які не враховуються у стандартній моделі PVGIS. До них належать затінення технологічними спорудами ($K_{sh} = 0.85 \dots 0.92$), забруднення панелей органічними аерозолями ($K_{pol} = 0.80 \dots 0.90$), підвищений температурний режим ($K_{temp} = 0.92 \dots 0.95$), додаткові системні втрати ($K_{sys} = 0.90 \dots 0.94$) та орієнтаційні похибки монтажу ($K_{ori} = 0.95 \dots 0.98$).

Сукупний коефіцієнт зниження продуктивності становить:

$$K = K_{sh} \cdot K_{pol} \cdot K_{temp} \cdot K_{sys} \cdot K_{ori}, \quad (3.3)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (3.3) отримаємо:

$$K \approx 0.54 \dots 0.57.$$

Таким чином, реальна річна генерація очікується на рівні:

$$E_{реал} = E_{PVGIS} \cdot K. \quad (3.4)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (3.4) отримаємо:

$$E_{реал} = 1368\,240 \cdot 0,54 = 739873 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{рік}.$$

Результати визначення щомісячної продуктивності фотоелектричної системи за даними PVGIS

Основні результати моделювання подано у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати прогнозування щомісячної генерації електроенергії
СЕС на основі даних PVGIS, SARAH3

Місяць	Генерація (за даними PVGIS), кВт·год	Генерація скоригована із врахуванням коефіцієнта K , кВт·год
Січень	55600	30063
Лютий	82500	44608
Березень	129600	70075
Квітень	158500	85701
Травень	172400	93217
Червень	179300	96948
Липень	188600	101976
Серпень	181200	97975
Вересень	145000	78402
Жовтень	113000	61099
Листопад	68900	37254
Грудень	44600	24115
Разом	1368240	739873

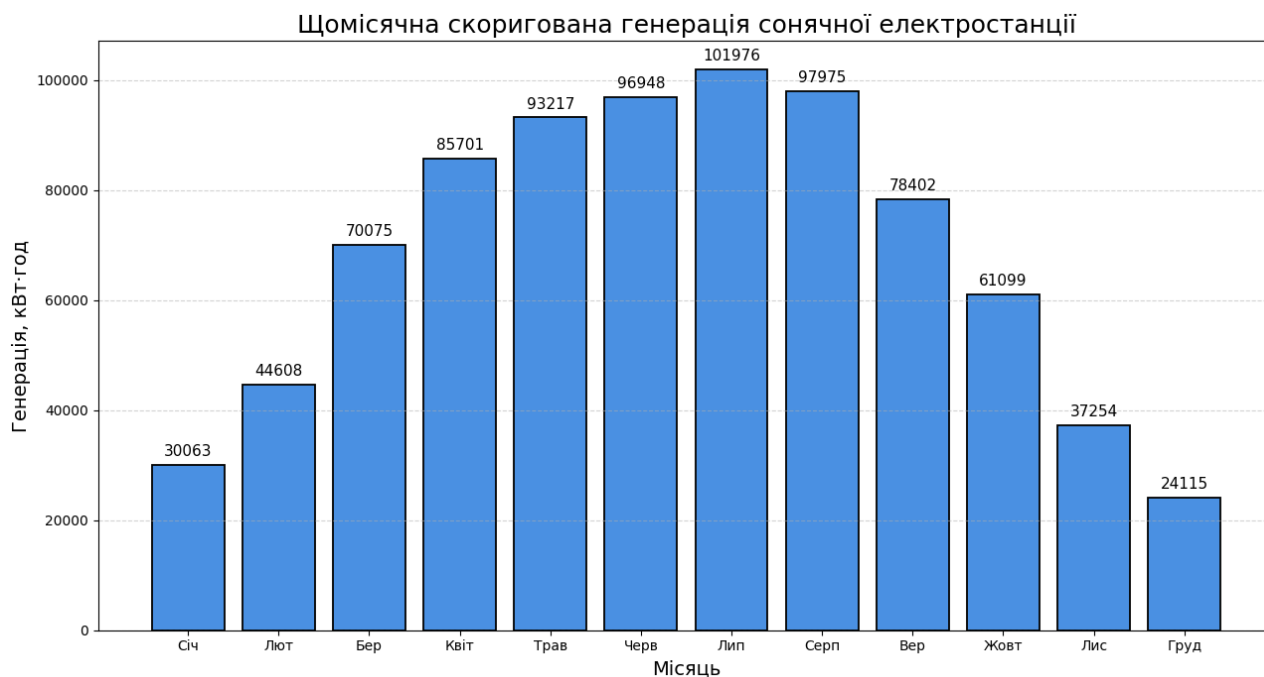


Рисунок 3.5 – Щомісячна продуктивність енергії від фотоелектричної системи
за даними PVGIS

Графік показує характерний сезонний профіль: максимум генерації припадає на квітень–серпень, коли висота Сонця та тривалість дня є найбільшими. У зимові місяці продуктивність очікувано знижується, однак навіть у грудні станція виробляє близько 24,115 тис. кВт·год.

Отримані результати підтверджують, що при встановленій потужності 1.32 МВт сонячна підсистема забійного комплексу може забезпечити до 15...20 % річного електроспоживання підприємства, яке становить ≈ 8.4 ГВт·год/рік. Продуктивність є стабільною впродовж теплого періоду року, що дозволяє зменшити пікові навантаження на зовнішню мережу в денні години, коли робота комплексу є найбільш інтенсивною.

Моделювання PVGIS дозволило отримати достовірну оцінку генерації з урахуванням реального місця розташування, сонячної інсоляції, оптимального кута кріплення та втрат системи. Ці дані застосовуються у подальших розрахунках комбінованої сонячно-біогазової гібридної енергосистеми забійного комплексу.

3.3. Методика та результати визначення параметрів обладнання сонячної та біоенергетичної підсистем

Вибір обладнання для гібридної системи енергозабезпечення забійного комплексу здійснювався за поетапною методикою, яка охоплює аналіз потенціалу відновлюваних джерел енергії, розрахунок очікуваної генерації, співставлення виробітку з добовим та річним графіками навантаження і перевірку відповідності обладнання технічним вимогам електросистеми підприємства. Усі розрахункові процедури виконувалися з урахуванням фактичного споживання електроенергії, яке у пікові відрізки часу досягає 2,0...2,5 МВт, а річне споживання становить близько 8,4 ГВт·год.

Визначення параметрів сонячної підсистеми ґрунтувалося на моделі сонячної генерації, яка описує добовий виробіток залежно від встановленої

потужності, коефіцієнта ефективності та інтенсивності сонячної радіації. Встановлена потужність СЕС на підприємстві становить 1320,22 кВт, що досягається за рахунок 2296 модулів Trina Solar потужністю 575 Вт кожен. Використання цих модулів обумовлюється три основними чинниками: високою питомою продуктивністю при помірній площі установки, стійкістю до деградаційних процесів у польових умовах та доступністю структурованого технічного обслуговування.

Вибір мережевих інверторів сумарною потужністю 12×100 кВт обґрунтовується тим, що такий розподіл дозволяє забезпечити роботу системи у випадку часткового виходу інверторів з ладу, а також зменшує пікові струмові навантаження на кожен із них. Додатково інвертори цього класу мають широкий діапазон напруг на DC Bus, що спрощує конфігурацію сонячних стрингів. Схема сонячної підсистеми наведена на рисунку 3.6.

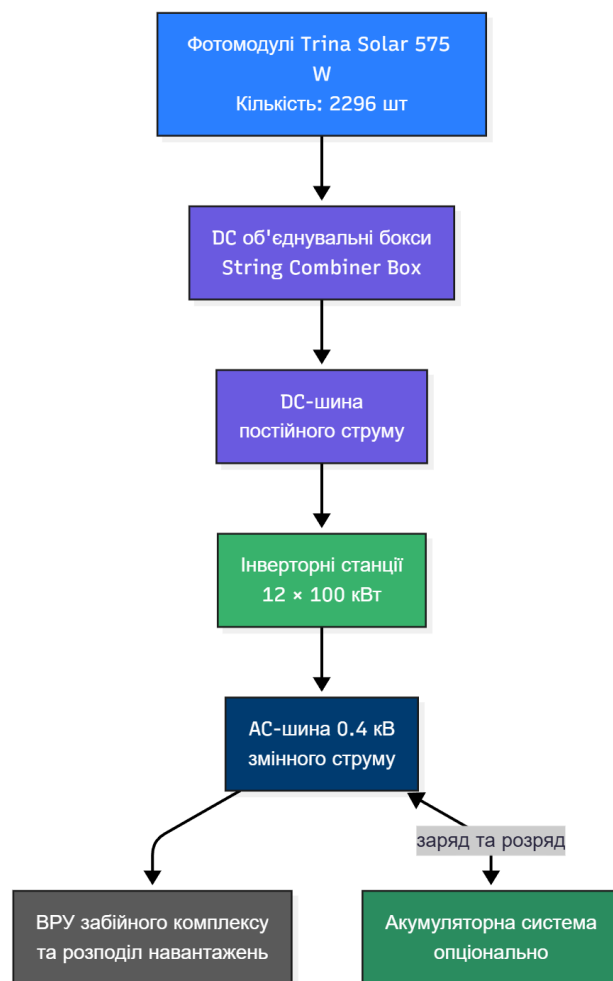


Рисунок 3.6 – Схема сонячної підсистеми підприємства

Біоенергетична підсистема обиралася відповідно до обсягів відходів, що утворюються під час роботи забійного комплексу. За результатами аналізу встановлено, що добова кількість органічних решток становить 25...26 тон. Розрахунок добового виходу біогазу виконувався за рівнянням:

