

**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 системи комбінованого
електропостачання фермерського господарства з використанням
відновлюваних джерел енергії»**

Виконав: студент групи Ен-62

Спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Кечур Дмитро Андрійович

(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

Кечуру Дмитру Андрійовичу

1. Тема роботи: «Обґрунтування системи комбінованого електропостачання фермерського господарства з використанням відновлюваних джерел енергії»

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: добові та сезонні графіки електроспоживання ФГ «ОЛКО»; методика визначення оптимальної конфігурації комбінованої енергетичної системи.

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

Вступ.

1. Аналіз стану використання систем комбінованого електропостачання та доцільність їх використання у фермерських господарствах.

2. Аналіз системи електропостачання фермерського господарства та оцінювання потенціалу для використання відновлюваних джерел енергії.

3. Результати обґрунтування параметрів системи комбінованого електропостачання фермерського господарства з використанням відновлюваних джерел енергії.

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 використання систем комбінованого електропостачання та доцільність їх використання у ФГ; аналіз системи електропостачання ФГ та оцінювання потенціалу для використання відновлюваних джерел енергії; результати обґрунтування параметрів системи комбінованого електропостачання ФГ з використанням відновлюваних джерел енергії; 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 _____ Кечур Д. А.
(підпис)

Керівник роботи _____ Боярчук В.М.
(підпис)

УДК 620.92:631.147

Обґрунтування системи комбінованого електропостачання фермерського господарства з використанням відновлюваних джерел енергії.

Кечур Д. А. Кафедра енергетики – Дубляни, ЛНУВМ, 2025.

Кваліфікаційна робота: 74 с. текст. част., 17 рис., 9 табл., 14 арк. ілюстраційного матеріалу, 33 джерела.

У роботі наведено обґрунтування параметрів системи комбінованого електропостачання фермерського господарства «ОЛКО» на основі використання сонячної, вітрової та біоенергетичної генерації у поєднанні з системами накопичення енергії. Проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку відновлюваної енергетики, характеристик споживання електроенергії господарством та потенціалу місцевих відновлюваних джерел. Розроблено конфігурацію гібридної енергетичної системи, виконано розрахунок параметрів сонячної електростанції та біогазового модуля, а також оцінено можливості їх інтеграції в існуючу інфраструктуру. Встановлено, що комбінована система потужністю 30 кВт СЕС, 12 кВт біогазової установки та системи накопичення 75 кВт·год може забезпечити до 80 % річного електроспоживання господарства та знизити залежність від зовнішньої мережі. Розраховано економічну ефективність впровадження та визначено заходи з охорони праці й безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: комбінована енергетична система; відновлювані джерела енергії; сонячна електростанція; біогазова установка; система накопичення енергії; енергетична автономність; фермерське господарство; гібридна генерація; економічна ефективність; електропостачання.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ	
КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЇХ	
ВИКОРИСТАННЯ У ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ.....	9
1.1. Сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики	9
1.2. Перспективи застосування комбінованих систем електропостачання.....	13
1.3. Аналіз схем гібридних енергетичних систем	16
1.4. Доцільність впровадження комбінованих енергетичних систем у	
фермерських господарствах	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	
ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ОЦІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ	
ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....	24
2.1. Загальна характеристика фермерського господарства та наявна система	
електропостачання	24
2.2. Аналіз добових і сезонних графіків електроспоживання.....	29
2.3. Оцінювання потенціалу відновлюваних джерел енергії території	
господарства.....	33
2.4. Визначення можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії в	
існуючу інфраструктуру	39
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ	
КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО	
ГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ЕНЕРГІЇ	43
3.1. Однолінійна схема комбінованого електропостачання господарства.....	43
3.2. Вибір конфігурації комбінованої енергетичної системи електропостачання	
господарства.....	44
3.3. Розрахунок параметрів сонячної електростанції.....	50

3.4. Структурна схема підключення СЕС до системи електропостачання фермерського господарства.....	52
3.5. Розрахунок параметрів додаткових джерел енергії.....	56
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	63
4.1. Аналіз шкідливих чинників та їх джерела.....	63
4.2. Створення безпечних умов праці під час електропостачання фермерського господарства	65
4.3. Розрахунок заземлення	68
4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	71
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	72
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Розвиток аграрного сектору України супроводжується зростанням навантаження на енергетичні ресурси, що зумовлено впровадженням інтенсивних технологій виробництва, механізацією та необхідністю забезпечення сталості технологічних процесів у фермерських господарствах. У цих умовах особливої актуальності набуває питання формування надійного та економічно обґрунтованого електропостачання, яке здатне гарантувати стабільну роботу виробничих систем, навіть за умов зростаючих ризиків нестабільності мережі. З огляду на тенденції глобального енергетичного переходу та зростання ролі відновлюваних джерел енергії, комбіновані системи електропостачання на основі фотоелектричних модулів, вітроенергетичних установок та акумуляторних систем набувають практичного значення для малих та середніх фермерських господарств **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Український аграрний сектор активно інтегрується у світовий простір сталого розвитку, що передбачає зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та нарощування частки ВДЕ у структурі енергоспоживання. Згідно з аналітичними дослідженнями Міжнародного енергетичного агентства, використання комбінованих систем на основі сонячної та вітрової енергії дозволяє знизити витрати на виробництво електроенергії та підвищити енергетичну автономність малих господарств до 60–80 % залежно від кліматичних умов регіону [23]. Універсальність таких систем полягає у можливості адаптації до різних профілів навантаження та сезонних коливань виробітку енергії, що є важливим для українських фермерських господарств з високою нерівномірністю енергоспоживання.

Дослідження, виконані у провідних університетах ЄС та США, свідчать, що ефективність гібридних систем електропостачання значною мірою залежить від точності моделювання енергетичних потоків, вибору оптимальної конфігурації та відповідності технічних рішень реальним умовам експлуатації

[1]. Комбінування різних типів генерації створює можливість забезпечення безперервності живлення навіть у ситуаціях часткової або повної недоступності зовнішньої електромережі, що є особливо важливим для фермерських об'єктів, розташованих у географічно віддалених районах. Крім того, міжнародна практика підтверджує, що системи з використанням акумуляторних накопичувачів можуть забезпечувати суттєве вирівнювання добових коливань навантаження та зменшення пікових витрат електроенергії [27].

Важливість теми також обумовлена економічними факторами. Підвищення вартості електроенергії, нестабільність тарифів, а також ризики аварій у мережевій інфраструктурі стимулюють фермерські господарства шукати альтернативні стратегії енергозабезпечення. Водночас поширення сучасних технологій фотоелектричних модулів, зниження їхньої вартості та зростання ефективності перетворення сонячної енергії створюють сприятливі умови для впровадження комбінованих енергетичних систем. Дослідження останніх років підтверджують, що оптимально спроектована гібридна система може скоротити сумарні експлуатаційні витрати на 20...35 % порівняно з традиційними схемами електропостачання [31].

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів, структури та принципів функціонування комбінованої системи електропостачання фермерського господарства «ОЛКО» із використанням відновлюваних джерел енергії, спрямованої на підвищення енергетичної автономності, зменшення експлуатаційних витрат та забезпечення стабільності роботи виробничих процесів у рослинницькому та тваринницькому напрямках діяльності.

Об'єктом дослідження виступає процес енергозабезпечення фермерського господарства на основі інтеграції відновлюваних джерел енергії у загальну систему електропостачання.

Предметом дослідження є параметри, конструктивні характеристики та режими роботи обладнання, що формує систему виробництва електроенергії з відновлюваних джерел у фермерському господарстві.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ

1.1. Сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики

Упродовж останнього десятиліття відновлювана енергетика з додаткового джерела перетворилася на один із ключових драйверів глобального енергетичного переходу. За даними Міжнародного енергетичного агентства, частка відновлюваних джерел у світовому виробництві електроенергії зросла до близько 30 % у 2023 році, а у звітах прогнозується подальше збільшення до понад 42 % у 2028 році за сценарієм активного розгортання сонячної та вітрової генерації [1].

У березні 2025 року частка електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, наблизилася до 9% у загальній структурі генерації. Такі дані навели джерела ExPro, які також зазначили, що порівняно з березнем 2024 року виробництво «зеленої» енергії зросло приблизно на 1,5% [19].

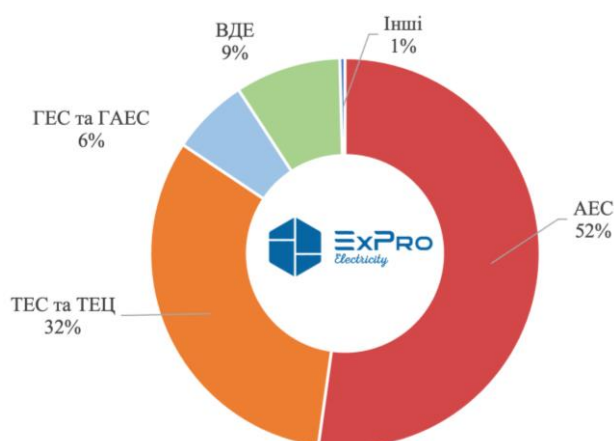


Рисунок 1.1 – Виробництво електроенергії в Україні за березень 2025 р. [19]

Попри незначне збільшення ролі ВДЕ, основне навантаження у виробництві електроенергії продовжують забезпечувати атомні електростанції,

частка яких становить близько 52%. Теплові електростанції та теплоелектроцентралі формують ще 32% загального обсягу.

За підсумками всього 2024 року обсяг електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел (сонячних, вітрових, біоенергетичних установок та малих ГЕС), зріс на 6,4% порівняно з 2023 роком і досяг приблизно 11 млн МВт·год. У результаті частка ВДЕ в енергетичному балансі країни за рік склала майже 11%.

Аналітичні огляди організації Ember показують, що у 2024 році відновлювані джерела забезпечили орієнтовно 32 % глобального виробництва електроенергії, а сонячна фотоенергетика стала найшвидше зростаючою технологією генерації, перевищивши за обсягами введення нових потужностей будь-який інший вид генерації [17].

Це означає, що в більшості країн світу формується нова структура енергетичних балансів, у якій зростає роль децентралізованих та комбінованих систем електропостачання, зокрема для сільських територій і фермерських господарств.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють гібридним (комбінованим) системам, що об'єднують різні відновлювані джерела енергії – сонячну, вітрову, біоенергетику, малу гідроенергетику – та системи накопичення електроенергії (рис. 1.2).

На рисунку 1.2 подано структурну схему гібридної енергетичної системи, у якій фотовольтаїчні модулі, вітрова турбіна, мала гідроустановка та біоенергетичний модуль працюють спільно з системами накопичення (акумулятори, гідроакумуляція) та централізованою електромережею. Гібридний енергоконтролер здійснює розподіл потоків енергії між джерелами, накопичувачами та навантаженням фермерського господарства, забезпечуючи стабільність постачання та оптимізацію використання ресурсів.

Такі системи розглядаються як один з найефективніших способів зменшення інтермітентності виробництва, підвищення надійності та гнучкості енергопостачання й зниження питомих витрат енергії [25; 21].

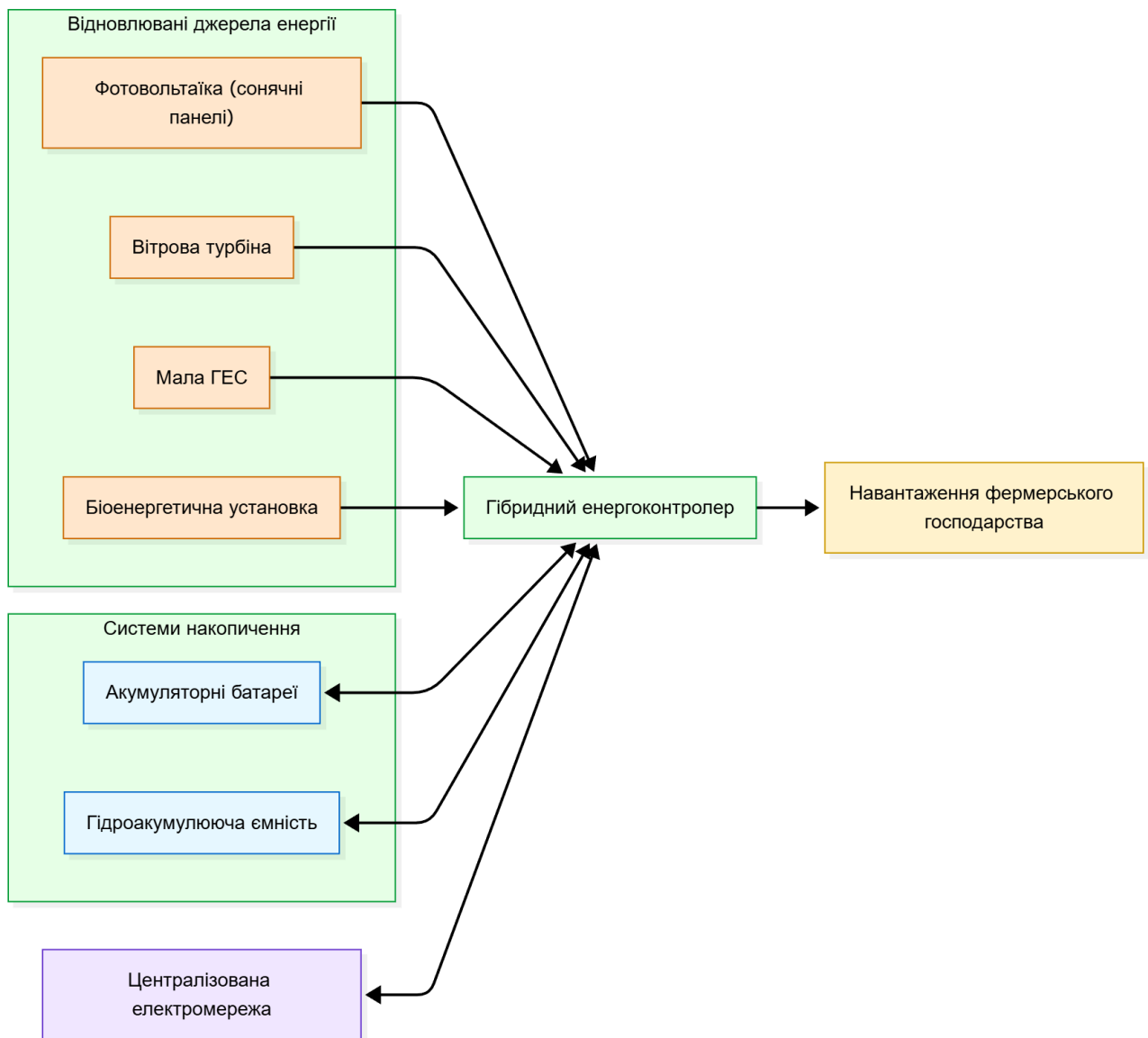


Рисунок 1.2 – Структурна схема гібридної енергетичної системи

Узагальнюючі огляди показують, що найпоширенішою конфігурацією гібридних систем є поєднання сонячних фотоелектричних установок (PV) та вітрових електроустановок із додаванням акумуляторних батарей та, за потреби, резервного дизельного чи біогазового генератора [21; 20; 28].

У сільськогосподарському секторі такі конфігурації дають змогу адаптувати режим електропостачання до добових і сезонних змін навантаження: наприклад, до піків споживання під час доїння, роботи холодильного обладнання, насосів для водопостачання або вентиляційних систем у тваринницьких приміщеннях.

Значною передумовою для широкого впровадження комбінованих систем електропостачання є стаке зниження вартості технологій ВДЕ. За даними IRENA, до 2023 року глобальна середньозважена собівартість електроенергії (LCOE) для нових великих сонячних фотоелектричних станцій знизилася до 0,044 дол. США/кВт·год, а для вітрових установок на суходолі – до 0,033 дол. США/кВт·год, що приблизно на 56–67 % менше за середній рівень витрат на виробництво електроенергії на основі викопного палива, який становив близько 0,10 дол. США/кВт·год [25].

Це означає, що у багатьох регіонах світу гібридні відновлювані системи стають не лише екологічно, а й економічно привабливішими за традиційні схеми електропостачання, особливо там, де фермерським господарствам доводиться сплачувати підвищені тарифи за електроенергію або інвестувати у подовження мережі.

Для кількісного порівняння технологій у техніко-економічних дослідженнях комбінованих систем широко застосовується показник приведеної (рівновитратної) собівартості електроенергії – Levelized Cost of Electricity. Його можна записати у вигляді:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{I_t + O_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1.1)$$

де I_t – інвестиційні витрати у t -му році; O_t – витрати на експлуатацію та обслуговування; F – витрати на паливо та інші змінні витрати; E_t – виробництво електроенергії у відповідному році; r – ставка дисконту; N – розрахунковий період життєвого циклу системи.

Використання цього показника дає змогу коректно порівняти як окремі технології (наприклад, PV, вітер, біогаз), так і комбіновані варіанти, в яких різні джерела працюють у спільному режимі.