$$V_{\text{біогаз}} = M_{\text{відх}} \cdot Y_{\text{біогаз}}. \quad (3.5)$$

де $M_{\text{відх}}$ – добова маса відходів, тон; $Y_{\text{біогаз}}$ – вихід біогазу, $Y_{\text{біогаз}} = 95...110 \text{ м}^3 / \text{т}$.

Підставивши відповідні значення у формулу (3.5) отримаємо:

$$V_{\text{біогаз}} \approx 2,6...2,9 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{добу}.$$

Цього обсягу достатньо для живлення когенераційного модуля середньої потужності. Вибір установки електричною потужністю 250...300 кВт пояснюється тим, що саме такий діапазон забезпечує безперервну роботу в режимі 24/7 та оптимальне співвідношення між обсягом біогазу і тепловим навантаженням ферментерів. Розрахунок електричної генерації виконувався відповідно до формули:

$$E_e = V_{\text{біогаз}} \cdot LHV \cdot \eta_e. \quad (3.6)$$

де LHV – нижча теплота згоряння біогазу, МДж/м³, $LHV = 21...23 \text{ МДж} / \text{м}^3$; η_e – електричний ККД когенераційної установки, $\eta_e = 0,33 - 0,36$.

У перерахунку на річний виробіток отримано:

$$E_{\text{біогаз}} \approx 2,4...2,5 \text{ ГВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Вибір когенераційного обладнання саме в цьому діапазоні потужності обґрунтовується не лише відповідністю обсягу біогазу, але й тим, що потужність 250...300 кВт забезпечує стабільний профіль подачі електроенергії в нічні години, коли СЕС не працює, а технологічні процеси підприємства потребують безперервного живлення.

На рисунку 3.7 подано структурну схему біоенергетичної підсистеми.

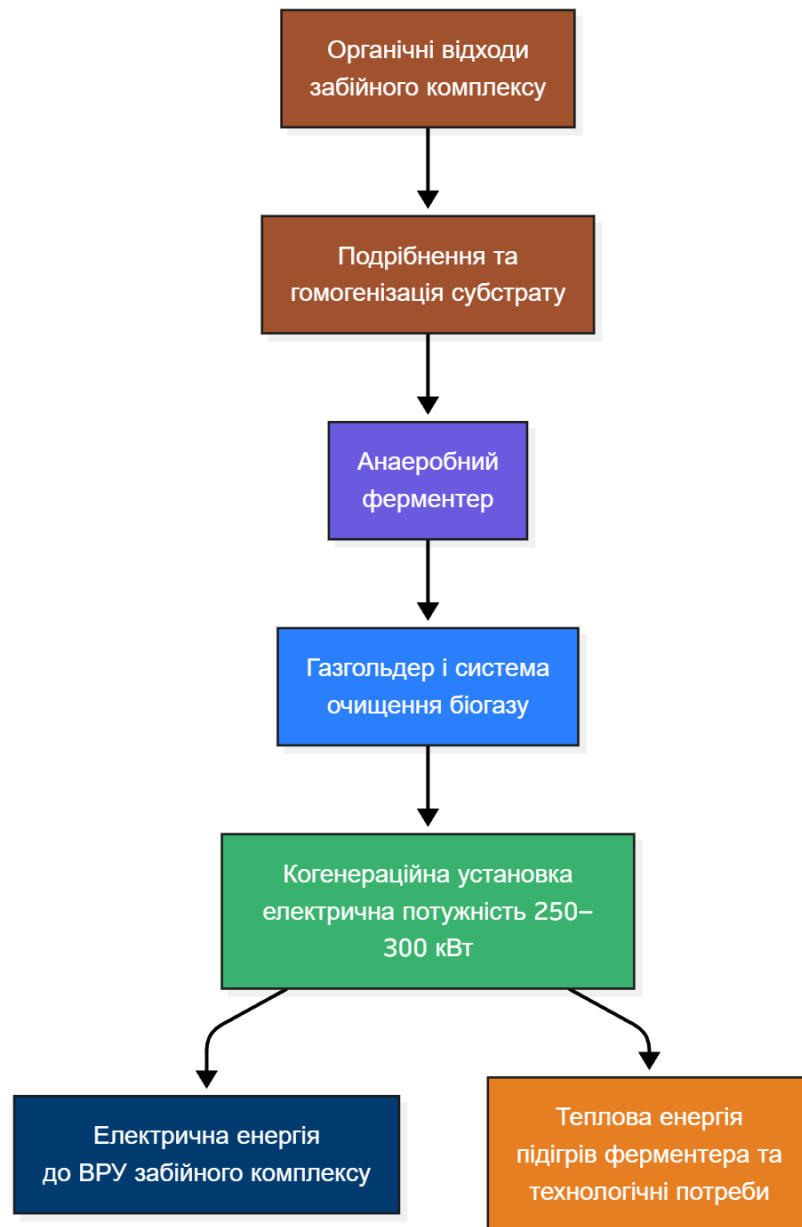


Рисунок 3.7 – Структурна схема біоенергетичної підсистеми

Щоб оцінити ступінь відповідності обраного обладнання потребам підприємства, виконувалося моделювання енергетичного балансу, згідно з яким загальна генерація двох підсистем становить:

$$E_{ген} = E_{CEC} + E_{біогаз}. \quad (3.7)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (3.7) отримаємо:

$$E_{ген} = 0,74 + 2,45 = 3,19 \text{ ГВт} \cdot \text{год}.$$

Це дозволяє покрити приблизно 38% річного електроспоживання підприємства, причому біогазова підсистема забезпечує базове навантаження та компенсує відсутність генерації СЕС у темний період доби.

Узагальнені параметри обладнання наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні параметри обраного обладнання

Підсистема	Елемент	Параметри	Причина вибору
Сонячна	Фотоелектричні модулі Trina 575 W	2296 шт., сумарно 1320,22 кВт	Висока питома продуктивність, надійність, оптимальна площа
Сонячна	Мережеві інвертори 100 кВт	12 шт.	Гнучкість, резервування, відповідність структурі стрингів
Біоенергетична	Анаеробний реактор	25...26 т/добу	Відповідність обсягу відходів
Біоенергетична	СНР-модуль 250...300 кВт	1 шт.	Сумісність з обсягом біогазу, режим 24/7
Обидві	Розподільчий щит ВРУ	0,4 кВ	Інтеграція обох джерел у спільну шину

Таким чином, застосована методика дозволяє всебічно оцінити параметри обладнання та обґрунтувати вибір конфігурації гібридної системи. Результати підтверджують доцільність встановлення СЕС потужністю 1,32 МВт та біогазової СНР-установки потужністю 250...300 кВт як оптимального поєднання для забезпечення енергетичних потреб забійного комплексу.

3.4. Режими роботи енергетичної системи в різні періоди року

Моделювання режимів роботи гібридної енергетичної системи забійного комплексу є необхідним для забезпечення узгодженого функціонування сонячної, біоенергетичної та зовнішньої мережевої підсистем у різні сезони року. Оскільки виробничі процеси підприємства характеризуються відносно стабільним добовим навантаженням та незначною сезонною варіабельністю технологічних циклів, ключовим чинником зміни балансу є саме сезонна динаміка генерації відновлюваних джерел енергії. Сонячна генерація істотно змінюється протягом року, тоді як біогазова підсистема забезпечує рівномірну добову потужність, що формує базове навантаження.

У загальному вигляді добовий енергетичний баланс для певного сезону можна подати рівнянням:

$$P_{\text{бал}}(t) = P_{\text{CEC}}(t) + P_{\text{біогаз}}(t) + P_{\text{мережа}}(t) - P_{\text{спож}}(t). \quad (3.8)$$

де $P_{\text{CEC}}(t)$ – миттєва потужність сонячної підсистеми; $P_{\text{біогаз}}(t)$ – потужність когенераційної установки; $P_{\text{мережа}}(t)$ – потужність, що компенсується із зовнішньої мережі; $P_{\text{спож}}(t)$ – навантаження підприємства.