На основі даних IRENA узагальнену картину поточних витрат на виробництво електроенергії з різних джерел можна подати у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Орієнтовні значення LCOE для основних технологій генерації електроенергії у 2023 році

Технологія	Глобальна середньозважена LCOE, дол./кВт·год	Порівняння з вичопним паливом
Сонячні фотоелектричні станції (utility-scale PV)	0,044	≈ 56% нижче
Вітрові електростанції на суходолі	0,033	≈ 67% нижче
Нові проєкти на вичопному паливі (середнє)	0,100	Базовий рівень

(за [3] з узагальненням даних IRENA)

Суттєве зниження LCOE для сонячних та вітрових проєктів поєднується із швидким зростанням встановленої потужності. У 2024 році глобальна потужність відновлюваних джерел досягла близько 4,4 ТВт, причому понад три чверті нових потужностей припали саме на сонячну генерацію [1; 25].

1.2. Перспективи застосування комбінованих систем електропостачання

Для аграрного сектору це створює вікно можливостей: технології, які ще десять років тому були економічно недосяжними для більшості фермерських господарств, сьогодні можуть забезпечувати конкурентоспроможну собівартість електроенергії та підвищувати енергетичну автономність.

Гібридні системи електропостачання в сільському господарстві, як правило, будуються за модульним принципом, коли окремі підсистеми

генерації (сонячна, вітрова, біогазова, резервна дизельна, мережа) підключаються до спільної шини через перетворювальне обладнання і працюють разом з системою накопичення енергії. Типова структурна схема такої комбінованої системи для ферми подана на рисунку 1.3.

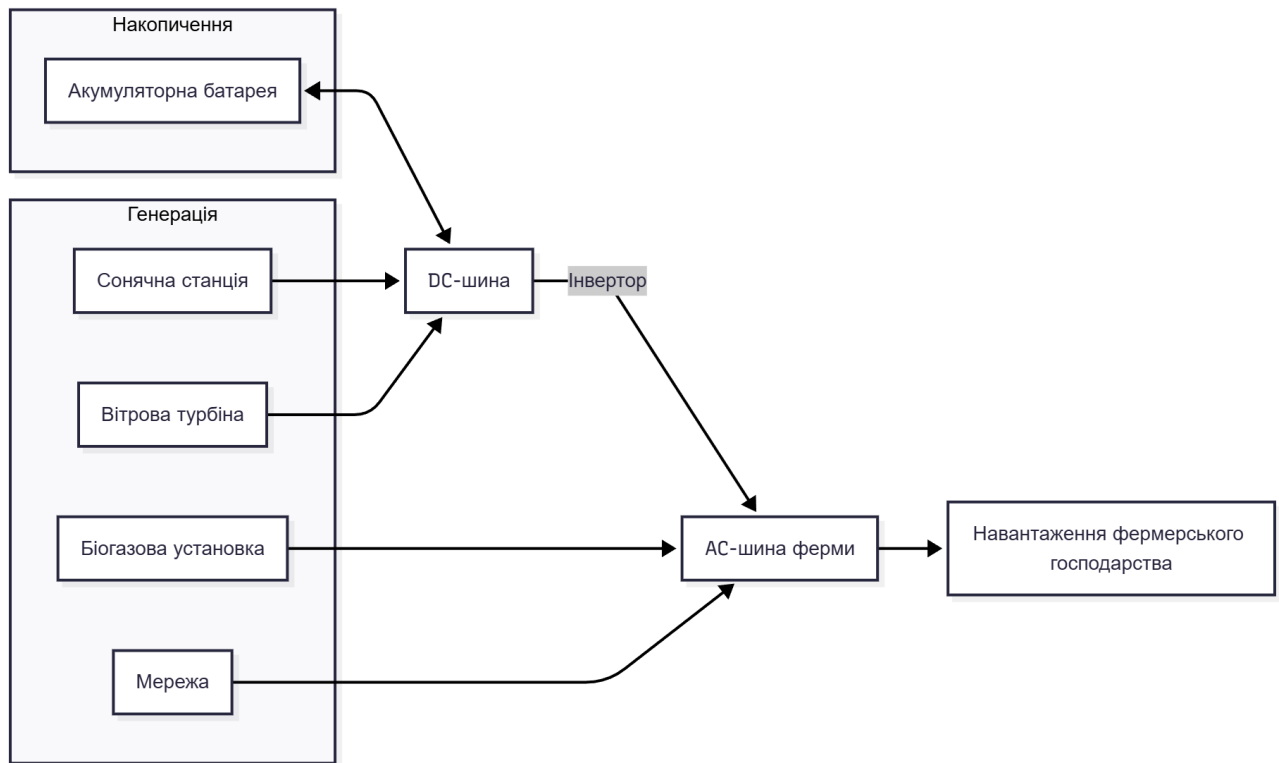


Рисунок 1.3 – Структурна схема комбінованої системи електропостачання фермерського господарства на основі відновлюваних джерел енергії

Функціонування такої системи можна описати рівнянням енергетичного балансу, в якому сумарне навантаження в кожен момент часу покривається за рахунок декількох джерел:

$$E_{\text{load}}(t) = E_{\text{PV}}(t) + E_{\text{wind}}(t) + E_{\text{bio}}(t) + E_{\text{grid}}(t) + E_{\text{disch}}(t) - E_{\text{ch}}(t) - E_{\text{loss}}(t), \quad (1.2)$$

де $E_{\text{load}}(t)$ – споживання електроенергії фермерським господарством; $E_{\text{PV}}(t)$, $E_{\text{wind}}(t)$, $E_{\text{bio}}(t)$ – внесок відповідно сонячної, вітрової та біогазової підсистем; $E_{\text{grid}}(t)$ – потік потужності з/до зовнішньої мережі; $E_{\text{disch}}(t)$ та $E_{\text{ch}}(t)$ – енергія розряду та заряду системи накопичення; $E_{\text{loss}}(t)$ – втрати у лініях і перетворювачах.

Такий підхід дозволяє далі формалізувати задачі оптимізації конфігурації комбінованої системи та вибору режимів її роботи.

У спеціалізованій літературі описано чимало прикладів застосування гібридних систем саме для аграрного виробництва. Огляди, присвячені комбінованим системам для ізольованих ферм, показують, що поєднання сонячних, вітрових та, за потреби, гідрокінетичних або біогазових джерел з накопичувачами енергії дозволяє повністю або частково відмовитися від використання дизельних генераторів, зменшити витрати пального та скоротити викиди парникових газів без зниження надійності електропостачання [28]. Academia У новіших роботах зосереджується увага на використанні методів обчислювального інтелекту та багатокритеріальної оптимізації для налаштування складу та режимів гібридних відновлюваних систем з урахуванням економічних, екологічних та соціальних критеріїв, таких як скорочення викидів CO₂, зменшення ризиків відключень і створення доданої вартості у сільських громадах [21; 20].

У контексті фермерських господарств України перспективність комбінованих систем електропостачання зумовлена не лише глобальними трендами, а й локальними умовами: нерівномірністю якості мережевої інфраструктури, віддаленістю окремих об'єктів, потребою у надійному енергозабезпеченні тваринницьких комплексів, зерносховищ, холодильників, сушарок та інших енергоємних об'єктів. Синергія сонячних, вітрових і біоенергетичних установок у складі однієї гібридної системи відкриває можливість створення енергетично автономних або малозалежних від мережі ферм із прогнозованими витратами на електроенергію та контрольованими екологічними впливами. Саме це робить дослідження комбінованих систем електропостачання особливо актуальним для сучасних фермерських господарств.

1.3. Аналіз схем гібридних енергетичних систем

Гібридні енергетичні системи поєднують кілька джерел електричної чи теплової енергії та засоби її накопичення з метою забезпечення стабільного, економічно обґрунтованого й надійного живлення споживачів. Оптимальний вибір конфігурації визначається характеристиками навантаження, доступним ресурсним потенціалом та економічними обмеженнями конкретного об'єкта. Для фермерських господарств такі системи є особливо актуальними через нерівномірність роботи обладнання, сезонність виробничих процесів та високу залежність від погодних умов.

До складу гібридних систем можуть входити сонячні фотоелектричні модулі, вітрові турбіни, біогазові установки, невеликі гідроагрегати, акумуляторні батареї та дизельні чи біопаливні генератори, які виконують роль резервного джерела живлення. За типом електричної шини виділяють конфігурації постійного, змінного або змішаного струму. У системах постійного струму всі компоненти генерації підключені до DC-шини, а джерела змінного струму працюють через випрямлячі. У системах змінного струму основні джерела або напряму, або через конвертори під'єднуються до AC-шини, а двонаправлений інвертор забезпечує заряд та розряд акумуляторів і живлення навантаження.

За характером взаємодії компонентів гібридні системи поділяють на послідовні, такі, що перемикаються, та паралельні. У послідовних схемах усі споживачі живляться через інвертор від акумуляторів, які заряджаються від сонячної станції або резервного генератора. Такі системи прості, проте створюють підвищене навантаження на акумулятори та повністю залежать від справності інвертора. У схемах, що перемикаються, джерела живлення під'єднуються залежно від ситуації, а контролер автоматично формує конфігурацію, здатну забезпечити підвищену надійність. Паралельні системи дозволяють декільком джерелам одночасно живити споживачів та забезпечують

найвищий рівень резервування, але потребують складної синхронізації сигналів напруги та потужності.

На рисунку 1.4 наведено типову структурну схему гібридної системи «сонце–вітер», у якій генерація від фотоелектричних панелей та вітрової турбіни надходить на контролер заряду.

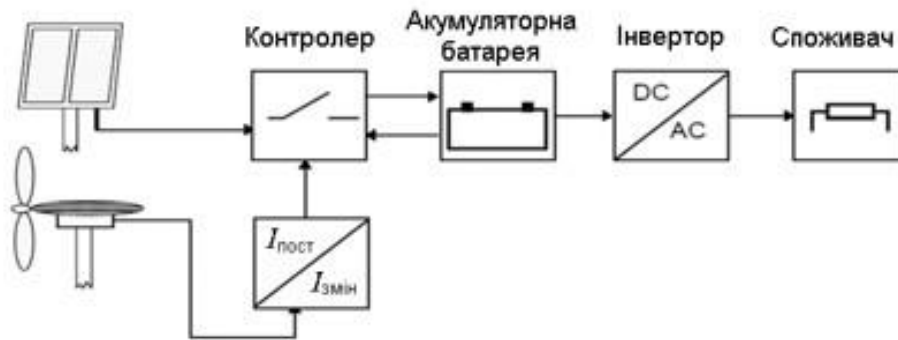


Рисунок 1.4 – Структурна схема гібридної енергетичної системи «сонце–вітер» [9]

Після перетворення енергія накопичується в акумуляторі, а інвертор формує змінну напругу стандартних параметрів. Контролер виконує функції керування точкою максимальної потужності, захисту від перевантажень, керування процесами заряду й розряду та, за потреби, ініціювання запуску резервного генератора або підключення до мережі.

Іншим варіантом є система, що поєднує сонячну енергію та гідроенергетику (рис. 1.5).

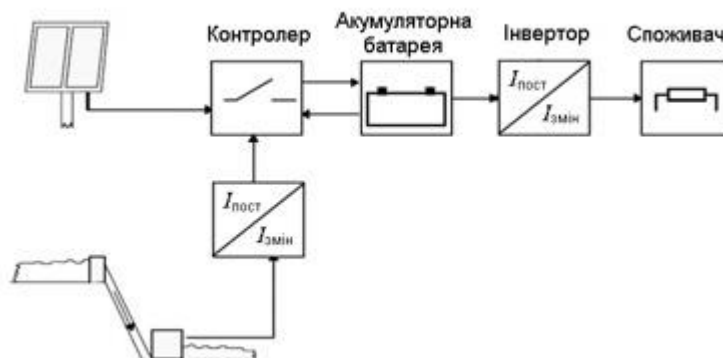


Рисунок 1.5 – Гібридна система «сонце–мала ГЕС» [9]

Гідрогенератор у такій конфігурації живиться від природного або штучного перепаду води, а його потужність залежить від дебіту та висоти падіння. Такі системи придатні для фермерських господарств, що розташовані поряд з малими водотоками, здатними забезпечити хоча б мінімальний енергетичний потенціал.

Більш універсальним рішенням для аграрного сектору є комбінація фотоелектричної генерації, біомаси та дизельного генератора (рис. 1.6).

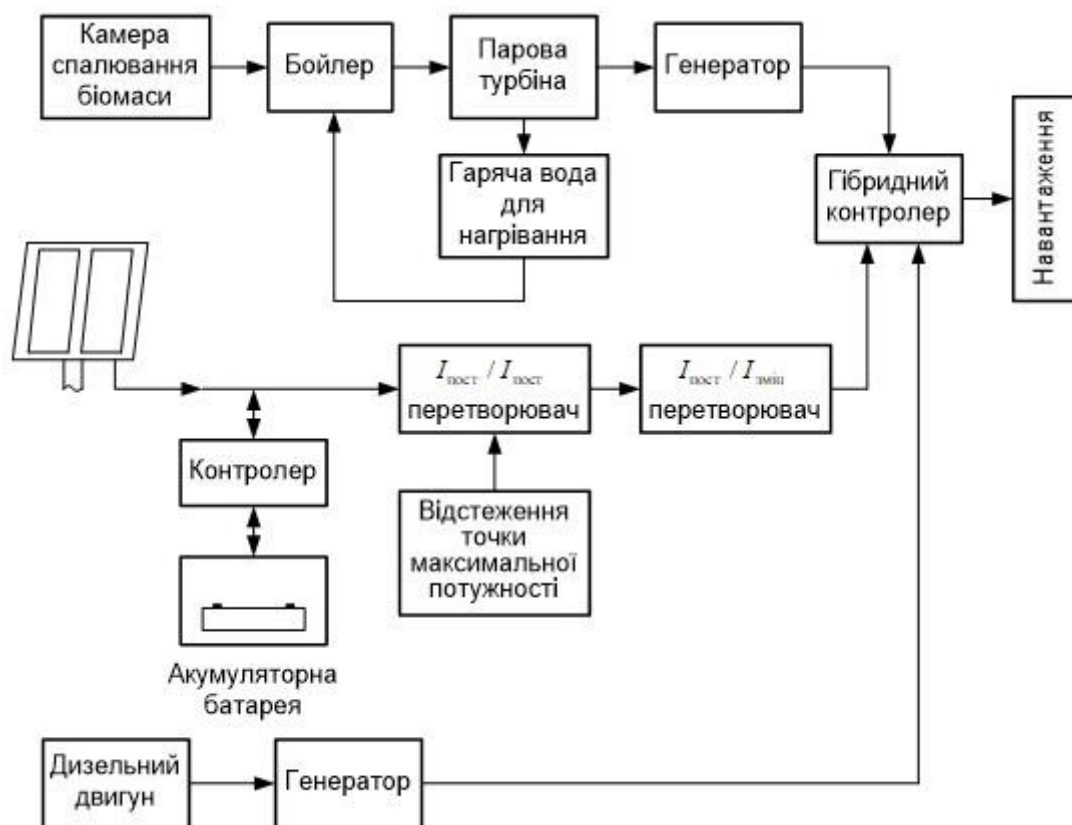


Рисунок 1.6 – Гібридна система «PV-біомаса-дизель» [9]

Біомаса може включати рослинні рештки, деревну тріску, відходи тваринництва та іншу органічну сировину, доступну у фермерських господарствах. У такій системі контролер розподіляє навантаження між джерелами, забезпечує синхронізацію сигналів та ініціює запуск дизельного резерву у години пікового споживання або недостатнього виробітку.

У регіонах із високою сонячною активністю поширеною є схема, що поєднує фотоелектричні панелі, сонячні теплові колектори та мережеве

підключення. Фотоелектрична частина забезпечує електропостачання, тоді як теплова відповідає за гаряче водопостачання для побутових чи виробничих потреб. Така конфігурація є ефективною у господарствах із значним споживанням теплової енергії та доступом до надійної електричної мережі.

Структурна схема типової гібридної енергетичної системи, що поєднує фотоелектричні модулі, сонячні теплові колектори та централізовану електромережу, наведена на рисунку 1.7.

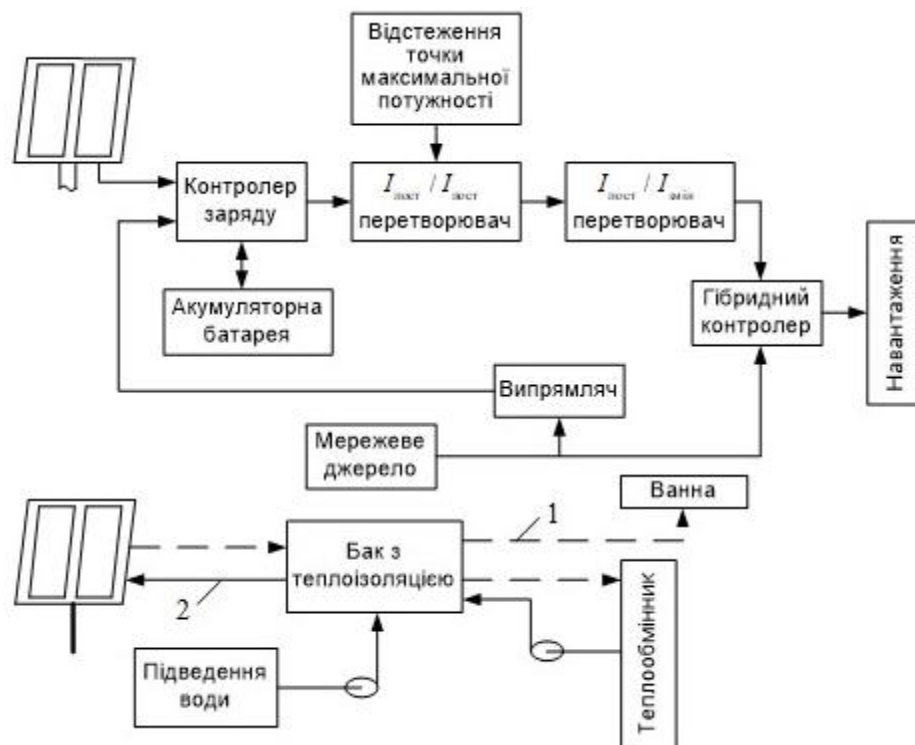


Рисунок 1.7 – Структурна модель комбінованої енергетичної системи на базі фотовольтаїки, сонячної теплової енергії та мережевого живлення: 1 – гаряча вода; 2 – холодна вода [9]

У такій конфігурації фотоелектрична частина забезпечує виробництво електроенергії, тоді як теплова підсистема генерує гарячу воду для побутових або технологічних потреб господарства (позиції 1 – гаряча вода, 2 – холодна вода).

Сонячна теплова енергія належить до найбільш доступних і економічно вигідних форм відновлюваної енергетики, що широко застосовується у

житлових і виробничих об'єктах. Використання сонячних колекторів дозволяє зменшити витрати на підігрів води й забезпечити стабільне теплопостачання упродовж більшої частини року.

Гібридний контролер координує роботу фотоелектричної станції, теплових колекторів і мережевого живлення, забезпечуючи оптимальний розподіл енергії та синхронізацію джерел. Подібна система є доцільною для регіонів із високим рівнем сонячної радіації, де використання інших джерел, наприклад вітрової чи гідроенергетики, обмежене природними умовами або економічною недоцільністю.

Підсумовуючи аналіз, можна зазначити, що вибір схеми гібридної енергетичної системи визначається цілями конкретного господарства, структурою навантаження та доступністю локальних ресурсів. У техніко-економічних розрахунках ключовим критерієм оптимізації є мінімізація повної вартості життєвого циклу системи при забезпеченні необхідного рівня надійності, що нерідко досягається із застосуванням методів штучного інтелекту та багатокритеріальної оптимізації.

1.4. Доцільність впровадження комбінованих енергетичних систем у фермерських господарствах

У сучасному аграрному секторі фермерські господарства стикаються з кількома важливими викликами: нестабільністю зовнішнього енергопостачання, сезонними піками навантаження у технологічних процесах (наприклад, сушка зерна, вентиляція приміщень, насосні системи) та зростаючими тарифами на електроенергію. У цьому контексті впровадження комбінованих (гібридних) енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) набуває дедалі більшої доцільності. Дослідження показують, що комбінація сонячної, вітрової, біоенергетичної генерації із системами накопичення дозволяє підвищити енергетичну автономність

господарства, зменшити залежність від нестабільної мережі та скоротити витрати на електроенергію [16].

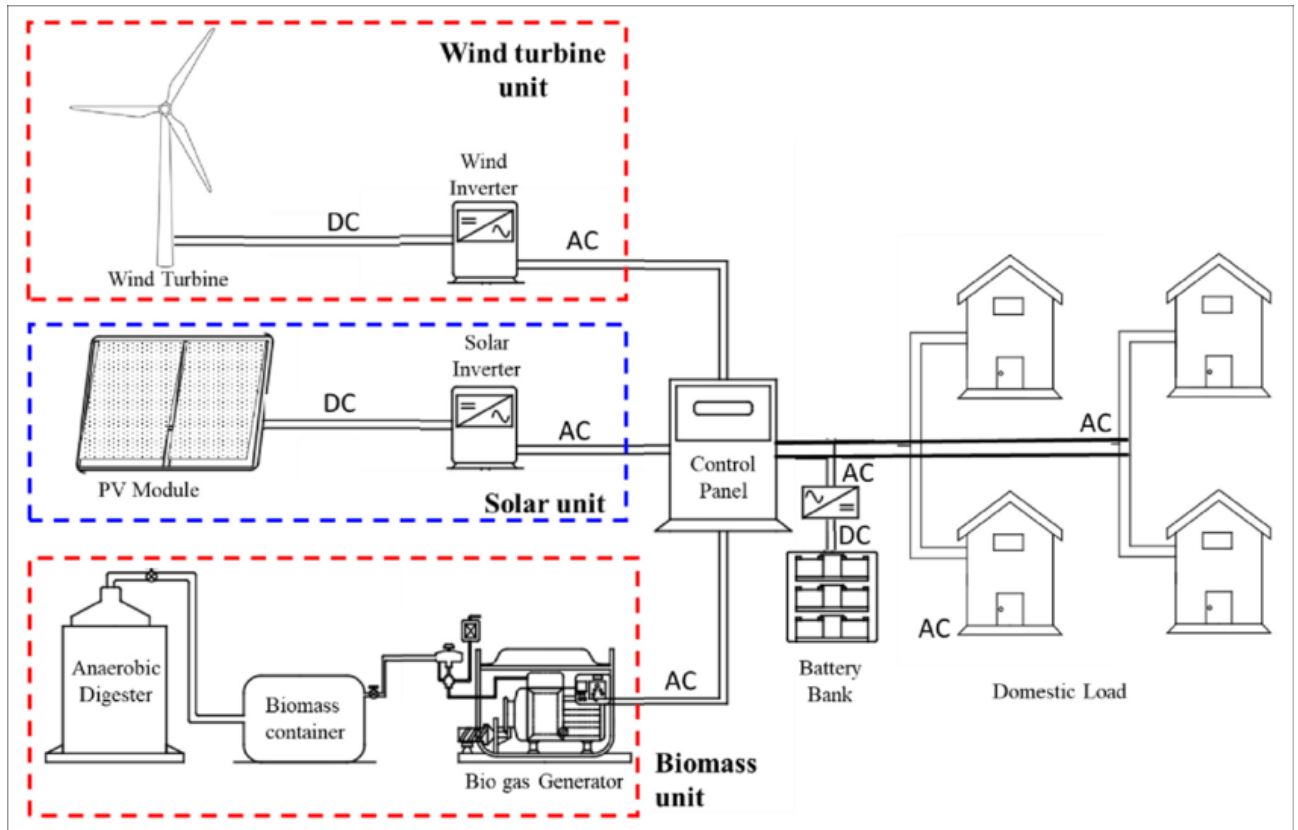


Рисунок 1.8 – Схема інтеграції гібридної відновлюваної енергетичної системи [16]

Однією з ключових переваг таких систем є можливість збільшення надійності живлення. Наприклад, коли сонячне випромінювання зменшене або припинено, вітрова генерація або біоенергетична установка (або запас енергії в акумуляторах) можуть підтримувати електропостачання ферми без звертання до традиційної мережі. Ця взаємодоповнюваність джерел знижує ризики простоїв обладнання та втрати продуктивності. Крім того, накопичення енергії дозволяє згладжувати добові піки навантаження, що особливо актуально для фермерських об'єктів з нерівномірним режимом роботи (наприклад, доїння, охолодження, сушка) [24].

Економічна доцільність також є вагомою: життєво-циклова вартість комбінованої системи має тенденцію до зниження завдяки зростанню ефективності ВДЕ, зниженню вартості акумуляторів та можливості продажу надлишкової електроенергії (у разі підключення до мережі). Модель

оптимізації для оф-гридових фермерських систем показує, що правильно спроектована гібридна система може забезпечити значну економію витрат на електроенергію та скорочення викидів CO₂.

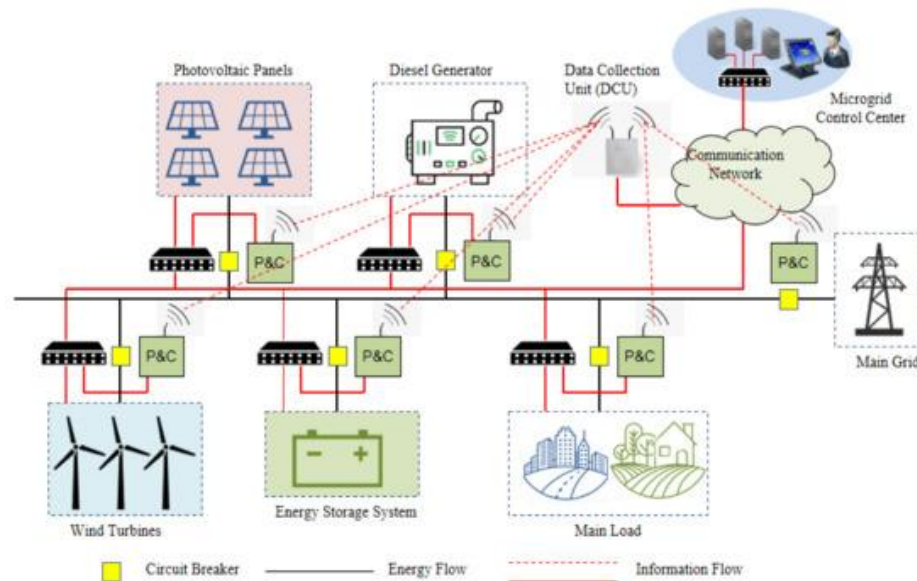


Рисунок 1.9 – Схематична діаграма інтеграції HRES в енергосистему [1]

Окрім технічних і економічних переваг, впровадження таких систем у фермерських господарствах має соціально-екологічний аспект. Формування енергетично автономних господарств сприяє сталому розвитку сільських територій, скорочує вуглецевий слід аграрного виробництва і створює додаткові можливості для місцевого економічного зростання.

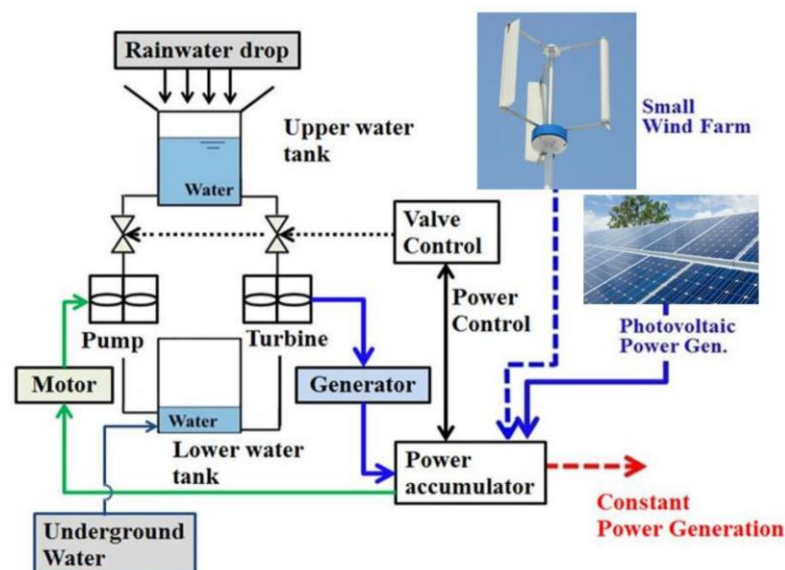


Рисунок 1.10 – Концептуальний проект типової гібридної системи відновлюваної енергії (HRES) [1]

Наприклад, дослідження показують, що гібридні енергетичні рішення в аграрному секторі сприяють підвищенню конкурентоспроможності фермерських підприємств, особливо у віддалених або слабообслуговуваних регіонах [18].

Для оцінки доцільності впровадження комбінованої системи використовують показники приведеної вартості електроенергії (LCOE) та показник внутрішньої норми рентабельності (IRR).

Нами сформовано основні переваги впровадження гібридних систем у фермерських господарствах (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Основні переваги впровадження гібридних систем у фермерських господарствах

Перевага	Опис
Підвищення надійності	Менша залежність від мережі та погодних умов
Оптимізація ресурсного використання	Більш ефективне використання сонячної, вітрової та біоенергії
Зниження витрат на електроенергію	Довгострокова економія, зниження LCOE
Екологічна стійкість	Скорочення викидів парникових газів та сталість агровиробництва

Отже, доцільність впровадження комбінованих енергетичних систем у фермерських господарствах обґрунтована як з технічної, так і з економічної та екологічної точок зору. Враховуючи специфіку енергоспоживання аграрних підприємств, нерівномірність навантаження та доступність місцевих відновлюваних ресурсів, такі системи можуть стати потужним інструментом підвищення стійкості й ефективності агровиробництва.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ОЦІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

2.1. Загальна характеристика фермерського господарства та наявна система електропостачання

Фермерське господарство «ОЛКО» розташоване у селі Секунь Ковельського району Волинської області та здійснює свою діяльність із 2004 року. Господарство має змішаний виробничий профіль, поєднуючи вирощування зернових, бобових та олійних культур із тваринницьким напрямом, що охоплює розведення великої рогатої худоби молочного напрямку та свинарство. Додатково підприємство займається вирощуванням ягід і плодових культур, а також виробництвом кормів, що свідчить про сформовану внутрішню кормову базу й орієнтацію на комплексний агропромисловий цикл. Структура господарства включає тваринницькі приміщення, складські будівлі, технічні ангари, зерносховища та виробничі майданчики, що визначають специфіку енергоспоживання та режим роботи електрообладнання.

Наявна інфраструктура фермерського господарства працює за рахунок централізованого електропостачання, однак значна частка технологічних процесів, таких як охолодження молока, вентиляція тваринницьких приміщень, насосні системи чи зерносушіння, створює нерівномірні за інтенсивністю та сезонністю навантаження. У пікові періоди виникає підвищена чутливість до коливань напруги, що потребує резервного джерела живлення та автоматизації системи розподілу електроенергії. Поєднання кількох напрямів діяльності та високий ступінь механізації виробництва роблять господарство перспективним об'єктом для впровадження комбінованих енергетичних систем, які здатні компенсувати сезонні коливання навантаження та зменшити залежність від зовнішньої мережі.



Рисунок 2.1 – Супутниковий знімок території фермерського господарства «ОЛКО» (с. Секунь, Ковельський район, Волинська область)

Територія фермерського господарства «Олко», розташованого у селі Секунь Ковельського району Волинської області, має компактну й водночас функціонально розмежовану структуру. На супутниковому знімку (рис. 2.1) добре простежується поділ на виробничу зону з тваринницькими приміщеннями, зерно- та кормоскладами, ремонтно-технічною базою, а також на адміністративно-побутовий сектор і масиви сільськогосподарських угідь. Розміщення будівель уздовж основних під'їзних доріг спрощує логістику, однак водночас формує розгалужену мережу внутрішніх кабельних і повітряних ліній електропередачі, які з'єднують окремі групи споживачів із головним ввідно-розподільчим пристроєм господарства.

Електропостачання фермерського господарства здійснюється від централізованої мережі середньої напруги через трансформаторну підстанцію типу 10/0,4 кВ. Далі електроенергія розподіляється системою шин низької напруги та лініями до основних споживачів. Типову для таких об'єктів структуру розподілу електроенергії ілюструє однолінійна схема (рис. 2.2), де на шині середньої напруги (22 кВ у наведеному прикладі) встановлено силові трансформатори потужністю по 1 МВА, а на шині низької напруги 415 В від них живляться як традиційні споживачі. Є можливість передбачити живлення

від джерел генерації з відновлюваних джерел енергії – сонячна електростанція, вітрові турбіни та система акумуляторного зберігання (BESS). Для ФГ «ОЛКО» така схема є близькою за логікою побудови, хоча номінальні напруги та потужності трансформаторів можуть відрізнятися.