Оскільки біогазова установка працює в режимі майже сталої електричної потужності $P_{\text{біогаз}}(t) = 250 \dots 300 \text{ кВт}$, сезонні відмінності енергобалансу формуються головню за рахунок зміни величини $P_{\text{CEC}}(t)$.

На основі щомісячних скоригованих даних генерації сонячної електростанції, що враховують коефіцієнт реальних втрат $K_{\text{втрат}} = 0.54$, сформовано модель сезонного перерозподілу енергії, наведений у таблиці 3.5.

Аналіз свідчить, що максимальна ефективність сонячної підсистеми спостерігається у період із травня по серпень, коли інсоляція регіону відповідає найбільшим значенням. У цей час СЕС+біогаз може покривати до 43 % добового споживання у денні години, зменшуючи навантаження на мережу та частково забезпечуючи холодильні камери й технологічні лінії. У зимовий

період частка покриття суттєво знижується, що потребує посиленого використання зовнішньої мережі.

Таблиця 3.5 – Місячна генерація СЕС і біогазової підсистеми та частка покриття навантаження

Місяць	Генерація СЕС, кВт·год	Генерація біогазу, кВт·год	Сумарна генерація, кВт·год	Місячне навантаження, кВт·год	Частка покриття, %
Січень	30063	204167	234230	700000	33.5
Лютий	44608	204167	248775	700000	35.5
Березень	70075	204167	274242	700000	39.2
Квітень	85701	204167	289868	700000	41.4
Травень	93217	204167	297384	700000	42.5
Червень	96948	204167	301115	700000	43.0
Липень	101976	204167	306143	700000	43.7
Серпень	97975	204167	302142	700000	43.2
Вересень	78402	204167	282569	700000	40.4
Жовтень	61099	204167	265266	700000	37.9
Листопад	37254	204167	241421	700000	34.5
Грудень	24115	204167	228282	700000	32.6
Разом	739873	2450000	3189873	8400000	38.0

Біогазова підсистема демонструє найбільшу стабільність, оскільки вироблення теплотворної маси та швидкість анаеробного бродіння практично не залежать від погодних умов. Це дозволяє використовувати когенераційний модуль як джерело базового навантаження $P_{\text{біогаз}} = \text{const}$, що особливо важливо взимку та в періоди низької сонячної активності.

Узагальнена структура сезонної взаємодії елементів гібридної енергосистеми подана на рисунку.

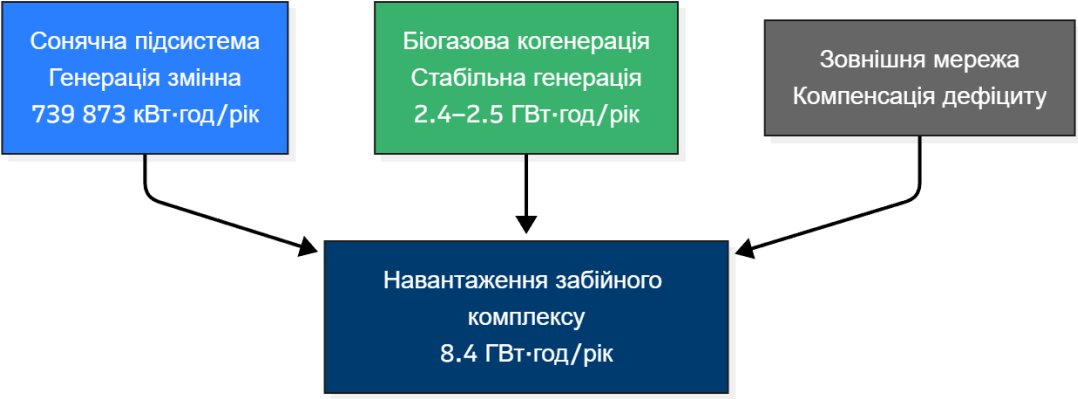


Рисунок 3.8 – Сезонна модель роботи гібридної енергосистеми

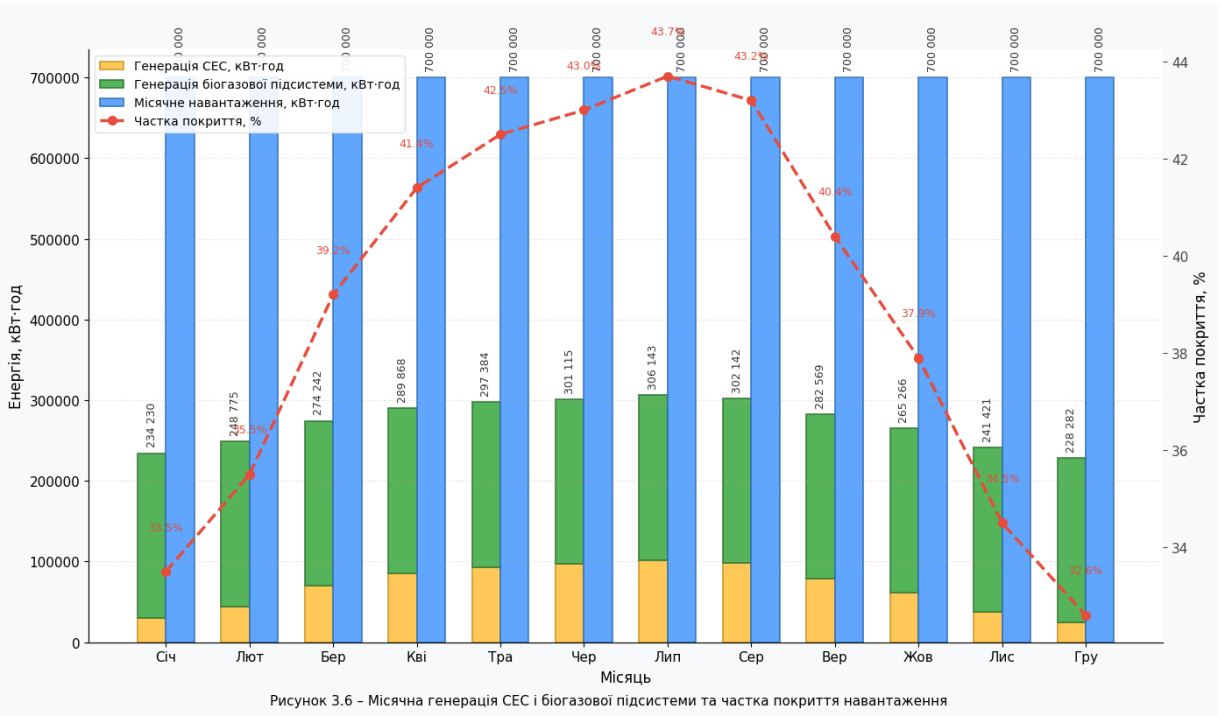


Рисунок 3.9 – Місячна генерація СЕС та частка покриття навантаження

Для зручності аналізу основні режими роботи гібридної енергетичної системи зведено в таблицю 3.6.

Такий підхід дозволяє не лише оцінити річний енергетичний баланс, а й змодельовати поведінку гібридної системи в типових експлуатаційних режимах, що є важливим для подальшої розробки алгоритмів керування та сценарного аналізу енергетичної автономності забійного комплексу.

Таблиця 3.6 – Основні режими роботи гібридної енергетичної системи
забійного комплексу

Режим	Період	Джерела покриття навантаження	Характеристика роботи
Літній денний	Травень–серпень, 8:00–18:00	СЕС + біогаз + мінімальна мережа	Максимальна частка сонячної генерації, значне розвантаження зовнішньої мережі, можливість часткового резервування споживання
Літній нічний	Травень–серпень, 18:00–8:00	Біогаз + мережа	Стабільна робота біогазової установки, мережа компенсує дефіцит для холодильних камер і чергових систем
Зимовий денний	Листопад–січень, 8:00–18:00	Біогаз + мережа + низька генерація СЕС	Сонячна підсистема дає невелику частку покриття, основне навантаження несуть біогаз і мережа
Зимовий нічний	Листопад–січень, 18:00–8:00	Біогаз + мережа	Відсутність сонячної генерації, біогазова установка працює як базове джерело
Аварійний	Відмова мережі, будь-який час	Біогаз + АКБ	Забезпечується живлення лише критичних навантажень у межах доступної потужності когенерації та ємності АКБ

Для узагальненого представлення зв'язків між режимами можна використати спрощену схемну модель.