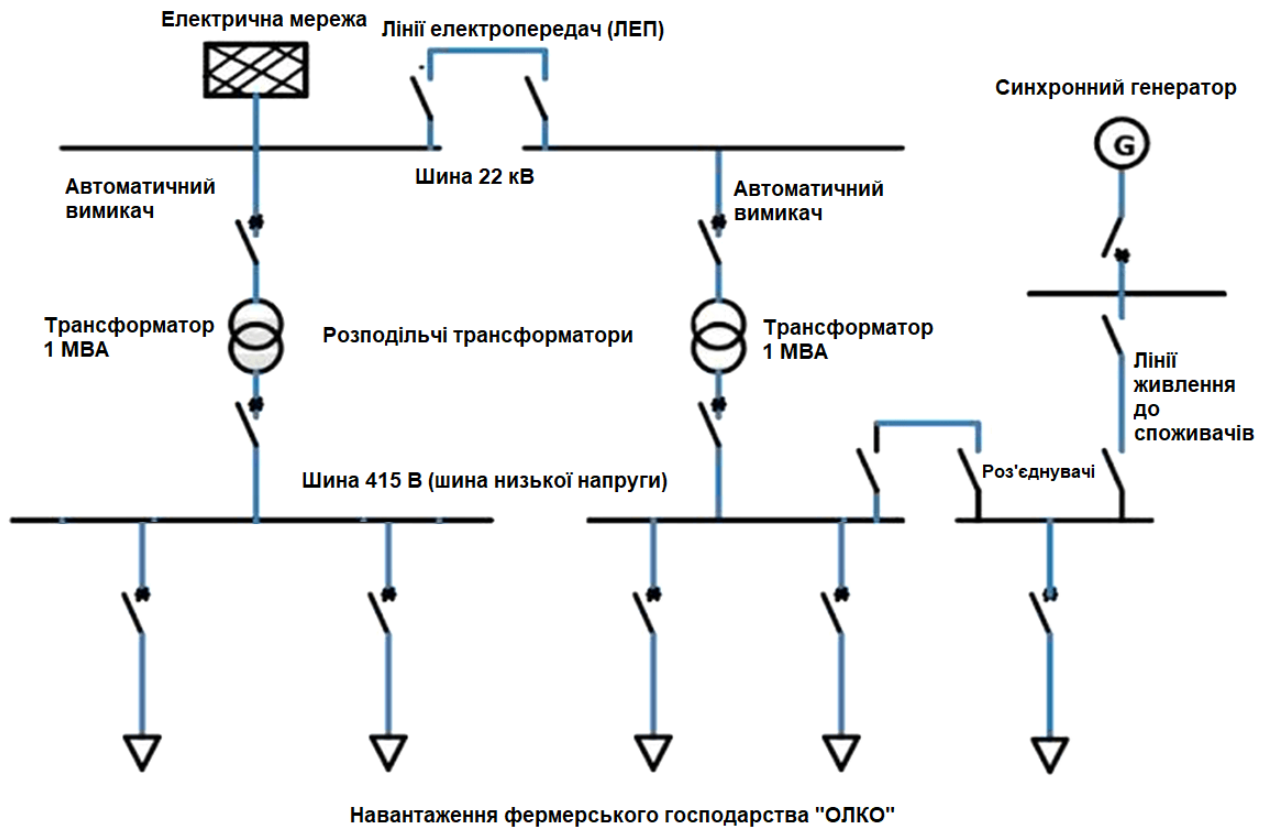


Рисунок 2.2 – Однолінійна схема системи розподілу електроенергії з підключенням мережі, трансформаторів і розподільчих шин

Аналізуючи роботу наявної системи електропостачання, доцільно виділити основні групи навантажень, які формують добовий та сезонний профілі споживання. До найбільш енергоємних належать тваринницькі комплекси (системи вентиляції, доїльні установки, холодильне обладнання), зерносушильні та зерноочисні агрегати, насосні станції для водопостачання і подачі гноївки, а також освітлення і побутові споживачі. Узагальнено сумарне навантаження господарства можна описати залежністю:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{\text{баз}} + P_{\text{тв}}(t) + P_{\text{рос}}(t) + P_{\text{поб}}(t), \quad (2.1)$$

де $P_{баз}$ – постійне базове навантаження (системи безпеки, чергове освітлення, охолодження), кВт; $P_{тв}(t)$ – змінне навантаження тваринницьких об'єктів, кВт; $P_{рос}(t)$ – навантаження, пов'язане з технологічними операціями у рослинництві, кВт; $P_{ноб}(t)$ – побутові та адміністративні потреби у t -й момент часу, кВт.

На підставі добових замірів потужності визначено середньодобове значення навантаження та коефіцієнт завантаження трансформатора, що є основним параметром при подальшому обґрунтуванні доцільності впровадження комбінованої системи електропостачання.

Для наочного уявлення про структуру електроспоживання господарства використаємо узагальнену оцінку розподілу потужності між основними групами споживачів, подану в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Структура розподілу встановленої потужності споживачів ФГ «ОЛКО»

Група споживачів	Обладнання	Встановлена потужність, кВт	Частка від сумарної потужності, %
Тваринницькі приміщення	Вентилятори, доїльні установки, холодильники	50	42
Зерносушарка та складські об'єкти	Сушарка, транспортери, вентилятори	40	33
Насосні станції та допоміжні механізми	Насоси водопостачання, гноювкові насоси	15	12,5
Адміністративно-побутові будівлі	Освітлення, офісна техніка, дрібні споживачі	10	8
Резерв, перспективні підключення ВДЕ	Майбутня СЕС, біогазова установка, інша генерація	10	8,5

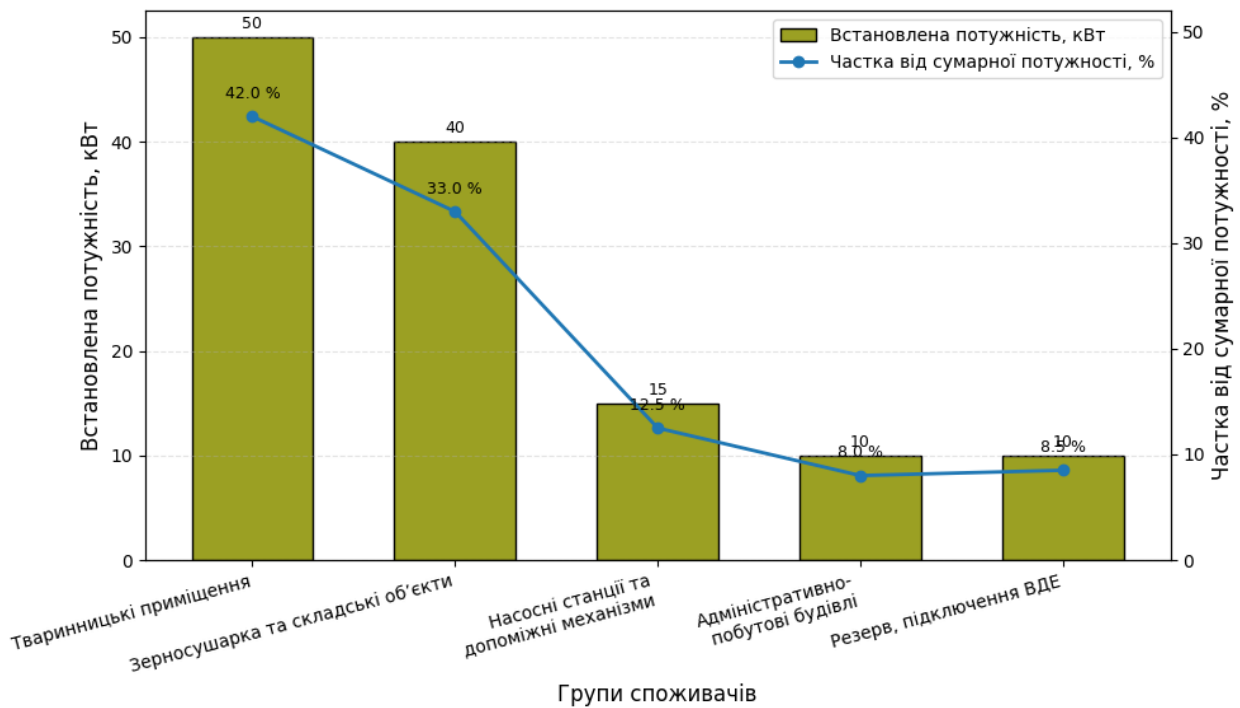


Рисунок 2.3 – Структура встановленої потужності споживачів фермерського господарства «ОЛКО»

Аналіз графіка (рис. 2.3) показує, що найбільшу частку навантаження у ФГ «ОЛКО» становлять тваринницькі приміщення із встановленою потужністю 50 кВт, що відповідає 42,0 % сумарного споживання. Другим за значенням споживачем є зерносушарка та складські об'єкти – 40 кВт або 33,0 %. Інші групи мають значно нижчі значення: насосні станції споживають 15 кВт (12,5 %), адміністративно-побутові будівлі – 10 кВт (8,0 %), а резерв підключення ВДЕ становить 10 кВт (8,5 %). Таке співвідношення вказує на домінування технологічних процесів у загальній структурі енергоспоживання господарства.

З рисунка 2.1 видно, що базова архітектура системи розподілу електроенергії передбачає можливість інтеграції додаткових джерел генерації на шині низької напруги. У наведеному прикладі до шини 415 В під'єднані вітрові турбіни, сонячна електростанція та система акумулювання енергії BESS, що дозволяє частково розвантажити мережу середньої напруги та знизити пікові перетоки потужності з боку енергосистеми. Для ФГ «ОЛКО» аналогічний принцип підключення може бути використано при впровадженні

фотоелектричної установки та, за наявності відповідної сировинної бази, біогазового когенераційного модуля.

У подальших розділах на основі отриманої характеристики господарства та аналізу наявної системи електропостачання виконуватиметься кількісна оцінка потенціалу відновлюваних джерел енергії та обґрунтування параметрів комбінованої енергетичної системи, адаптованої до умов фермерського господарства «ОЛКО».

2.2. Аналіз добових і сезонних графіків електроспоживання

Аналіз режимів електроспоживання фермерського господарства «ОЛКО» дає змогу виявити характерні пікові періоди навантаження та оцінити, які групи споживачів формують найбільший внесок у загальний енергобаланс. Добовий графік навантаження зумовлений поєднанням технологічних процесів у тваринництві й рослинництві та побутових потреб. У нічний період переважають базові споживачі – системи охолодження продукції, частина вентиляційного обладнання та чергове освітлення. У денний час до них додаються навантаження насосного обладнання, активна робота вентиляції та механізмів зерносушіння у сезон збирання врожаю. Вечірні піки формуються сумарною дією освітлення тваринницьких приміщень, побутових потреб персоналу та продовженням роботи технологічного обладнання.

Сумарне миттєве навантаження господарства можна представити як суму навантажень основних груп споживачів. Для представницького літнього дня без роботи зерносушарки ця залежність має вигляд:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{охл}(t) + P_{вент}(t) + P_{осв}(t) + P_{нас}(t), \quad (2.2)$$

де $P_{охл}(t)$ – потужність систем охолодження, кВт; $P_{вент}(t)$ – потужність вентиляційного обладнання, кВт; $P_{осв}(t)$ – потужність освітлення, кВт; $P_{нас}(t)$ – електроспоживання насосних агрегатів у t -й момент часу, кВт.

Добове споживання електроенергії визначається сумою значень потужності за всі години доби з урахуванням тривалості кроку:

$$E_{доб} = \sum_{t=0}^{23} P_{\Sigma}(t) \Delta t, \quad (2.3)$$

де Δt – крок розгляду доби, $\Delta t = 1 \text{ год}$.

Аналогічно для окремих груп споживачів розраховується частка кожної групи в добовому балансі.

Для ілюстрації структури добового електроспоживання було прийнято умовну модель, у якій максимальне навантаження формується вранці (6...9 година) та ввечері (18...22 година), а в денний період зростають частки охолодження та насосного обладнання. На основі змодельованих даних побудовано добовий графік навантаження за групами споживачів (рис. 2.4).

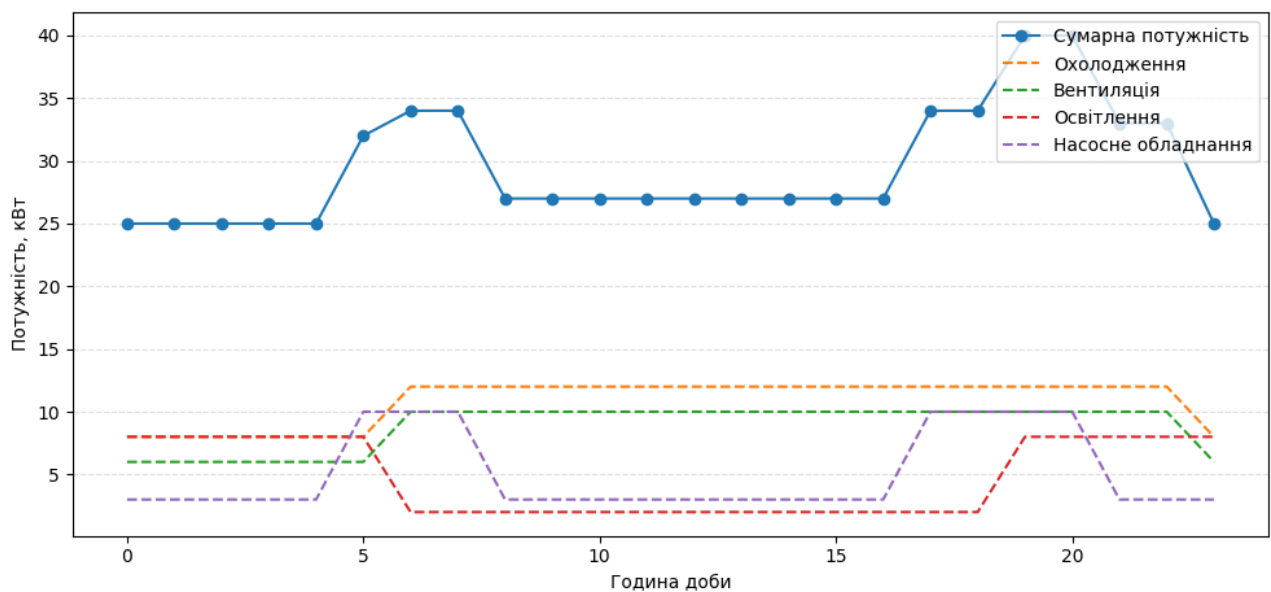


Рисунок 2.4 – Добовий графік навантаження за групами споживачів

Із графіка видно, що у нічний час потужність не опускається нижче базового рівня близько 20...25 кВт, який забезпечують охолодження продукції та мінімальна вентиляція. Перший виражений пік навантаження формується у ранкові години, коли одночасно працюють системи доїння, насосне обладнання та освітлення. Другий, більш тривалий пік припадає на вечірній проміжок часу,

коли, окрім технологічних процесів, активізуються побутові споживачі та освітлення.

Сезонна нерівномірність споживання електроенергії зумовлена зміною виробничої програми господарства. У теплий період року зростає потреба в охолодженні та вентиляції приміщень, тоді як восени, у період збирання врожаю, істотно зростає навантаження від зерносушарок, транспортерів та вентиляторів складських приміщень. Для узагальнення результатів розраховано місячні обсяги споживання електроенергії, які наведено у таблиці 2.5 та використано для побудови сезонного графіка (рис. 2.5).

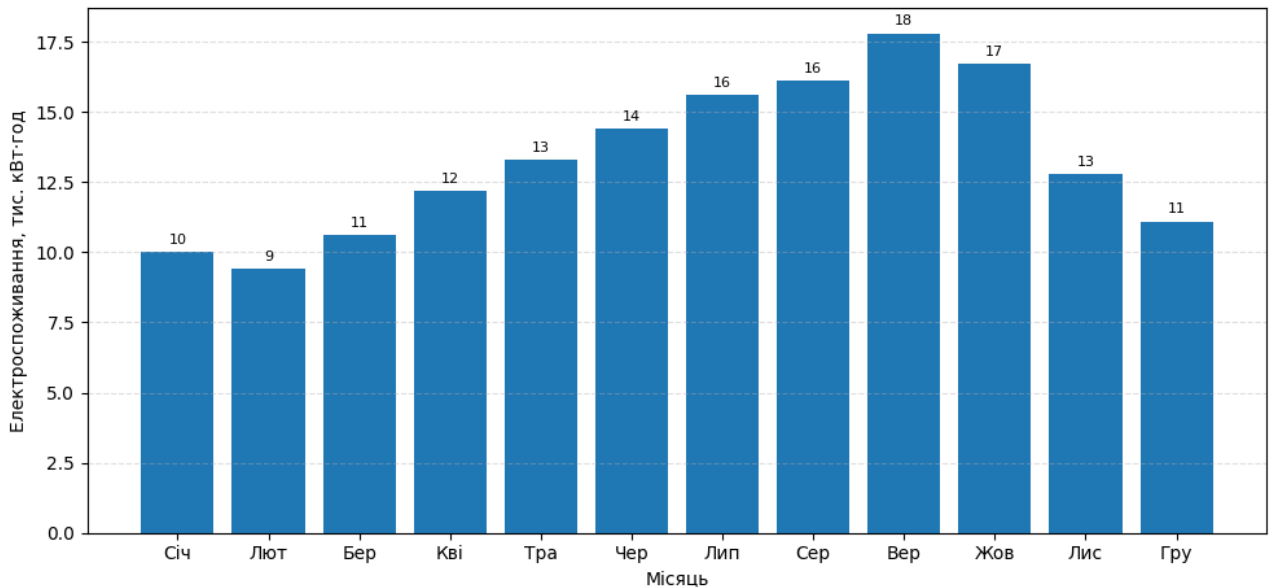


Рисунок 2.5 – Сезонний розподіл електроспоживання фермерського господарства «ОЛКО»

З аналізу рисунка 2.5 видно, що найнижчі значення споживання спостерігаються у січні–лютому, тоді як у липні–серпні споживання зростає за рахунок систем охолодження, а у вересні–жовтні за рахунок зерносушіння. Це підтверджує доцільність застосування комбінованих систем електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, які можуть забезпечити покриття сезонних піків без надмірного навантаження на мережу.

Таблиця 2.2 – Розрахункове середньомісячне споживання електроенергії
фермерським господарством «ОЛКО»

Місяць	Електроспоживання, тис. кВт·год
Січень	10,0
Лютий	9,4
Березень	10,6
Квітень	12,2
Травень	13,3
Червень	14,4
Липень	15,6
Серпень	16,1
Вересень	17,8
Жовтень	16,7
Листопад	12,8
Грудень	11,1

За даними таблиці 2.2 формується сезонний графік, який демонструє плавне зростання навантаження від весни до кінця літа з максимумом у період жнив, а також деяке зниження взимку. Подальший аналіз поєднує ці сезонні коливання споживання із сезонною динамікою потенційної генерації від сонячних та вітрових установок, що є важливою передумовою для обґрунтування параметрів комбінованої енергетичної системи.

Отже, отриманий добовий графік навантаження за групами споживачів (рис. 2.4) свідчить про те, що є ранкові та вечірні піки навантаження, які формуються переважно за рахунок насосного обладнання, освітлення та інтенсивнішої роботи систем охолодження й вентиляції. Рисунок 2.5 відображає сезонний характер споживання електроенергії, де максимум припадає на період активних польових робіт і зерносушіння, а мінімум – на зимові місяці, що слід враховувати при проектуванні комбінованої системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії.

2.3. Оцінювання потенціалу відновлюваних джерел енергії території господарства

Оцінювання потенціалу відновлюваних джерел енергії для фермерського господарства «ОЛКО» ґрунтується на кліматичних та ресурсних характеристиках місцевості села Секунь Ковельського району. Для сонячної та вітрової енергетики доцільно використовувати дані кліматичних баз Meteonorm, сервісу PVGIS та карт Global Wind Atlas, які дають змогу отримати середньорічні значення сонячної радіації та швидкості вітру для заданих координат. Для біоенергетики вихідною інформацією є структура поголів'я тварин, площі посівів та обсяги побічної продукції, що формують потенціал біомаси для виробництва біогазу. На основі цих даних виконується перехід від кліматичних і ресурсних показників до прогнозованої електричної енергії, яку може виробляти комбінована система.

Сонячний потенціал території зручно характеризувати річною сумарною питомою сонячною радіацією на горизонтальну площину $G_{p\text{іч}}$, кВт·год/м²·рік.

The screenshot shows the PVGIS web application interface. On the left, there is a sidebar with navigation options: 'ПІДКЛЮЧЕНО ДО МЕРЕЖІ', 'ВІДСТЕЖЕННЯ ПВ', 'ПОЗА МЕРЕЖЕЮ', 'ЩОМІСЯЧНІ ДАНІ', 'ЩОДЕННІ ДАНІ', 'ПОГОДИННІ ДАНІ', and 'ТМУ'. The main panel is titled 'ПРОДУКТИВНІСТЬ ПІДКЛЮЧЕНИХ ДО МЕРЕЖІ PV' and contains several input fields and dropdown menus for configuring the solar potential calculation. The right panel shows a satellite map of the location 'Секунь' with a blue pin indicating the site. A legend on the right side of the map includes options for 'етикетки', 'Сонячна радіація', 'Sentinel-2 безхмарний', 'Відкрийте карту вулиць', and 'Земля'. At the bottom, there are buttons for 'Візуалізуйте результати', 'csv', and 'json', along with a map scale bar and coordinates.

ПІДКЛЮЧЕНО ДО МЕРЕЖІ

ПРОДУКТИВНІСТЬ ПІДКЛЮЧЕНИХ ДО МЕРЕЖІ PV

База даних сонячної радіації * PVGIS-SARAH3

PV технологія * КРИСТАЛІЧНИЙ КРЕМНІЙ

Встановлена пікова фотоелектрична потужність [кВт] * 30

Системні втрати [%] * 14

Стационарні варіанти кріплення

Монтажне положення * ОКРЕМО СТОІТЬ

Схил [°] * 35 ☐ Оптимізуйте нахил

Азимут [°] * 0 ☐ Оптимізуйте нахил і азимут

Ціна фотоелектричної енергії

Вартість фотоелектричної системи (ваша валюта)

Інтерес [% / рік] *

Тривалість життя [рік] *

Візуалізуйте результати

csv json

етикетки

Сонячна радіація

Sentinel-2 безхмарний

Відкрийте карту вулиць

Земля

Секунь

500 m

Ukraine

Іди!

51.364287 24.633528

Іди!

Рисунок 2.6 – Внесення початкових даних у сервіс PVGIS для розрахунку

Для умов фермерського господарства значення $G_{річ}$ можна прийняти на рівні близько 1165 кВт·год/м²·рік, що відповідає кліматичним особливостям західних регіонів України.

При розрахунку прогнозованої генерації фотоелектричної станції встановленою потужністю $P_{PV} = 30 \text{ кВт}$ використовується співвідношення:

$$E_{PVріч} = P_{PV} \cdot Y_{сн},, \quad (2.4)$$

де $Y_{сн}$ – специфічний річний виробіток, кВт·год/кВт_р.

Для вибраної конфігурації можна прийняти $Y_{сн} \approx 1100 \text{ кВт·год} / \text{кВт}_p / \text{рік}$, що дає річну генерацію близько 33000 кВт·год. Розподіл середньомісячної сонячної радіації та прогнозованої генерації подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Місячна вироблена енергія від СЕС потужністю 30 кВт за даними PVGIS

Місяць	Сумарна сонячна радіація, кВт·год/м ²	Прогнозований виробіток СЕС, кВт·год
Січень	35	955.3
Лютий	55	1259.6
Березень	90	2804.0
Квітень	120	3503.9
Травень	150	3903.9
Червень	160	4105.0
Липень	165	4134.6
Серпень	145	4020.23
Вересень	105	3159.4
Жовтень	70	2273.7
Листопад	40	1059.8
Грудень	30	808.1
Разом за рік	1165	32 272.86

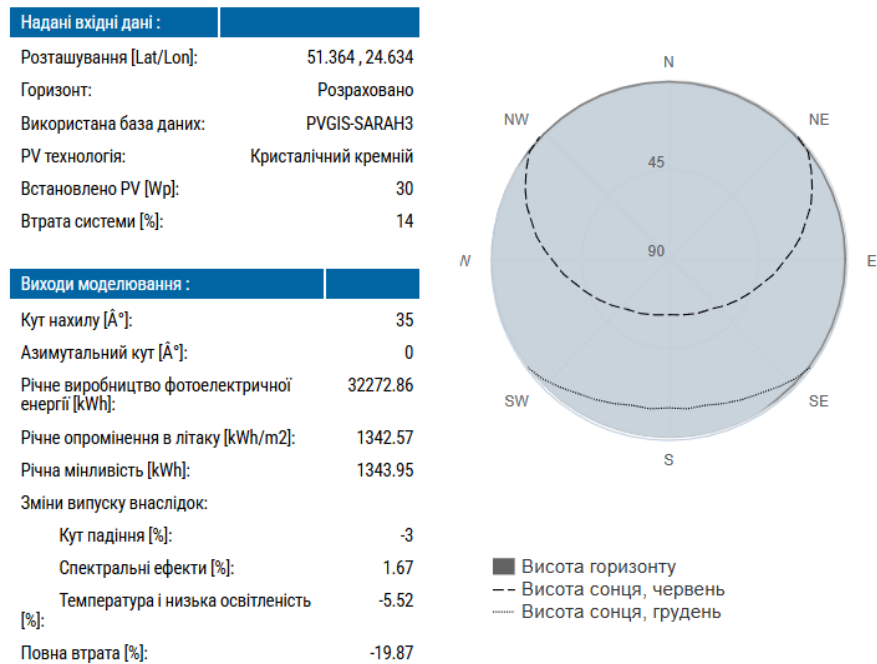


Рисунок 2.7 – Вихідні параметри розрахунку фотоелектричної системи для ФГ «ОЛКО» за даними PVGIS

Отримані результати моделювання показують, що для координат фермерського господарства «ОЛКО» річний виробіток фотоелектричної станції потужністю 30 кВт становить 32272,86 кВт·год. Оптимальний кут нахилу для цієї місцевості складає 35°, а орієнтація на південь (азимут 0°) дає найвищі значення генерації. Річне опромінення на площину нахилу становить 1343,95 кВт·год/м², що відповідає типовим умовам Західної Волині. Втрати системи оцінено на рівні 14 %, а загальні кліматичні втрати (температурні, спектральні, забруднення) становлять близько – 19,87 %, що є типовим значенням для зовнішніх установок у регіоні.

Аналіз місячної генерації демонструє чітко виражену сезонну динаміку. Найвищі значення спостерігаються у літні місяці: у червні виробіток сягає 4105 кВт·год, у липні – 4134,6 кВт·год, а в серпні – 4020,23 кВт·год. У період середньої сонячної активності (квітень–травень) генерація становить 3503–3903 кВт·год, тоді як найнижчі значення припадають на зимові місяці: у грудні СЕС виробляє лише 808,1 кВт·год, у січні – 955,3 кВт·год, а в лютому – 1259,6

кВт·год. Така картина підтверджує, що у господарстві «ОЛКО» СЕС може повністю покривати частину денного навантаження у весняно-літній період, але потребує підтримки з боку мережі або інших джерел у зимовий час.

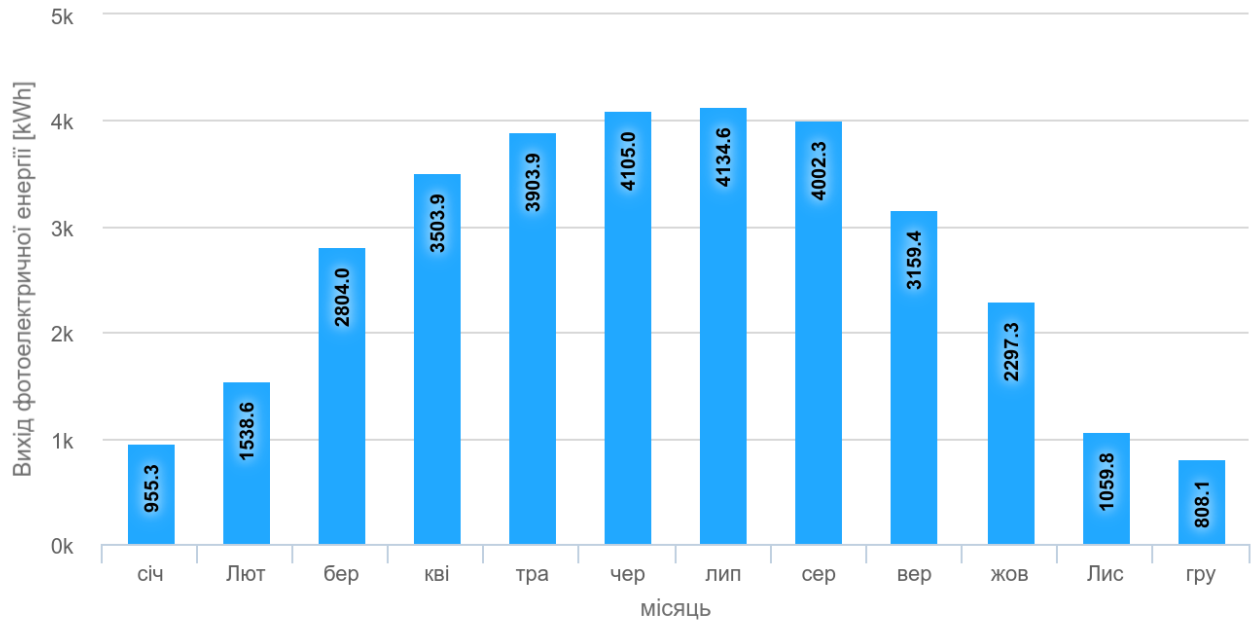


Рисунок 2.8 – Місячна вироблена енергія фотоелектричною системою потужністю 30 кВт за даними PVGIS

На основі даних таблиці будується графік, який відображає зміну потенційної генерації протягом року (рис. 2.8). З аналізу видно, що максимальний внесок забезпечують місяці з травня по серпень, коли сумарний виробіток СЕС перевищує 17000 кВт·год, тоді як зимовий період характеризується суттєво нижчими значеннями генерації. Це визначає доцільність поєднання фотоелектричної станції з іншими джерелами або системами накопичення енергії для забезпечення рівномірності електропостачання.

Вітровий потенціал оцінюється за середньорічною швидкістю вітру на висоті розташування осі ротора вітрової турбіни. Якщо за даними Global Wind Atlas середня швидкість вітру на висоті 10 м становить близько 4,8 м/с, то з урахуванням степеневого закону зміни швидкості з висотою можна прийняти, що на висоті 50 м швидкість досягає приблизно 5,6 м/с.

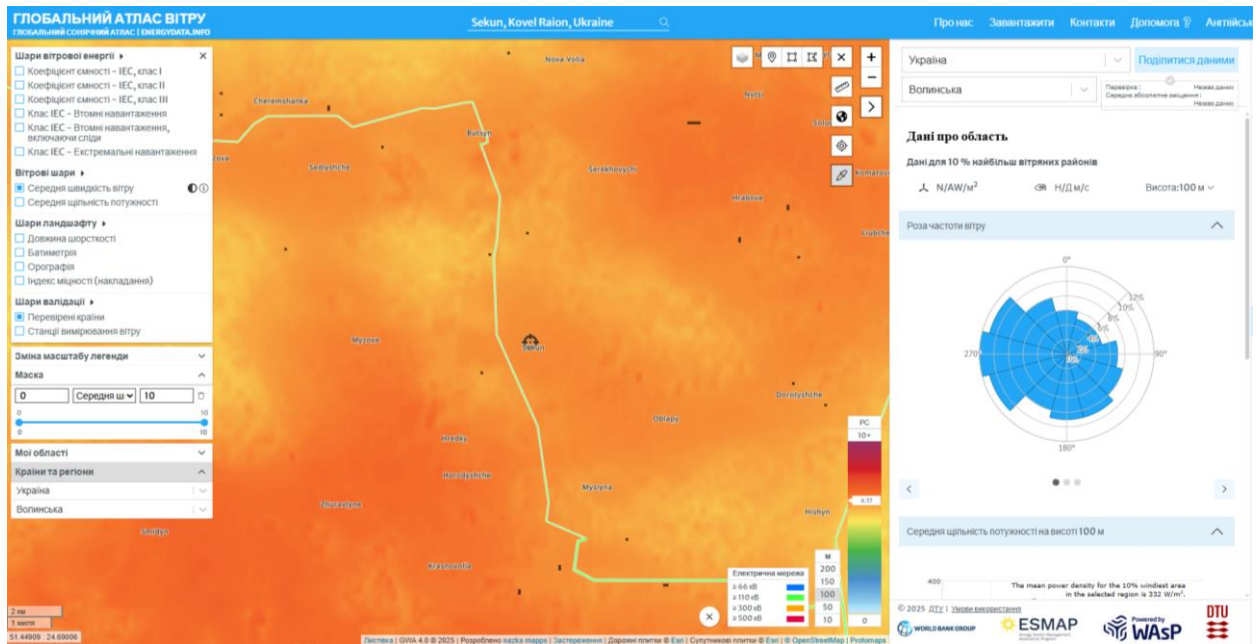


Рисунок 2.9 – Внесення початкових даних у сервіс Global Wind Atlas для розрахунку швидкостей вітру на території ФГ «ОЛКО»

Теоретична потужність вітропотoku через площу ротора A розраховується за формулою:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (2.5)$$

де ρ – густина повітря, кг/м^3 ; v – швидкість вітру, м/с .

Реальна електрична потужність вітрової установки з урахуванням коефіцієнта використання енергії вітру C_p та ККД електричної частини η_{el} визначається за виразом:

$$P_{\text{mnp}} = P_{\text{wind}} \cdot C_p \cdot \eta_{el}, \quad (2.6)$$

Для вітрової турбіни номінальною потужністю 10 кВт і середнього коефіцієнта використання встановленої потужності 0,23 річний виробіток становитиме приблизно 20000 кВт·год. Цей потенціал є суттєвим, але має значну добову та сезонну змінність, тому вітрову турбіну доцільно розглядати як складову гібридної системи разом із СЕС.

Біоенергетичний потенціал фермерського господарства пов'язаний з утворенням органічних відходів у тваринництві та рослинництві. Якщо вважати, що сумарні обсяги гною, силосних та рослинних решток потенційно

еквівалентні 110 т сухої біомаси на рік із нижчою теплотою згоряння близько 3,5 кВт·год/кг, то загальний річний енергетичний потенціал біомаси становитиме:

$$E_{\text{біо,тепл}} = m \cdot q, \quad (2.7)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (2.7) отримаємо:

$$E_{\text{біо,тепл}} = 110000 \cdot 3,5 = 385000 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

За умови використання біогазової когенераційної установки з електричним ККД близько 0,25 річний потенціал виробництва електроенергії становитиме (ККД когенерації = 0,25):

$$E_{\text{біо,ел}} = E_{\text{біо,тепл}} \cdot 0,25, \quad (2.8)$$

Підставивши відповідні значення у формулу (2.8) отримаємо:

$$E_{\text{біо,ел}} = 385000 \cdot 0,25 = 96250 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

У таблиці 2.4 подано узагальнене порівняння річного енергетичного потенціалу трьох основних джерел.