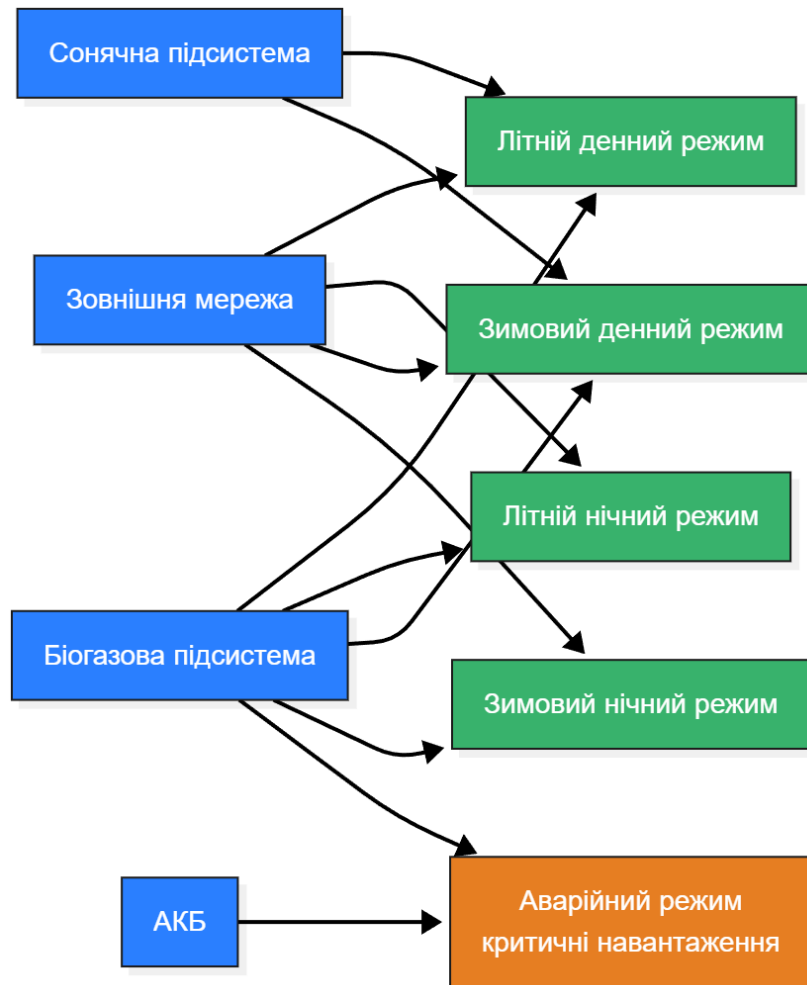


Рисунок 3.10 – Режими роботи гібридної енергосистеми

Узагальнення результатів моделювання гібридної енергетичної системи дає можливість сформулювати цілісне уявлення про фактичний потенціал інтегрованого використання сонячної та біоенергетичної підсистем у структурі енергозабезпечення забійного комплексу. Отримані дані переконливо показують, що навіть за умов відносно невисокої зимової інсоляції сонячна електростанція потужністю 1.32 МВт демонструє стабільний внесок у загальне енергопостачання, тоді як у весняно-літній період її продуктивність суттєво зростає до рівня, достатнього для зниження навантаження на зовнішню мережу в години пікової роботи комплексу. Скориговані значення продуктивності СЕС за місяцями дозволили з високою точністю визначити реальні обсяги річного виробітку, що в сумі становлять 739873 кВт·год.

Основним елементом системи виступає біогазова когенераційна установка, яка забезпечує стабільний і рівномірний нічний та базовий виробіток електроенергії, що становить близько 2.45 ГВт·год на рік. Саме її робота дозволяє компенсувати добову нерівномірність сонячної генерації та підтримувати роботу холодильного обладнання, вентиляційних систем і технологічних ліній за відсутності сонячного випромінювання. Порівняння сезонних коливань навантаження з часом роботи підсистем підтвердило, що біоенергетична складова відіграє роль основи гібридного комплексу, тоді як сонячна відповідає за зменшення споживання з мережі у денні години.

Сумарний внесок обох джерел у покриття річного навантаження забійного комплексу досягає приблизно 38 %, що відповідає понад третині всього електроспоживання підприємства. Найвищі значення покриття спостерігаються в літні місяці, коли загальна генерація наближається до 43% від потреби, тоді як найнижчі – у зимовий період. Варто підкреслити, що ці результати отримані для системи без використання акумуляторного накопичувача, що означає наявність потенціалу для подальшого підвищення автономності через впровадження системи зберігання енергії та оптимізацію роботи обладнання.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує доцільність впровадження гібридної енергетичної системи у запропонованій конфігурації. Вона забезпечує суттєве зниження залежності підприємства від зовнішньої мережі, підвищує стійкість до цінових коливань та аварійних ситуацій, а також створює підґрунтя для подальшої модернізації енергетичної інфраструктури забійного комплексу.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Шкідливі виробничі чинники та їхні джерела

У процесі експлуатації обладнання гібридної енергетичної системи забійного комплексу виникають широкий спектр небезпечних і шкідливих виробничих чинників, дія яких може негативно позначатися на стані здоров'я та працездатності персоналу. Джерелами цих чинників є як технологічне обладнання сонячної та біоенергетичної підсистем, так і силові електромеханічні агрегати забійного комплексу. Вплив чинників оцінюється відповідно до класифікації, наведеної у чинних нормативних документах з охорони праці. До найбільш поширених належать електричні небезпеки, ризики ураження високою температурою, шкідливі гази, шум, вібрація та мікробіологічні чинники, властиві роботі біогазових установок.

Під час функціонування сонячної електростанції та інверторних станцій існує ризик ураження електричним струмом високої напруги постійного та змінного струму. Додатковими джерелами небезпеки є гарячі поверхні інверторів, струмопровідні частини струмоведучих шин, а також акумуляторні системи, у роботі яких може відбуватися виділення вибухонебезпечних газів. У складі біогазової установки виникають чинники, пов'язані з роботою ферментерів, газгольдерів та когенераційної установки, зокрема вибухонебезпечні концентрації метану, підвищена температура обладнання, шум та вібрації двигуна внутрішнього згорання.

У виробничих приміщеннях забійного комплексу діють додаткові чинники, зумовлені роботою транспортерів, насосів, мийних машин і холодильного обладнання. Вони створюють машинну вібрацію, локальні підвищення температури, високий рівень шуму та можливість контакту з гарячою водою або дезінфекційними реагентами. У біоенергетичній частині комплексу поширеними є хімічні чинники, пов'язані з роботою із сировою

органічною сировиною, та мікробіологічні, обумовлені процесами анаеробного зброджування.

Таблиця 4.1 – Перелік шкідливих і небезпечних виробничих чинників та їхні джерела

Небезпечний (шкідливий) виробничий чинник	Джерело виникнення	Характер дії чиннику на організм людини	Нормований параметр та його величина
Висока напруга постійного та змінного струму (до 1500 В DC, 400/690 В AC)	Сонячні стрингові лінії, інвертори, АС-шафа ВРУ	Електротравми, фібриляція серця, опіки, електролітична дія	Пороговий струм відчуття: 0,5–1,5 мА; струм, що не відпускає: 10–15 мА; фібриляційний: 50–80 мА
Вибухонебезпечні газові суміші (метан, H ₂ S)	Біогазовий реактор, газгольдер, трубопроводи біогазу	Асфіксія, токсична дія, небезпека вибуху	ГДК CH ₄ в робочій зоні: < 1 % об.; H ₂ S: 10 мг/м ³
Підвищена температура поверхонь (70–120 °C)	Когенераційна установка, теплообмінники, труби охолодження	Термічні опіки, теплові перевантаження	Оптимальна температура повітря 18–24 °C
Несприятливий мікроклімат (вологість, теплові перепади)	Технологічні приміщення забійного комплексу, мийки, бройлерні лінії	Порушення терморегуляції, тепловий стрес	Вологість 40–70 %, швидкість повітря до 0,5 м/с
Шум (до 85–100 дБА)	Двигуни когенератора, інвертори, насоси, трансформатори, вентиляція	Психофізіологічний дискомфорт, втрати слуху	Граничний рівень шуму: ≤ 80 дБА (НПАОП)
Вібрація загальна та локальна	Когенератор, насоси, вентилятори, транспортери	Втомлюваність, порушення роботи ЦНС, вібраційна хвороба	Граничний рівень віброшвидкості: 92 дБ
Хімічні речовини (аміак, деззасоби, миючі розчини)	Приміщення мийки контейнерів, зона обробки птиці	Подразнення слизових, шкіри, токсична дія	ГДК аміаку: 20 мг/м ³
Мікробіологічні чинники	Ферментер, зона приймання органічної сировини	Ризик інфекцій, алергічні реакції	Вимоги санітарних правил
Механічні чинники (рухомі частини обладнання)	Транспортери, скобари, мийні лінії	Удари, затягування, порізи	Захисні кожухи, аварійні стопи
Підвищена напруга в безтокових частинах	Несправності заземлення, диференціальних пристроїв	Вторинна електротравма	Опір заземлення ≤ 4 Ом

Перелік основних шкідливих і небезпечних виробничих чинників, характерних для гібридної енергосистеми забійного комплексу, подано в таблиці 4.1.