Таблиця 2.4 – Порівняльний річний енергетичний потенціал ВДЕ для ФГ «ОЛКО»

Джерело енергії	Оціночний річний виробіток, кВт·год
Сонячна електростанція 30 кВт	33000
Вітрова турбіна 10 кВт	20000
Біогазова установка (електрична частина)	96250

На рисунку 2.10 подано графічне порівняння річних обсягів потенційної генерації. Видно, що за наведених припущень найбільший внесок у загальний енергобаланс може забезпечити біоенергетична складова, тоді як сонячна і вітрова генерація виступають як додаткові модулі, що підвищують гнучкість та стійкість системи електропостачання.

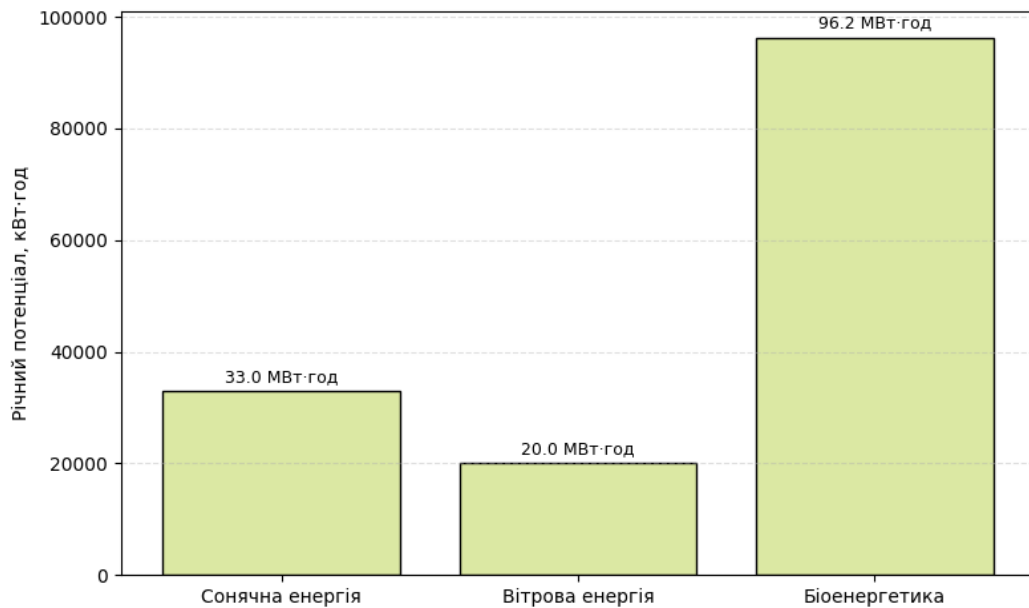


Рисунок 2.10 – Порівняльний річний енергетичний потенціал сонячної, вітрової та біоенергетики для ФГ «ОЛКО»

На рисунку 2.10 показано, що за наявних умов території фермерського господарства «ОЛКО» основним джерелом потенційної генерації може стати біоенергетика, яка забезпечує близько 96,2 МВт·год електроенергії на рік. Для порівняння, встановлена фотоелектрична система потужністю 30 кВт генерує приблизно 33,0 МВт·год, а вітрова турбіна потужністю 10 кВт – близько 20,0 МВт·год річної електроенергії. Це свідчить про те, що біоенергетичний компонент здатен покривати до 60...65 % потенційного річного споживання електроенергії господарства, тоді як сонячна та вітрова генерація виконують роль допоміжних модулів, що підвищують стійкість та гнучкість комбінованої системи енергопостачання.

2.4. Визначення можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії в існуючу інфраструктуру

Ефективність впровадження комбінованої енергетичної системи у ФГ «ОЛКО» значною мірою залежить від того, наскільки гармонійно сонячна,

вітрова та біоенергетична генерація можуть бути інтегровані в наявну електротехнічну інфраструктуру господарства. З огляду на сучасний стан електропостачання, який включає підключення до мережі 0,4 кВ та власну трансформаторну підстанцію 10/0,4 кВ, інтеграція ВДЕ повинна забезпечити стабільність режимів напруги, мінімізацію втрат та можливість роботи як у паралельному режимі з мережею, так і в режимі часткової автономії. Технічною базою для цього є наявні розподільні щити, резервні ізолятори та вільні осередки для підключення інверторних модулів.

Основним етапом інтеграції є визначення точок приєднання до шини 0,4 кВ для фотоелектричної системи та вітрової турбіни, а також виділення окремої групи навантажень для живлення від біогазової когенераційної установки. Сумарна потужність генерувальних модулів визначається рівнянням:

$$P_{ВДЕ} = P_{CEC} + P_{BEC} + P_{bio}, \quad (2.9)$$

де P_{CEC} – номінальна потужність фотоелектричної установки, кВт; P_{BEC} – потужність вітрової турбіни, кВт; P_{bio} – електрична потужність біогазової когенерації, кВт.

Для умов господарства сукупна встановлена потужність може становити до 50...60 кВт, що не перевищує допустимі величини для приєднання до існуючої трансформаторної підстанції.

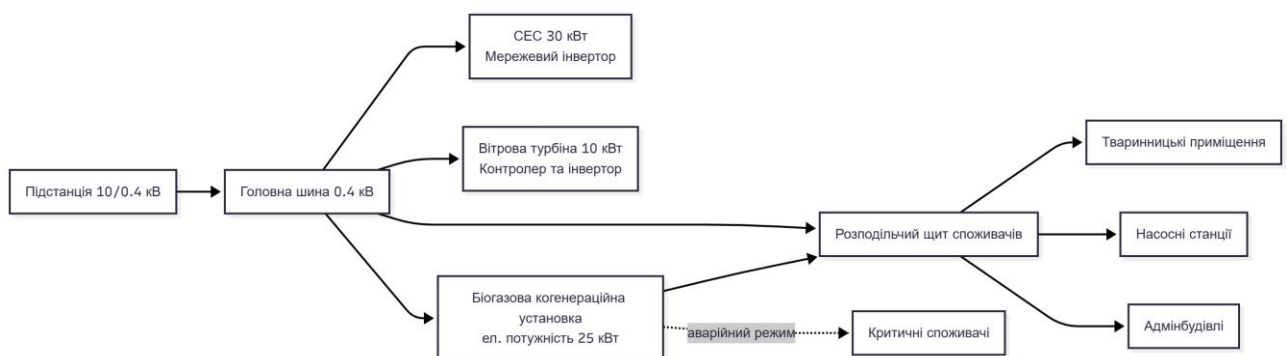


Рисунок 2.11 – Узагальнена схема інтеграції ВДЕ у наявну інфраструктуру електропостачання

Процес інтеграції значно спрощується завдяки використанню інверторів із можливістю роботи в режимі синхронізації з мережею. Це дає змогу мінімізувати перенапруги та уникнути зворотних потоків енергії. Для біогазової установки доцільним є підключення через автоматичний ввід резерву, що дозволяє забезпечити живлення критичних споживачів у разі аварійних режимів у мережі. Загальна структурна схема місць приєднання відновлюваних джерел енергії наведена нижче.

Аналіз наведеної схеми (рис. 2.11) показує, що всі три типи генерації можуть працювати у паралельному режимі з мережею без суттєвих перебудов електричної інфраструктури. Фотоелектрична станція та вітрова турбіна підключаються паралельно до головної шини через інверторні модулі, що забезпечують коректне узгодження фаз та напруги. Біогазова установка, на відміну від інших джерел, виконує також функцію резервного живлення, завдяки чому може бути спрямована на живлення стабільного навантаження у нічні години або в умовах низької генерації СЕС восени та взимку. З технічної точки зору таке рішення підвищує енергетичну автономність фермерського господарства та зменшує середньорічний обсяг електроенергії, що закуповується з мережі.

Оцінювання можливостей інтеграції ВДЕ до існуючої системи потребує також аналізу амплітудно-часових характеристик навантаження. Стабільність режиму визначається умовою:

$$P_{ген}(t) + P_{мережа}(t) = P_{спож}(t), \quad (2.10)$$

де $P_{ген}(t)$ – миттєва генерація всіх ВДЕ, кВт; $P_{мережа}(t)$ – частка потужності, що надходить з електричної мережі, кВт; $P_{спож}(t)$ – навантаження господарства у t -й момент часу.

З урахуванням добових коливань навантаження важливим є коректний розподіл навантаження між генераторами для забезпечення стабільності напруги.

Оцінку можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії подано у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Інтеграційна сумісність ВДЕ з наявною інфраструктурою
ФГ «ОЛКО»

Джерело енергії	Технічна можливість інтеграції	Потрібні зміни	Коментар
Сонячна станція 30кВт	Висока	Додати мережевий інвертор, автомат захисту	Працює паралельно з мережею; оптимальна для денного навантаження
Вітрова турбіна 10кВт	Середня	Контролер заряду, інвертор	Підходить для зимових та нічних періодів, але залежить від швидкості вітру
Біогазова установка 20...25кВт	Висока	АВР, інтеграція з критичними групами навантажень	Може працювати як резервне джерело; стабільна генерація цілий рік

Аналіз таблиці 2.5 свідчить, що найбільшу гнучкість щодо інтеграції має саме біоенергетична складова, оскільки вона здатна працювати незалежно від погодних умов та забезпечувати базове навантаження. Сонячна генерація є важливим доповненням у літній період, коли навантаження тваринницьких приміщень та зерносушарок значно зростає, тоді як вітрова генерація компенсує нестачу електроенергії у зимові місяці. Сукупне використання трьох джерел дозволяє створити збалансовану систему, що забезпечує енергетичну стійкість і значно знижує залежність господарства від зовнішніх джерел електропостачання.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

3.1. Однолінійна схема комбінованого електропостачання господарства

Проектування комбінованої системи електропостачання для ФГ «ОЛКО» ґрунтується на узгодженні характеристик споживання, параметрів локальної електричної інфраструктури та рівня доступного відновлюваного потенціалу, визначеного у другому розділі. Вихідною основою є перспективна однолінійна схема (рис. 3.1), яка демонструє можливість одночасного використання сонячних модулів, вітротурбін, біоенергетичної установки та акумуляторної системи (BESS). Застосування гібридної архітектури дає змогу сформувати адаптивну електроенергетичну систему, здатну працювати як у синхронізації з мережею, так і в автономному режимі при аваріях або дефіциті потужності.

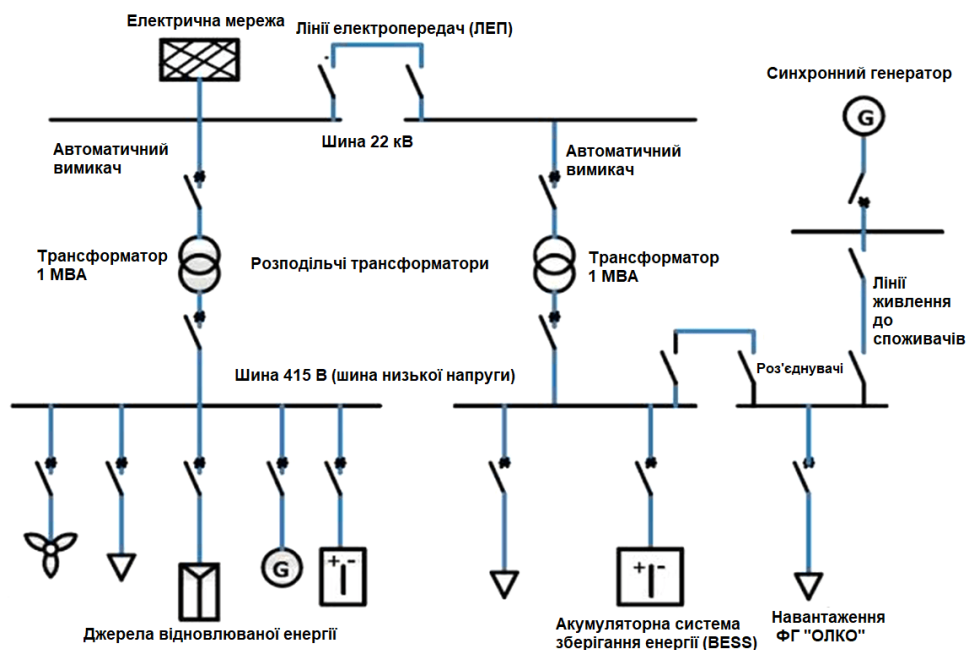


Рисунок 3.1 – Пропонована однолінійна схема комбінованого
електропостачання ФГ «Олко»

3.2. Вибір конфігурації комбінованої енергетичної системи електропостачання господарства

Формування комбінованої системи базується на аналізі чотирьох можливих архітектур, що різняться між собою рівнем автономності та інвестиційною складністю. Кожен варіант має переваги залежно від сезонних коливань генерації, пікових навантажень і доступності біомаси, сонячного та вітрового ресурсів.

Розглянемо конфігурацію комбінованої системи електропостачання «PV + BESS» (сонячні панелі + акумулятори) (рис. 3.2).

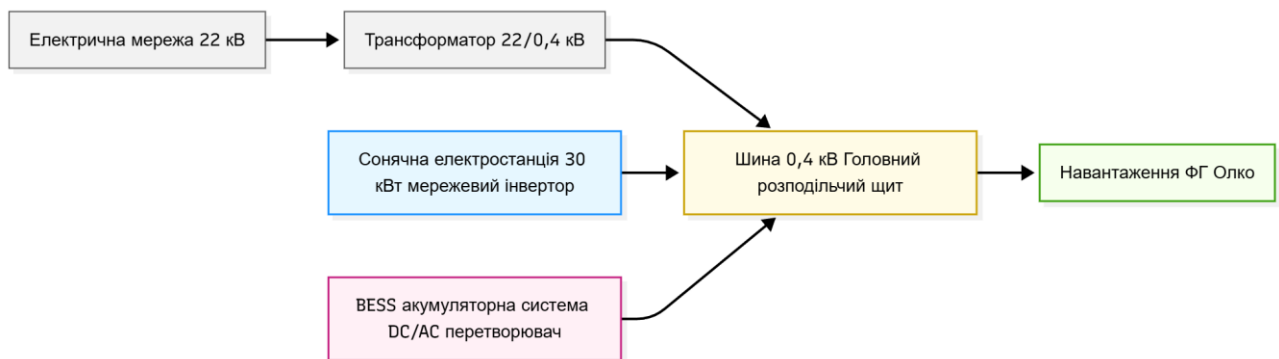


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи «PV + акумуляторна система (BESS)»

Ця схема передбачає інтеграцію фотоелектричної станції потужністю 30 кВт у шину 415 В із подальшим згладжуванням добових коливань генерації за допомогою BESS. У загальному вигляді баланс енергії описується формулою:

$$E_{\text{бал}}(t) = P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{BESS}}(t) - P_{\text{наг}}(t). \quad (3.1)$$

За результатами моделювання з використанням PVGIS річний виробіток становить $E_{\text{PV}} \approx 33000 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Цей варіант здатний покрити близько 25...28% потреб господарства, але є нестабільним у зимовий період, коли генерація зменшується до 900...1200 кВт·год/міс.

Розглянемо конфігурацію комбінованої системи електропостачання «PV + Вітер + BESS» (рис. 3.3).

Додавання вітротурбіни потужністю 10 кВт дозволяє зменшити сезонний дефіцит. Річна генерація:

$$E_{\text{wind}} \approx 20000 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (3.2)$$

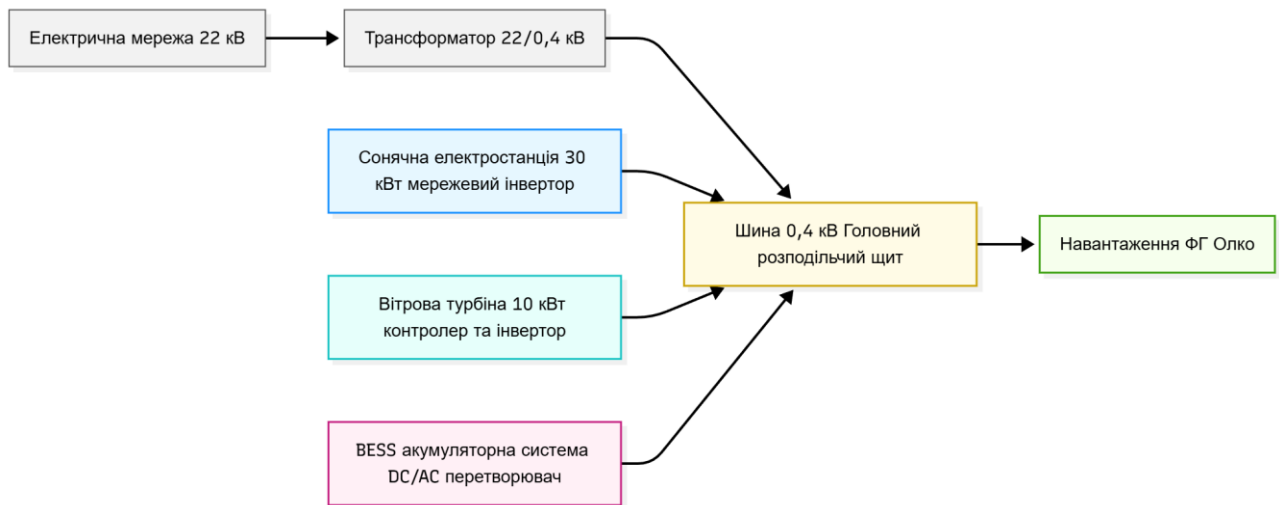


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи «СЕС + вітрова турбіна + BESS»

Вітровий потенціал у районі розташування господарства характеризується середньою швидкістю 4,3...5,1 м/с, що є достатнім для роботи малопотужних вітроустановок класу 10 кВт. Сумарний річний виробіток комбінованої системи зростає до 53...55 МВт·год, що дозволяє перекривати до 40 % річного навантаження.