4.2. Створення безпечних умов праці під час електропостачання забійного комплексу

Забезпечення електробезпеки у забійному комплексі є одним з пріоритетних завдань охорони праці, оскільки експлуатація гібридної системи електроживлення, яка включає сонячну електростанцію, біогазову когенераційну установку та зовнішню мережу, супроводжується ризиками ураження електричним струмом, виникненням коротких замикань, перенапруг та теплових ушкоджень обладнання. Особливістю такого виробництва є одночасна робота кількох джерел енергії, що накладає підвищені вимоги до системи захисту, заземлення, організації допустимих режимів роботи електроустановок та контролю параметрів мережі.

Безпечні умови праці формуються шляхом впровадження комплексу технічних та організаційних заходів, які включають правильне конструювання схеми електропостачання, застосування автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення, системи блискавкозахисту, а також регулярний моніторинг параметрів мережі та стану обладнання. Значну роль відіграють засоби технічного діагностування, що дозволяють фіксувати аварійні режими в реальному часі. Усі елементи електричної системи, зокрема інверторні станції, трансформатори, кабельні лінії, ВРУ та розподільчі щити, повинні відповідати вимогам ПУЕ та національних стандартів щодо захисту людей від небезпечних напруг дотику та кроку.

У зоні забою та первинної переробки птиці створюються додаткові небезпечні умови через підвищену вологість, наявність струмопровідних рідин,

металевих поверхонь та можливість випадкового контакту з рухомими частинами обладнання.

Таблиця 4.2 – Основні заходи із забезпечення електробезпеки забійного комплексу

Напрямок	Заходи	Нормативні вимоги
Захист від ураження електричним струмом	Встановлення автоматичних вимикачів, ПЗВ, контроль ізоляції, маркування струмоведучих частин	ПУЕ, ДСТУ EN 61140
Заземлення і зрівнювання потенціалів	Контур заземлення не більше 4 Ом, об'єднання заземлювачів СЕС, когенератора і ВРУ	ПУЕ, ДБН В.2.5-27:2006
Електробезпека у вологих зонах	Використання напруги 12–42 В, ступінь захисту IP54–IP65, діелектричні килими	НПАОП 40.1-1.21-98
Захист кабельних ліній і щитового обладнання	Автоматичні вимикачі, реле контролю фаз, УЗІП, контроль температури	ДСТУ ІЕС 60364
Захист персоналу	Інструктаж, допуск до робіт, засоби індивідуального захисту, знаки безпеки	НПАОП 0.00-4.12-05
Пожежна і вибухобезпека	Використання Ех-обладнання в зоні біогазу, газоаналізатори, електропроводка в металевих трубах	ДСТУ EN 60079
Блискавкозахист	Зовнішній і внутрішній блискавкозахист, УЗІП I–II рівнів	ДСТУ EN 62305

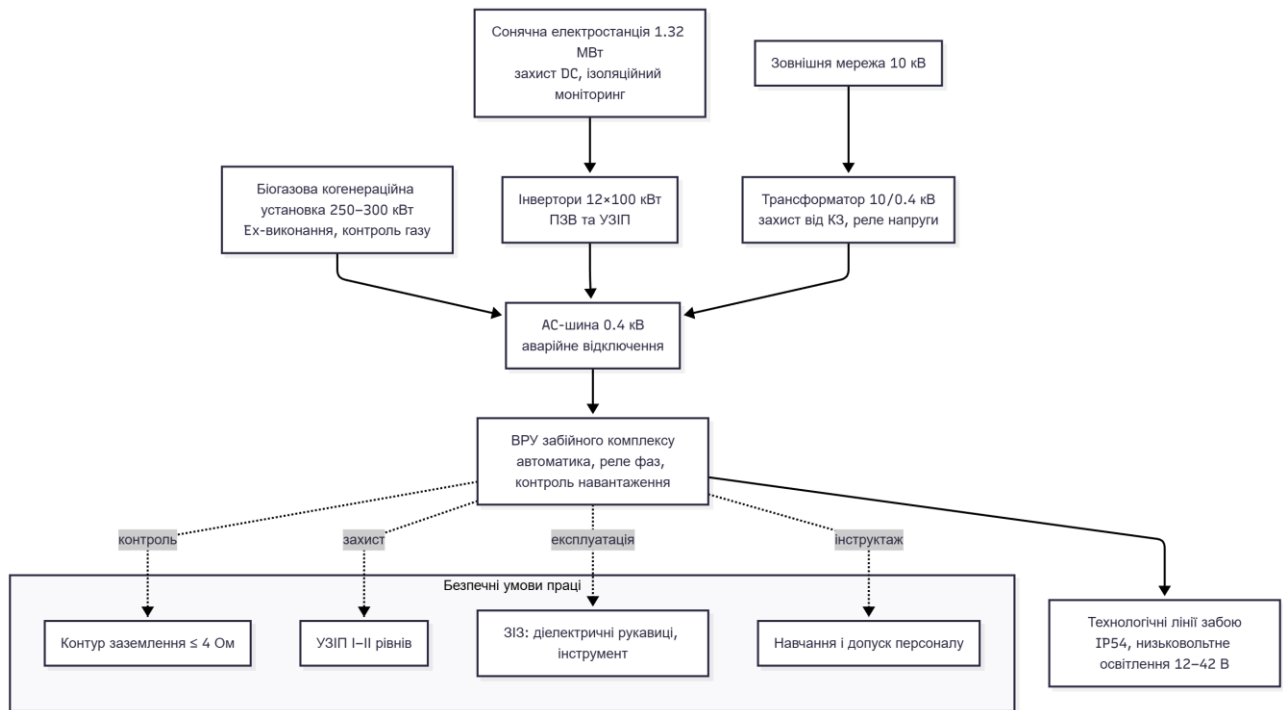


Рисунок 4.1 – Узагальнена схема системи електробезпеки забійного комплексу

Усі електроприймачі цих приміщень повинні мати ступінь захисту не нижче IP54, а щитові – IP65. Допускається використання напруги 12–42 В для переносного інструменту та освітлення у вологих зонах. Обов’язковим є оснащення робочих місць діелектричними килимами, а переносного обладнання – захисною ізоляцією.

Для сонячної електростанції чинники небезпеки пов’язані з великою кількістю постійного струму високої напруги. Забезпечення безпечних умов включає встановлення автоматичних роз’єднувачів, ізоляторів постійного струму, захисту від зворотного струму та відшкодування перенапруг. Біогазова когенераційна установка створює додаткові електротехнічні та теплові небезпеки, а також пов’язані з горючими газами ризики, тому елементи електропостачання повинні бути виконані у вибухобезпечному виконанні у межах газових зон.

Нижче наведено узагальнений перелік технічних і організаційних заходів зі створення безпечних умов праці під час експлуатації електроустановок забійного комплексу.

4.3. Заходи пожежної безпеки

Пожежна небезпека на території забійного комплексу зростає у зв'язку з використанням високовольтних електроустановок, паливно-енергетичних систем та значної кількості легкозаймистих матеріалів у технологічному процесі. Особливої уваги потребують об'єкти гібридної енергетичної системи, до складу якої входить сонячна електростанція, біогазова когенераційна установка, трансформаторна підстанція та внутрішні розподільні мережі. Джерелами пожежної небезпеки у таких установках можуть бути короткі замикання, перенавантаження кабельних ліній, перегрів інверторів та силових електромеханічних агрегатів, займання біогазу, а також неконтрольовані витоки метану з ферментерів та газгольдерів.

У таблиці 4.3 наведено основні заходи з пожежної безпеки для гібридної енергетичної системи та виробничих приміщень забійного комплексу.