Розглянемо конфігурацію комбінованої системи електропостачання «PV + Біогаз + BESS» (рис. 3.4).

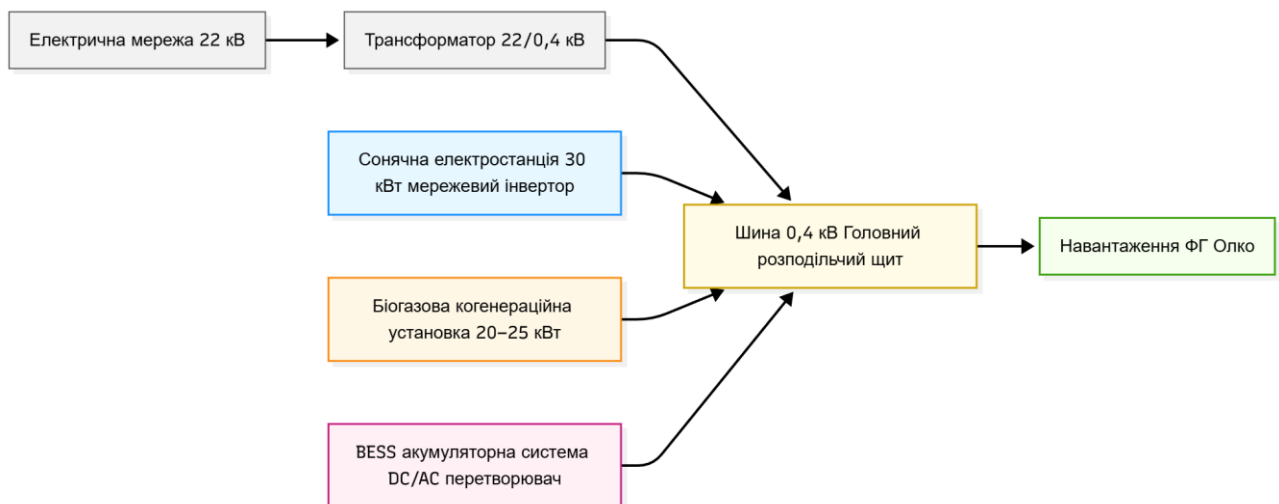


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи «СЕС + біогазова когенераційна установка + BESS»

У цій архітектурі біогазовий модуль є базовим джерелом електроенергії. За обсягом доступної біомаси 110 т/рік теплова енергія становить:

$$E_{bio, тепл} = 110000 \text{ кг} \cdot 3,5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг} = 385000 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (3.3)$$

За електричного ККД 0,25:

$$E_{bio, ел} = 96250 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}. \quad (3.4)$$

Біогазовий модуль стає ключовою складовою комбінованої системи, забезпечуючи до 65...70 % потреб фермерського господарства. Фотоелектрична станція та BESS працюють як стабілізуючі елементи, згладжуючи добові нерівномірності.

Розглянемо конфігурацію комбінованої системи електропостачання «PV + Вітер + Біогаз + BESS + мережа» (повна гібридизація) (рис. 3.5).

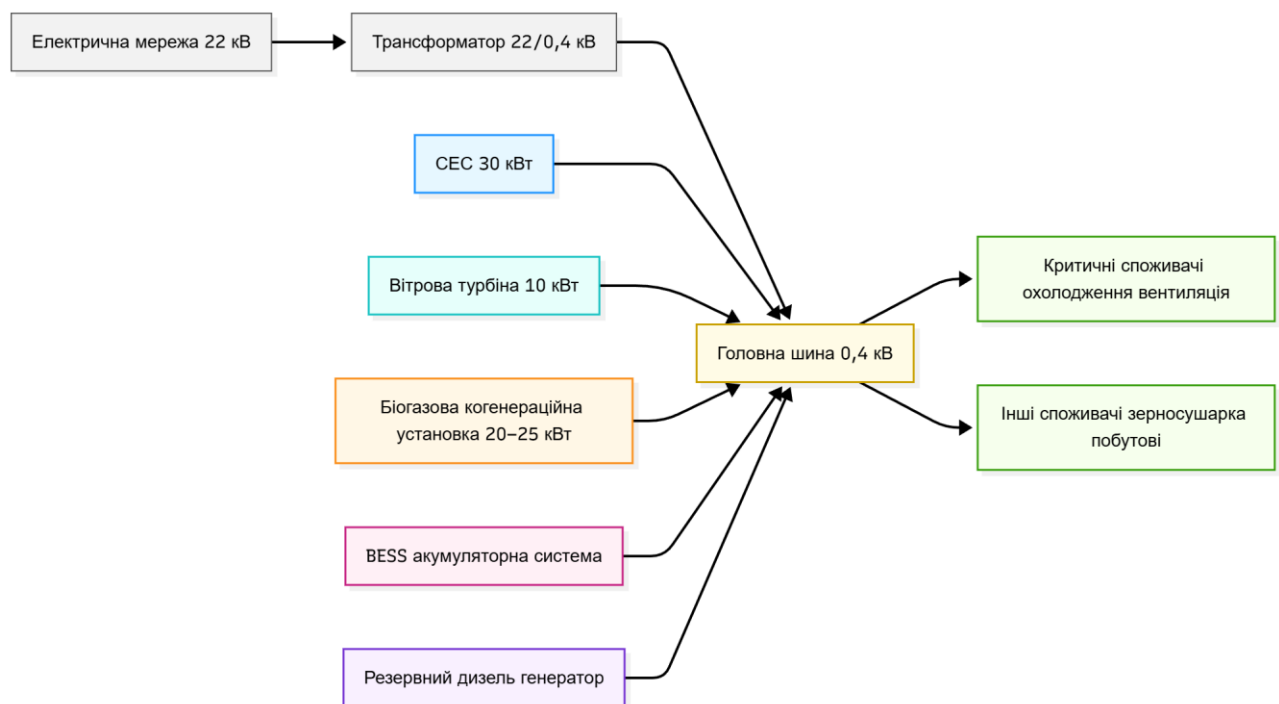


Рисунок 3.5 – Повна гібридна система електропостачання ФГ «ОЛКО»

Цей варіант є найбільш інвестиційно містким, але забезпечує максимальну надійність енергопостачання. Робота системи описується балансом:

$$P_{сист}(t) = P_{PV}(t) + P_{wind}(t) + P_{bio}(t) + P_{BESS}(t) + P_{grid}(t) - P_{наг}(t). \quad (3.5)$$

Наявність мережі дозволяє реалізувати режим «peak-shaving» та забезпечити аварійне резервування, що особливо важливо для тваринницьких об'єктів, де навіть короткочасне відключення живлення може спричинити втрати продуктивності.

Таблиця 3.1 – Порівняння варіантів конфігурації комбінованої енергетичної системи ФГ «ОЛКО»

Варіант системи	Річний виробіток, кВт·год	Рівень автономності, %	Основні переваги	Основні недоліки
PV + BESS	33000	28	Невисока вартість впровадження, проста інтеграція	Низький виробіток взимку, потреба у великому BESS
PV + Вітер + BESS	53000	43	Краще сезонне балансування, робота вночі	Нестабільність вітрового ресурсу
PV + Біогаз + BESS	129000	68	Стабільне базове джерело енергії, менша потреба в BESS	Необхідність безперервного біосубстрату
Повна гібридизація (PV + Вітер + Біогаз + BESS)	152000	92	Найвища надійність, майже повна автономність	Найбільші інвестиційні витрати

Розраховані параметри демонструють суттєві відмінності у потенціалі кожної з конфігурацій комбінованих систем електропостачання. Найпростішим рішенням є структура «PV + BESS», яка забезпечує близько 33 тис. кВт·год електроенергії на рік і дозволяє досягнути приблизно 28 % річної автономності. Таке рішення особливо ефективне у весняно-літній період, проте у зимові

місяці виникає дефіцит генерації, що обмежує можливість повного переходу на власні джерела.

Поєднання сонячної генерації з вітровою («PV + Вітер + BESS») підвищує загальний виробіток до 53 тис. кВт·год/рік, а рівень автономності зростає до 43 %. Це пояснюється тим, що вітрова турбіна частково компенсує низький вихід сонячної генерації в осінньо-зимовий період. Водночас залежність від швидкості вітру залишається суттєвим обмежувальним фактором.

Найбільш істотне зростання можливостей системи спостерігається при залученні біогазового модуля. Конфігурація «PV + Біогаз + BESS» дає змогу отримувати близько 129 тис. кВт·год/рік та забезпечує орієнтовно 68 % автономності. Біогазова когенераційна установка виступає стабільним базовим джерелом, здатним підтримувати навантаження незалежно від погодних умов. Це особливо важливо для тваринницьких і технологічних процесів, які потребують безперервного електропостачання.

Максимальних показників досягає комплексна система з повною гібридизацією ресурсів, яка генерує понад 152 тис. кВт·год електроенергії щороку та дозволяє досягнути 92 % реальної автономності. Такий варіант найбільш надійний і стійкий до зовнішніх факторів, оскільки поєднує переваги всіх джерел – фотоелектричної, вітрової та біогазової генерації, доповнених системою накопичення енергії. Основним його недоліком є висока вартість впровадження, проте саме він забезпечує найбільш ефективне та безпечне енергопостачання для фермерського господарства, яке прагне енергетичної незалежності.

Для подальших розрахунків доцільно обрати варіант комбінованої системи «PV + біогаз + BESS», оскільки саме він забезпечує оптимальний баланс між рівнем енергетичної автономності, надійністю електропостачання та реалістичністю впровадження для фермерського господарства «ОЛКО». За розрахунками річний виробіток такої системи становить близько 129000 кВт·год, що відповідає орієнтовно 68% покриття річної потреби господарства в

електроенергії. Це суттєво вище, ніж у конфігурації «PV + BESS» (33000 кВт·год і 28 % автономності) та «PV + вітер + BESS» (53000 кВт·год і 43% автономності), але водночас не потребує настільки великих капітальних витрат, як повна гібридизація з одночасним залученням усіх джерел.

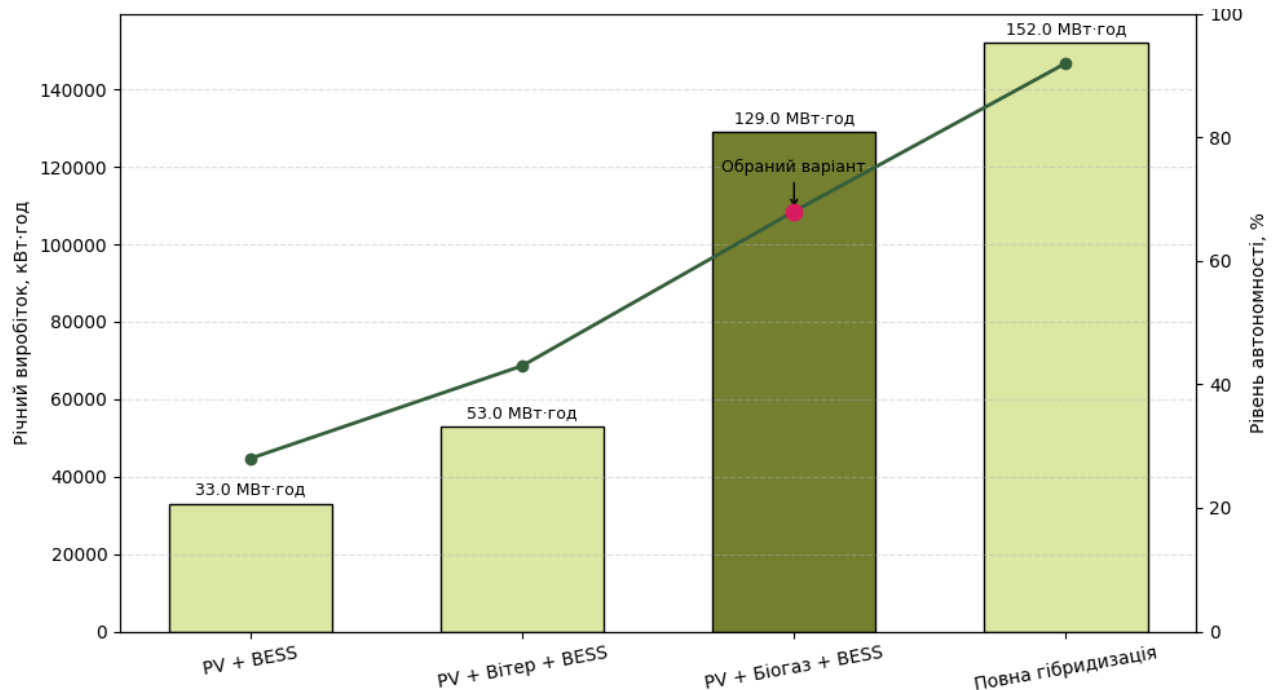


Рисунок 3.6 – Порівняння річного виробітку та рівня автономності різних конфігурацій комбінованої системи

Основною перевагою обраного варіанта є те, що біогазова когенераційна установка працює як базове джерело, здатне виробляти електроенергію незалежно від пори року та добових коливань сонячної радіації чи швидкості вітру. Це особливо важливо для тваринницьких приміщень, систем охолодження та вентиляції, для яких навіть короточасні перебої живлення є критичними. Фотоелектрична станція потужністю 30 кВт у цій конфігурації виконує роль денного пікового джерела в період високої сонячної активності, а акумуляторна система BESS згладжує короточасні дисбаланси між генерацією та навантаженням. Таким чином, варіант «PV + біогаз + BESS» забезпечує достатньо високий рівень енергетичної незалежності господарства, використовує наявний біоресурс (відходи тваринництва та рослинництва) і водночас залишає резерв для можливого подальшого масштабування системи у

напрямі повної гібридизації. Саме тому цей варіант є найбільш обґрунтованим для детальних інженерних та економічних розрахунків у наступних підрозділах роботи.

3.3. Розрахунок параметрів сонячної електростанції

Проектування сонячної електростанції для фермерського господарства «ОЛКО» виконується на основі поєднання двох груп вимог. З одного боку, потрібно забезпечити часткове покриття річного електроспоживання, а з іншого – узгодити параметри станції з рівнем сонячного потенціалу території, визначеним за даними сервісу PVGIS. За результатами аналізу навантаження господарства та потужностей інших модулів комбінованої енергосистеми доцільно орієнтуватися на те, щоб фотоелектрична підсистема покривала близько п'ятої частини річного споживання електроенергії. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного збільшення встановленої потужності СЕС, забезпечуючи при цьому помітне скорочення обсягів закупівлі електроенергії з мережі.

Оптимальна встановлена потужність сонячної електростанції визначається за цільовим річним виробітком і питомим енерговиробництвом на 1 кВт пікової потужності. Річне електроспоживання фермерського господарства становить порядку 160000 кВт·год, тоді для покриття приблизно 20% потреб цільовий річний енерговиробництво СЕС становить на рівні 32000 кВт·год. Питомий річний виробіток однієї кіловат-установки в умовах Волинської області за результатами PVGIS для кута нахилу 35° і орієнтації на південь становить близько 1070...1080 кВт·год/кВт·рік. Таким чином, оптимальна потужність СЕС визначається з виразу:

$$P_{opt} = \frac{E_y}{Y_{cn}}. \quad (3.6)$$

де E_y – цільовий показник річного енерговиробництва, кВт·год; Y_{cn} – питомий енерговиробіток, кВт·год/кВт·рік.

Підставивши значення у формулу (3.6) отримаємо:

$$P_{opt} = \frac{32000}{1075} \approx 29,8 \text{ кВт}.$$

Отриманий результат з інженерних міркувань доцільно округлити до 30 кВт. Отже, у подальших розрахунках доцільно прийняти встановлену потужність фотоелектричної станції $P_{CEC} = 30 \text{ кВт}$.