Таблиця 4.3 – Основні заходи забезпечення пожежної безпеки

Об'єкт	Заходи пожежної безпеки	Нормативні вимоги
Сонячна електростанція	ДС-роз'єднувачі, ізольовані стрінги, УЗІП, негорючі кабельні лотки, дистанційне аварійне вимкнення	ДСТУ ІЕС 60364, ПУЕ
Інверторні станції	Контроль температури, автоматичне вимкнення при перегріві, вогнестійкі щити	ДСТУ EN 60947
Біогазова установка	Ех-обладнання, датчики CH_4 та H_2S , аварійне перекриття газу, вентиляція	ДСТУ EN 60079
Когенераційний модуль	Автоматичне пожежогасіння в моторному відсіку, теплоізоляція	ДБН В.1.1–7
Розподільні щити та ВРУ	ПЗВ, автоматичні вимикачі, пожежні датчики, негорюча ізоляція	ПУЕ
Виробничі приміщення комплексу	Порошкові, CO_2 -вогнєгасники, пожежні крани, система оповіщення	ДБН В.2.5–56
Кабельні лінії	Вогнестійкі кабелі, металеві лотки, термоконтроль	ДСТУ EN 50575

У зоні біогазової установки існує підвищений ризик утворення вибухонебезпечних газових сумішей, тому приміщення, де розташовані газопроводи, компресори та когенераційний двигун, повинні бути обладнані вибухозахисними електротехнічними пристроями відповідно до вимог ДСТУ EN 60079. Важливе значення має встановлення системи автоматичного газового контролю з датчиками метану, сірководню та чадного газу, що повинні забезпечувати аварійне відключення подачі палива та сигналізацію у разі перевищення гранично допустимих концентрацій. Технічне обслуговування когенераційного блоку, зокрема очищення поверхонь теплообмінників, огляд паливних шлангів та запірної арматури, виконується у регламентні терміни, що суттєво зменшує ризик теплових та пожежних аварій.

Сонячна електростанція також має низку специфічних пожежних ризиків. До них належать підвищена температура кабельних трас у літній період, можливість пробоя ізоляції на стрінгах високої напруги постійного струму, займання через дуговий розряд або корозію контактних з'єднань. Автоматичні DC-роз'єднувачі, запобіжники постійного струму, наявність ізоляційних моніторів та система відключення на випадок пожежі є основними елементами, що забезпечують безпечну експлуатацію СЕС.

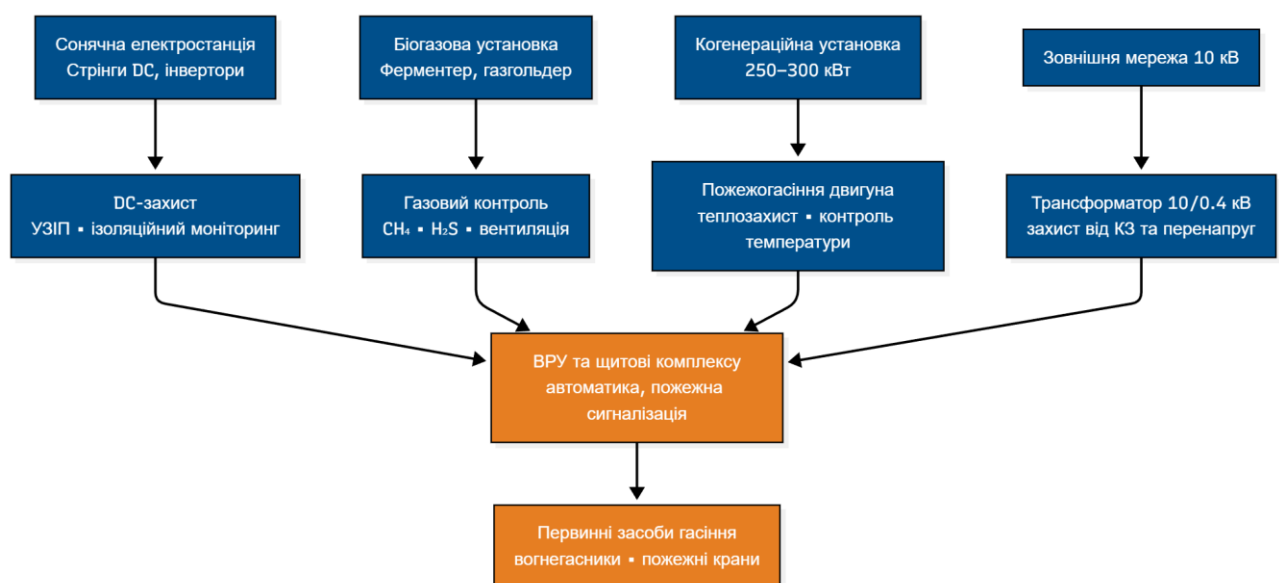


Рисунок 4.2 – Узагальнена схема пожежної безпеки гібридної енергосистеми

Також передбачається встановлення горизонтальних кабельних трас у металевих лотках з негорючим покриттям та регулярний термографічний контроль температури інверторів.

Пожежна безпека на виробничих ділянках забійного комплексу забезпечується за допомогою автоматичної сигналізації, системи оповіщення та наявності первинних засобів пожежогасіння – порошкових і вуглекислотних вогнегасників. Приміщення з підвищеною вологістю та тепловими навантаженнями, такі як мийки та машинні відділення, обладнуються пожежними кранами, а шляхи евакуації утримуються у вільному стані. Захист електричних мереж від перенавантаження забезпечується застосуванням автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення, що значно знижує імовірність займання електропроводки.

4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Забійний комплекс фермерського господарства належить до категорії виробничих об'єктів з підвищеною небезпекою, що потребують спеціально розробленої системи реагування на надзвичайні ситуації. Загрози можуть виникати як у виробничих приміщеннях, так і на об'єктах гібридної енергетичної системи. До потенційних надзвичайних ситуацій належать аварії електрообладнання, пожежі в технологічних цехах, витoki біогазу, порушення герметичності газгольдерів, зупинка когенераційного двигуна під навантаженням, ураження працівників електричним струмом, вихід з ладу інверторних модулів СЕС, руйнування кабельних мереж під час стихійних явищ, а також аварійні ситуації у зовнішній мережі електропостачання.

У разі аварійної зупинки технологічного обладнання першочерговим завданням є забезпечення безпечного відключення електроживлення, що здійснюється через систему аварійних вимикачів, розташованих у зонах швидкого доступу. Аварійні кнопки повинні відключати як внутрішні

споживачі, так і інверторні станції сонячної електростанції. Особливим чином регламентовано дії персоналу у разі зупинки когенераційної установки: запуск аварійної вентиляції, блокування подачі біогазу, контроль температури двигуна та недопущення утворення вибухонебезпечної газової суміші.

Під час надзвичайних ситуацій, що пов'язані з витіканням біогазу, автоматична система газового контролю повинна забезпечити негайне вимкнення компресорів, перекриття газових клапанів, запуск аварійних вентиляторів та передавання сигналу на диспетчерський пункт. Персонал переходить до виконання інструкції локалізації газонебезпечної ситуації, що включає відведення працівників з небезпечної зони, контроль напрямку повітряних потоків та повідомлення відповідальних осіб.

В умовах пожежі ключовим елементом безпеки є забезпечення чіткої евакуації персоналу, що здійснюється через заздалегідь визначені та вільні шляхи евакуації. Знеструмлення об'єкта проводиться поетапно, починаючи з внутрішніх споживачів, далі відключаються SAD-шини інверторних станцій, а вже після цього, за необхідності, припиняється подача електроенергії із зовнішньої мережі. У разі аварії на трансформаторній підстанції застосовуються заходи дистанційного відключення високовольтного вводу.

Для ефективного управління надзвичайними ситуаціями у комплексі функціонує система навчання персоналу, що включає планові тренування та моделювання аварійних сценаріїв. Особливу увагу приділено діям у разі відмови енергосистеми, коли встановлені алгоритми переходу на резервне живлення дозволяють уникнути зупинки холодильного обладнання, забезпечити роботу вентиляційних систем та підтримати мінімальний рівень технологічної безперервності.

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЗАБІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Економічне оцінювання результатів упровадження гібридної енергетичної системи базується на визначенні загального обсягу річної економії коштів, порівнянні витрат на встановлення обладнання з отриманим ефектом та розрахунку основних показників ефективності. До складу системи входять сонячна електростанція потужністю 1.32 МВт та біогазова когенераційна установка електричною потужністю 250...300 кВт, які сумарно забезпечують близько 38 % річного споживання електроенергії забійного комплексу.

Оцінювання ефективності здійснюється за показниками економії витрат на купівлю електроенергії, окупності інвестицій та чистого приведенного доходу. Загальна річна економія розраховується за формулою:

$$E_{\text{екон}} = (E_{\text{CEC}} + E_{\text{біогаз}}) \cdot T_{\text{мер}}, \quad (5.1)$$

де E_{CEC} – річний виробіток сонячної підсистеми, кВт·год; $E_{\text{біогаз}}$ – річний виробіток біогазової установки, кВт·год; $T_{\text{мер}}$ – тариф на електроенергію з мережі, грн/кВт·год.

Для оцінки інвестиційної ефективності використовується формула терміну окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{C_{\text{інв}}}{E_{\text{екон}}}, \quad (5.2)$$

де $C_{\text{інв}}$ – загальна вартість впровадження гібридної енергетичної системи.

Більш точний підхід передбачає врахування дисконтування грошових потоків:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_{\text{інв}}, \quad (5.3)$$

де CF_t – річний грошовий потік у t -му році, грн; r – ставка дисконту; n – термін аналізу, років.

Таблиця 5.1 – Основні економічні показники гібридної енергетичної системи

Показник	Одиниця виміру	Значення
Річний виробіток СЕС	кВт·год	739873
Річний виробіток біогазової установки	кВт·год	2450000
Сумарний виробіток	кВт·год	3189873
Частка покриття потреб комплексу	%	38
Тариф на електроенергію	грн/кВт·год	6.0
Річна економія	грн	19139238
Інвестиції в СЕС	грн	31000000
Інвестиції в біогазову установку	грн	68000000
Загальні інвестиції	грн	99000000
Термін окупності	років	5.17

Річне споживання електроенергії забійним комплексом становить приблизно 8.4 ГВт·год. За результатами моделювання встановлено, що сонячна підсистема генерує 739 873 кВт·год/рік, а біоенергетична – близько 2450000 кВт·год/рік. Сумарний виробіток становить 3189873 кВт·год/рік. Для розрахунків приймається середній тариф на електроенергію $T_{\text{мер}} = 6.0 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$ (із перспективою зростання), а вартість впровадження включає капітальні витрати на сонячну станцію, біогазовий комплекс та супутню інфраструктуру.

Підставляючи дані у формулу (5.1), отримуємо:

$$E_{\text{екон}} = 3189873 \cdot 6.0 = 19139238 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Отже, завдяки роботі гібридної системи підприємство щороку економить понад 19 млн.грн на закупівлі електроенергії.

Виконаємо розрахунок терміну окупності системи. Сумарні інвестиції: *СЕС 1.32 MWt* – 31000000 *грн*; *Біогазовий комплекс* – 68 000 000 *грн*. Разом – $C_{інв} = 99000000$ *грн*. Тоді, термін окупності становить:

$$T_{окуп} = \frac{99000000}{19139238} \approx 5.17 \text{ років.}$$

Результати розрахунків подано у зведеній таблиці 5.1 економічних результатів.

Результати розрахунків демонструють, що впровадження гібридної енергетичної системи забезпечує суттєве зниження витрат на електроенергію, оскільки частка власного виробітку перевищує третину загального річного споживання. Найбільший економічний ефект формується за рахунок стабільного виробництва електроенергії біогазовою когенераційною установкою, яка генерує у декілька разів більше енергії, ніж сонячна складова, і працює в нічний час. Сонячна підсистема дає змогу зменшити пікове денне навантаження на мережу та забезпечує відчутну сезонну економію.

Термін окупності, що становить близько 5.2 років, є прийнятним показником для енергетичних проєктів такого масштабу, враховуючи їхню експлуатаційну тривалість понад 20 років. Економічний ефект може бути ще більшим у разі зростання тарифів на електроенергію, що робить запропоновану систему стратегічно вигідною для забезпечення енергетичної автономності забійного комплексу.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Після початку повномасштабної агресії проти України потреба у децентралізації енергопостачання та підвищенні енергетичної стійкості сільських територій істотно зростає. Пошкодження мереж і ризик тривалих відключень змушують фермерські господарства переходити до автономних джерел енергії. Обґрунтований вибір параметрів обладнання відновлюваних джерел та супутніх систем, що дає змогу забезпечити безперебійну роботу критично важливих об'єктів фермерського господарства.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі свідчать про швидке впровадження технологій, які не лише забезпечують фермерські господарства стабільною електроенергією, але й підвищують ефективність та стійкість виробництва. Комбінація фотоелектричних установок та біоенергетичних систем дає змогу фермерам зменшувати залежність від зовнішніх мереж. Представлена схема агрофотовольтаїки та узагальнені технології підкреслюють потенціал інтеграції відновлюваних джерел енергії у сільське господарство.

Аналіз глобальних і регіональних тенденцій свідчить про стале зростання потужностей відновлюваної енергетики, передусім сонячної та вітрової. Прискорення приросту у 2010–2023 рр. зумовлене технічним прогресом і здешевленням обладнання. Для аграрного сектору це означає більше можливостей інтегрувати ефективні ВДЕ-рішення та підвищувати енергетичну стійкість господарств.

Наведені схеми і порівняльні характеристики демонструють, що кожна технологія має власні переваги та сферу ефективного застосування залежно від ресурсного потенціалу господарства. Інтеграція цих систем дозволяє оптимізувати енергозабезпечення аграрного виробництва та зменшити залежність від нестабільного зовнішнього енергопостачання.

Виконаний аналіз об'єкта дослідження свідчить, що фермерське господарство «УЛАР» має розгалужену виробничу структуру та значну

кількість енергоємних технологічних процесів, особливо у птахобійному комплексі. Для вибору обладнання гібридної енергетичної системи оцінювалися природні ресурси, доступні на території господарства. Район має сприятливий сонячний потенціал, що становить у середньому 1100...1250 кВт·год/м² на рік, що дозволяє ефективно використовувати сонячні електростанції.

Птахобійний комплекс фермерського господарства, який розглядається у цьому дослідженні, є спеціалізованим виробничим об'єктом із продуктивністю до 6000 голів/год. Загальна компоновка комплексу охоплює зону приймання живої птиці, технологічний корпус забою та обробки, відділення для охолодження й доробки тушок, камери тощо. На рисунку 2.2 наведено спрощену схему електроживлення об'єкта, отриману зі щита живлення забійного цеху. Вона демонструє наявність кількох трансформаторних підстанцій (ТПп-1 та ТПп-3) та ліній АС70/11 із різною довжиною, що забезпечують живлення технологічного обладнання.

Зведений перелік обладнання містить понад 100 найменувань, які для енергетичної оцінки було згруповано за технологічними блоками (таблиця 2.2). Такий підхід дає змогу визначити вимоги до розподілу електроенергії та підібрати раціональну конфігурацію відновлюваних джерел. Особливо енергоємними є холодильні системи, що працюють цілодобово й формують постійне нічне навантаження, яке не співпадає із сонячною генерацією та потребує резервування й акумуляції.

Для забійного комплексу продуктивністю 6000 шт/год сукупне робоче навантаження у період активної роботи лінії становить близько $P_{\text{денне}} \approx 1,8...2,5 \text{ MВт}$. У таблиці 2.3 наведено групування основних споживачів електроенергії забійного комплексу разом із типовими інтервалами потужності, характером роботи та впливом на добовий графік навантаження.

Баланс навантаження логічно відтворюється у вигляді добової діаграми (рисунок 2.3), де видно суттєве зростання споживання із початком роботи технологічної лінії та відносно плавне зниження після її завершення. Особливу

роль відіграє структура споживання: оскільки близько 30...40 % енергетичного навантаження припадає на холодильні установки, які працюють у режимі 24/7.

На рисунку 2.2 наведено технічні характеристики пропонованого проєкту СЕС, який пропонується використати як прототип для добору параметрів генерації та інверторного обладнання. Станція потужністю 1,320 МВт, побудована на основі модулів Trina Solar потужністю 575 Вт та комплекту з дванадцяти інверторів по 100 кВт, забезпечує річний виробіток близько 739873 кВт·год, що підтверджено моделлю PVGIS.

Враховуючи орієнтовне річне споживання забійного комплексу на рівні 8,0...8,5 ГВт·год, внесок сонячної станції становить приблизно 8...10 % річного енергоспоживання. У пікові денні години, за сприятливих умов освітленості, СЕС може частково компенсувати до 20–25 % миттєвого навантаження, проте середньорічне покриття не перевищує десятої частини загального обсягу.

Також пропонується встановлення біогазової установки для переробки органічних відходів від діяльності забійного комплексу. Біогазова установка передбачає переробку відходів забою та первинної обробки птиці, добовий обсяг яких становить близько 25...26 тон. Така кількість органічної маси забезпечує отримання приблизно 2,6...2,9 тис. м³ біогазу на добу, що дозволяє стабільно жити когенераційну установку електричною потужністю 250...300 кВт. У такому режимі добове виробництво електроенергії становить близько 7,4 тис. кВт·год, а річне – близько 2,4...2,5 ГВт·год.

Добовий графік навантаження показав наявність чітко виражених денних піків, що співпадають із роботою технологічної лінії. Нічне навантаження залишається на рівні 0,45...0,65 МВт і формується переважно холодильними установками та вентиляційним обладнанням. На рисунку 2.6 наведено узагальнену гістограму добового електроспоживання.

Сонячна підсистема забезпечує найбільшу генерацію у світлу пору доби та дозволяє покрити частину технологічного навантаження без залучення зовнішньої мережі. З огляду на доступну площу дахових і наземних майданчиків, а також враховуючи технічний паспорт наявної СЕС (станція 1,32

МВт на базі 2296 модулів Trina Solar потужністю 575 Вт), вона може забезпечувати близько $E_{CEC} = 7,4 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$. У свою чергу біогазова установка здатна виробляти електричну та теплову енергію упродовж доби, перетворюючи органічні відходи, яких на підприємстві утворюється в середньому 25...26 т/добу. За результатами попередніх оцінок добовий вихід біогазу становить $V_{\text{біогаз}} = 2,6 - 2,9 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{добу}$, що достатньо для забезпечення когенераційного модуля електричною потужністю $P_e = 250...300 \text{ кВт}$ та тепловою $P_t = 380...450 \text{ кВт}$.

Для визначення очікуваної річної генерації сонячної електростанції фермерського господарства було проведено моделювання у програмному середовищі PVGIS 5.3 (European Commission. Географічні координати, що відповідають фактичному розташуванню забійного комплексу у с. Київець Стрийського району Львівської області. Отримані результати підтверджують, що при встановленій потужності 1.32 МВт сонячна підсистема забійного комплексу може забезпечити до 15...20 % річного електроспоживання підприємства, яке становить $\approx 8.4 \text{ ГВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$. Продуктивність є стабільною впродовж теплого періоду року, що дозволяє зменшити пікові навантаження на зовнішню мережу в денні години, коли робота комплексу є найбільш інтенсивною.

Визначені параметри обладнання сонячної та біоенергетичної підсистем дають змогу сформувати збалансовану енергетичну інфраструктуру, яка враховує реальний профіль споживання та ресурсний потенціал господарства.

Аналіз сезонних режимів роботи гібридної енергетичної системи показує, що поєднання сонячної та біоенергетичної підсистем забезпечує стабільне енергозабезпечення господарства протягом року. У літні місяці основне навантаження покривається за рахунок високої продуктивності СЕС, тоді як взимку ключову роль відіграє безперервна генерація біогазової установки.

Забезпечення належних умов охорони праці та готовності до дій у надзвичайних ситуаціях є основною передумовою безпечної роботи енергетичного та технологічного обладнання фермерського господарства.

Отримані результати свідчать, що гібридна енергетична система забезпечує покриття 38 % річних потреб забійного комплексу та економію у розмірі 19,14 млн. грн. щороку. За умов загальних інвестицій 99 млн. грн. очікуваний термін окупності становить $\approx 5,2$ року, що підтверджує економічну доцільність впровадження гібридної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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.
3. Гальчак В.П., Боярчук В.М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця: Навчальний посібник. - Львів, 2008. - 135с.
4. Відновлювані джерела енергії : монографія / за ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 392 с.
5. Данилишин В., Кузнєцова Л. Аналіз виробництва біогазу та перспективи розвитку біогазових технологій в Україні. Біоресурси і природокористування. 2023. Т. 27, № 3. С. 45–53.
6. Лехман Ф.Д., Рубльов В.І. Запобігання аварійності і травматизму в сільському господарстві. К.: Урожай, 1993. 272с.
7. Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 12.10.2025 р.).
8. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://ur0.jp/7wLyJ>
9. Садовий О., Ковальчук І. Економічна ефективність впровадження сонячних панелей в зрошуваному землеробстві: оцінка витрат та доцільність інвестицій. Економіка та держава. 2025. Т. 12, № 2. С. 98–107.
10. 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 (2021)

11. 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.
12. Фотогальтаїчна географічна інформаційна система. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
13. Alhijazi A. A. K., Alshammari F., Ahmed M. Evaluating a solar–biogas hybrid renewable power plant under disrupted energy infrastructure conditions. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 24. Article 12027.
14. Alsufyani A., Al-Ghamdi S., Alqahtani A. et al. A comprehensive review of sustainable energy and solar photovoltaic systems in Yemen. Preprints. 2025. № 2025102110.
15. Around 90% of renewables cheaper than fossil fuels worldwide, IRENA says. Reuters. 22.07.2025. URL: <https://www.reuters.com> (дата звернення: 17.11.2025).
16. Design innovations and performance assessment of small wind turbines: a review for decentralized and off-grid applications. 2025. URL: <https://hal.science/hal-05145439v1/document> (дата звернення: 01.11.2025).
17. Ecological and economic assessment of the effectiveness of biogas energy in Ukraine. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No. 1. P. 45–54.
18. Elzahy I. A., El-Sayed E., El-Demerdash S. Optimization of an off-grid PV/biogas hybrid energy system for rural applications. Engineering Research Journal. 2022. Vol. 45, No. 3. P. 115–128.
19. Ferents V. Efficiency of Agro-Photovoltaics Use. Vidnovluvana Energetika. 2023. No. 4(75). P. 55–63. DOI: 10.36296/1819-8058.2023.4(75).55-63.
20. Ghosh A. Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics): A comprehensive review. Solar Energy. 2023. Vol. 256. P. 236–260.

21. Havrysh V., Velychko O., Bilan Y., Havrysh T. Crop Production or Photovoltaic Power Plants: Land Use Options from the Perspective of Sustainable Development. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 9. Article 5099. DOI: 10.3390/su14095099.
22. Honcharuk I., Djakiv A., Djakiv Yu. Economic aspects of using the potential of bioenergy crops and agricultural waste for biogas production. *Economics, Finance and Management Review*. 2024. Vol. 4. P. 53–62.
23. Jurasz J., Zdonek D., Mikulik J. Energy potential and economic viability of small-scale wind turbines in Central Europe. *Energy*. 2025. Vol. 308. Article 129875.
24. Medvedieva O., Halchenko Z., Demchenko O. Current State of Renewable Energy Development in Ukraine and Possible Solutions. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2025. Vol. 4, No. 1. P. 145–151. DOI: 10.15421/cims.4.298.
25. Mehta K., Sahu A., Singh S. Optimizing Agri-PV system: systematic methodology to improve land-use and energy yield. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 14. Article 3877.
26. Pandey G., Singh R., Kumar S. et al. A systematic review of agrivoltaics: productivity, profitability and land-use efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 188. Article 114029.
27. Paris B., Wernet G., Binder C. et al. Energy use in European open-field agriculture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 156. Art. 111986.
28. Patil A. A., Kulkarni P. A., Patil P. Techno-economic analysis of solar, wind and biomass based hybrid systems for rural electrification. *New Energy Progress*. 2023. Vol. 3, No. 2. P. 25–38.
29. Pecheniuk A. V., Harasymchuk I. D., Pantsyr Y. I. Prospects and Challenges of Renewable Energy Development in Ukraine under Martial Law Conditions. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics*. 2024. No. 45. P. 66–72.

30. Pestisha A., Gabnai Z., Lengyel P. On-Farm Renewable Energy Systems: A Systematic Review. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 2. Art. 862.
31. Pilarski K., Dach J., Pilarska A. et al. Biogas production in agriculture: technological and environmental aspects. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 21. Article 5844.
32. Prokopov D., Bialkovska O. Current Status and Prospects for the Development of Alternative Energy for Ukraine. *Universum*. 2023. No. 2. P. 25–32.
33. REN21. Renewables in Agriculture. Global Status Report 2024 – Energy Demand Module. Paris : REN21 Secretariat, 2024. 32 p.
34. Renewable capacity statistics 2023. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. 84 p.
35. Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2023. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. 84 p.
36. Renewable power generation costs in 2023. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. 140 p.
37. Ryś-Jurek R. On-Farm Production of Renewable Energy in 2014–2022. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 21. Art. 5395.
38. Ryś-Jurek R. On-Farm Production of Renewable Energy in 2014–2022. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 21. Article 5395. DOI: 10.3390/en17215395.
39. Sollazzo L., De Santoli L., D'Ambrosio D. A Comprehensive Review of Agrivoltaics. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 5. Art. 2206.
40. Stehly T., Duffy P., Maness M. 2021 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2022. 132 p. NREL/TP-5000-84774.
41. Trypolska G. Economic Feasibility of Agricultural Biogas Production by Small Farms in Ukraine. *Energies*. 2021. Vol. 15, No. 1. Art. 87.
42. Ukoima K. N., Idoniboyeobu D. C., Adumene S. et al. Design and performance analysis of a solar photovoltaic electricity generation system for a rural community in Rivers State, Nigeria. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 664.
43. Zainali S., Fernandez E. Modelling, Simulation, and Optimisation of Agrivoltaic Systems: A Comprehensive Review. 2025. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).