Орієнтація та кут нахилу фотоелектричних модулів впливають на річний енерговиробіток не менше, ніж сама встановлена потужність. Для географічної широти фермерського господарства «ОЛКО» (близько 51° пн. ш.) оптимальний кут нахилу панелей для цілорічної роботи за емпіричними співвідношеннями може бути оцінений як:

$$\beta_{opt} \approx \varphi - 10^\circ. \quad (3.7)$$

де φ – географічна широта місцевості.

Підставивши $\varphi \approx 51^\circ$, отримаємо

$$\beta_{opt} \approx 51^\circ - 10^\circ = 41^\circ.$$

Водночас розрахунки PVGIS показують, що практичний максимум річної генерації досягається при нахилі $30\text{--}35^\circ$. З огляду на компроміс між річним виробітком і конструктивними обмеженнями несучих металоконструкцій доцільно обрати кут нахилу 35° і орієнтацію модулів на південь (азимут 0°).

Річний енерговиробіток СЕС може бути оцінений через питомий енерговиробіток та встановлену потужність за формулою:

$$E_{річ} = P_{CEC} \cdot Y_{cn}. \quad (3.8)$$

Для обраної конфігурації $P_{CEC} = 30 \text{ кВт}$ і $Y_{cn} \approx 1075 \text{ кВт·год} / \text{кВт·рік}$ річний виробіток становитиме:

$$E_{річ} = 30 \cdot 1075 \approx 32250 \text{ кВт·год} / \text{рік}.$$

Це добре узгоджується з результатами моделювання PVGIS. При цьому обчислюється також коефіцієнт ефективності або коефіцієнт продуктивності

(performance ratio, PR), який характеризує частку корисної енергії на виході інвертора відносно теоретично можливої енергії, що надходить від сонячного випромінювання:

$$P_R = \frac{E_{AC}}{P_{ном} \cdot \frac{H_{\beta}}{G_{стц}}} \quad (3.9)$$

де E_{AC} – річна електроенергія на змінному боці, кВт; $P_{ном}$ – номінальна потужність панелей при стандартних умовах, кВт; H_{β} – річне опромінення на площину з нахилом β ; $G_{стц} = 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$ – еталонне опромінення при стандартних умовах.

За результатами PVGIS для обраної конфігурації P_R знаходиться у діапазоні 0,78...0,8, що відповідає сучасним мережевим фотоелектричним станціям з урахуванням температурних втрат, втрат у кабелях, інверторах та забрудненні модулів.

3.4. Структурна схема підключення СЕС до системи електропостачання фермерського господарства

Структурно інтеграція сонячної електростанції у систему електропостачання фермерського господарства реалізується через мережевий інвертор, що працює в паралельному режимі з існуючою мережею 0,4 кВ. На рисунку 3.7 наведено узагальнену електричну схему підключення СЕС до внутрішньої мережі господарства.

Розглянута схема (рис. 3.7) ілюструє типовий варіант інтеграції фотоелектричної системи до низьковольтної електричної мережі фермерського господарства. На вході системи розташована фотомодульна матриця, що складається з послідовно з'єднаних панелей. Вихідна постійна напруга та струм формуються у вузлі PV Array Junction Box, де виконується з'єднання модулів та первинний захист від перенавантажень і коротких замикань. Далі ланцюг

містить розмикач постійного струму, який забезпечує можливість безпечного відключення масиву PV від інвертора під час технічного обслуговування або аварійних робіт.

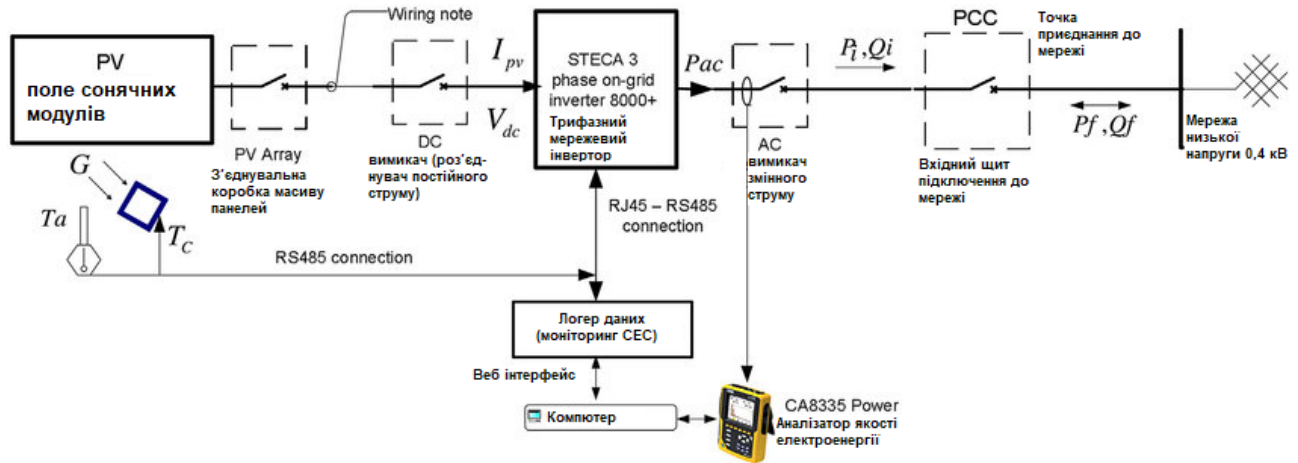


Рисунок 3.7 – Спрощена структурна схема підключення СЕС до системи електропостачання фермерського господарства

Після секції DC Switch струм надходить до трифазного мережевого інвертора STECA 8000+, що виконує перетворення постійної напруги V_{dc} у змінний трифазний струм з параметрами, синхронізованими з мережею. Важливою складовою є алгоритм MPPT, реалізований усередині інвертора, який забезпечує відстеження точки максимальної потужності фотомодулів залежно від зміни інтенсивності сонячного випромінювання, температури та електричних параметрів навантаження. Для цілей моніторингу інвертор підключено до системи SolarLog 300 PM+, яка передає дані на комп'ютер через Web-інтерфейс, дозволяючи отримувати статистику роботи, коефіцієнти втрат, миттєву та інтегральну потужність установки.

На стороні змінного струму передбачено AC Disconnect Switch, який виконує роль комутаційного апарата для швидкого відключення інвертора від мережі. Далі струм надходить до кабінету Grid Connection Cabinet, у якому встановлено лічильники параметрів мережі, захисні апарати та вузол точки комерційного обліку PCC. У цій точці вимірюються активні та реактивні

потужності P_f та Q_f , що передаються до загальної низьковольтної мережі ферми. Для аналізу якості електроенергії передбачено підключення CA8335 Power Quality Analyzer, що дозволяє фіксувати гармонічні спотворення, перехідні процеси, асиметрію фаз та інші критичні параметри для гарантування надійної роботи навантажень.

Таблиця 3.2 – Розшифрування елементів на схемі

Позначення на схемі	Опис	Пояснення функції
PV Array (28 Module)	Поле сонячних модулів	Фотопанелі, що генерують DC-струм
PV Array Junction Box	З'єднувальна коробка масиву панелей	Комбінування стрінгів та захист
DC Disconnect Switch	DC вимикач (роз'єднувач постійного струму)	Ручне відключення масиву
STEC A 3 phase on-grid inverter 8000+	Трифазний мережевий інвертор	Перетворення DC $\rightarrow$ AC та синхронізація з мережею
AC Disconnect Switch	AC вимикач змінного струму	Захист інвертора та можливість відключення
P_{AC}, Q_i	Активна та реактивна потужність від інвертора	Параметри виробітку
PCC (Point of Common Coupling)	Точка присіднання до мережі	Місце, де СЕС підключається до шини ферми
Grid Connection Cabinet	Вхідний щит підключення до мережі	Автоматика, реле, захист
Low Voltage Network	Мережа низької напруги 0,4 кВ	Загальна електромережа споживачів ферми
Solar Log 300 PM+	Логер даних (моніторинг СЕС)	Збір даних, веб-інтерфейс
CA8335 Power Quality Analyzer	Аналізатор якості електроенергії	Контроль параметрів мережі
T_a, T_c, G	Датчики температури повітря, панелі, сонячного випромінювання	Дані для моніторингу й точного вимірювання продуктивності

Система містить також датчики сонячної радіації G , температури повітря T_a та температури модулів T_c , підключені до SolarLog через RS485. Це

забезпечує коректний облік характеристик сонячного ресурсу та дає можливість деталізувати втрати, пов'язані з перегрівом, забрудненням або деградацією панелей. Отримані параметри використовуються для верифікації фактичного виробітку та оптимізації розташування фотомодулів.

Загалом схема демонструє повний технологічний цикл роботи мережевої СЕС – від генерації постійного струму до введення змінної енергії у низьковольтну мережу фермерського господарства. Її структура відповідає сучасним міжнародним вимогам ІЕС щодо безпеки, контролю та вимірювання. Особливо цінною складовою є розвинена система моніторингу, яка забезпечує автоматичний збір даних, виявлення аномалій та формування звітів, що має ключове значення для енергоаудиту, планування комбінованих систем електропостачання та подальшої оптимізації схем інтеграції ВДЕ.

З огляду на суттєву сезонну нерівномірність сонячного ресурсу доцільно розглянути розподіл річної генерації за сезонами. Узагальнені оцінки, отримані на основі результатів PVGIS для потужності 30 кВт, наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Орієнтовний сезонний енерговиріток СЕС потужністю 30 кВт

Сезон	Енерговиріток, кВт·год	Частка від річної генерації, %
Зима (грудень–лютий)	3200	10
Весна (березень– травень)	10000	31
Літо (червень–серпень)	12400	39
Осінь (вересень– листопад)	6400	20
Разом за рік	32000	100

Аналіз даних таблиці 3.3 показує, що найбільша частка генерації припадає на літній період, коли сумарний енерговиріток сягає близько 12,4 тис. кВт·год, що становить майже 40% річної генерації. Весняні місяці

забезпечують ще приблизно 10 тис. кВт·год, або близько 31% від річного обсягу. Восени виробіток знижується до орієнтовно 6,4 тис. кВт·год, а узимку СЕС генерує лише близько 3,2 тис. кВт·год, що відповідає приблизно 10% річної енергії. Такий сезонний розподіл добре відображає реальні кліматичні умови Західної України і підтверджує необхідність поєднання фотоелектричної генерації з іншими джерелами, зокрема з біогазовою установкою та системою накопичення енергії, щоб забезпечити стабільний енергетичний баланс фермерського господарства «ОЛКО» протягом усього року.

3.5. Розрахунок параметрів додаткових джерел енергії

Після визначення параметрів сонячної електростанції наступним кроком є обґрунтування характеристик додаткових джерел енергії, які мають забезпечити підвищення рівня автономності комбінованої системи електропостачання фермерського господарства «ОЛКО». Згідно з побудованими раніше графіками електроспоживання річна потреба господарства становить близько $E_{\text{спож}} = 160000 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{рік}$. При прийнятій встановленій потужності сонячної електростанції $P_{\text{СЕС}} = 30 \text{ кВт}$ розрахунковий річне енерговиробництво складає приблизно $E_{\text{СЕС}} \approx 32000 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{рік}$, що відповідає частці близько 20% від сумарного споживання господарством. Отже, для досягнення цільового рівня автономності на рівні 70...80 % необхідно залучити додаткові джерела генерації та систему накопичення енергії, здатні покривати решту навантаження в періоди низької сонячної активності.

Найперспективнішою для умов господарства є біоенергетична складова, що базується на використанні відходів тваринництва та рослинництва. Якщо вважати, що на території ферми щороку накопичується близько $m_{\text{біо}} = 110 \text{ т}$ сухої біомаси з нижчою теплотою згоряння $q_{\text{н}} \approx 3,5 \text{ кВт}\cdot\text{год} / \text{кг}$, тоді річний тепловий потенціал біомаси можна оцінити виразом:

$$E_{bio,менл} = m_{bio} \cdot q_n = 110000 \cdot 3,5 \approx 385000 \text{ кВт·год}. \quad (3.10)$$

За умови використання біогазової когенераційної установки з електричним ККД $\eta_{ел} \approx 0,25$ річний електричний потенціал становитиме:

$$E_{bio,ел} = E_{bio,менл} \cdot \eta_{ел} \approx 385000 \cdot 0,25 \approx 96250 \text{ кВт·год} / \text{рік}. \quad (3.11)$$

Це відповідає приблизно 60 % від річного електроспоживання ферми, що дозволяє розглядати біогазову когенераційну установку як базове джерело електроенергії. Для визначення номінальної електричної потужності такої установки приймаємо, що вона працює у режимі тривалого навантаження протягом близько 8000 годин на рік, тоді:

$$P_{bio} = \frac{E_{bio,ел}}{t_{роб}} \approx \frac{96250}{8000} \approx 12 \text{ кВт}. \quad (3.12)$$

Отже, з точки зору енергетичного балансу доцільно обрати когенераційну установку номінальною потужністю $P_{bio} = 12 \text{ кВт}$, яка працюватиме як базове джерело за змінної фотоелектричної генерації. Відповідний коефіцієнт використання встановленої потужності для біогазового модуля становитиме:

$$CF_{bio} = \frac{E_{bio,ел}}{P_{bio} \cdot 8760} \approx \frac{96250}{12 \cdot 8760} \approx 0,92. \quad (3.13)$$

Це свідчить про його близьку до безперервної роботу. Для порівняння, коефіцієнт використання встановленої потужності сонячної електростанції:

$$CF_{CEC} = \frac{E_{CEC}}{P_{CEC} \cdot 8760} \approx \frac{32000}{30 \cdot 8760} \approx 0,12. \quad (3.14)$$

Це відповідає типовим значенням для фотоелектричних установок у помірному кліматі.

Система накопичення енергії необхідна для згладжування різниці між генерацією та навантаженням у денні та нічні періоди, а також для забезпечення резерву живлення критичних споживачів у разі збоїв зовнішньої мережі. Якщо прийняти, що середньодобове споживання електроенергії становить:

$$E_{доб} = \frac{E_{спож}}{365} \approx \frac{160000}{365} \approx 438 \text{ кВт·год} / \text{добу}. \quad (3.15)$$

Середня потужність критичних споживачів (системи охолодження, вентиляція, автоматика тваринницьких приміщень) складає близько $P_{кр} = 15 \text{ кВт}$, тоді для забезпечення не менше 4 годин автономної роботи цих навантажень необхідна ємність акумуляторної батареї:

$$C_{BESS, корисна} = P_{кр} \cdot t_{рез} = 15 \cdot 4 = 60 \text{ кВт год.} \quad (3.16)$$

З урахуванням допустимої глибини розряду $DoD \approx 0,8$ розрахункова номінальна ємність системи накопичення:

$$C_{BESS, ном} = \frac{C_{BESS, корисна}}{DoD} \approx \frac{60}{0,8} = 75 \text{ кВт год.} \quad (3.17)$$

Потужність перетворювального модуля системи накопичення доцільно обрати на рівні 30...40 % від встановленої потужності сонячної електростанції, що забезпечить можливість швидкого заряду в періоди пікової генерації. Тоді номінальна потужність BESS інвертора:

$$PP_{BESS} \approx 0,35 \cdot P_{CEC} \approx 0,35 \cdot 30 \approx 10,5 \text{ кВт.} \quad (3.18)$$

Приймаємо як 10...12 кВт залежно від доступних типорозмірів обладнання.

Узагальнюючі результати розрахунку параметрів додаткових джерел енергії та системи накопичення для умов фермерського господарства «ОЛКО» наведено в таблиці 3.4.

Сумарні річні обсяги генерації власних джерел енергії – сонячної електростанції та біогазового когенераційного модуля – становлять приблизно $32\,000 + 96\,250 = 128\,250 \text{ кВт год}$ на рік, що відповідає близько 80% від річного електроспоживання ферми. Решта приблизно 20% (орієнтовно $32\,000 \text{ кВт год}$) покривається за рахунок зовнішньої електромережі. Вартість обладнання сонячної електростанції на 30 кВт оцінена на рівні близько 900 тис. грн, що включає фотомодулі, інвертор, кріплення, кабельну продукцію та захисну апаратуру.

Таблиця 3.4 – Вибрані параметри додаткових джерел енергії, системи накопичення та орієнтовна вартість обладнання

Елемент системи	Номінальна потужність / ємність	Орієнтовний річний виробіток, кВт·год	Орієнтовна частка в покритті навантаження, %	Марка / типове обладнання	Кількість, од.	Оціночна вартість, тис. грн
Сонячна електростанція (СЕС)	30 кВт	32 000	20	Монокристалічні модулі 550 Вт (типу Jinko / Longi) + мережевий інвертор 30 кВт (типу Huawei Sun2000-30KTL)	56 модулів по 0,55 кВт + 1 інвертор	≈ 900
Біогазова когенераційна установка	12 кВт (електрична потужність)	96 250	60	Біогазовий когенераційний агрегат 12 кВт (на базі газового двигуна типу Jenbacher / MAN), біогазовий реактор об'ємом 200–250 м³	1 установка + 1 реактор + допоміжне обладнання	≈ 2 400
Система накопичення енергії (BESS)	10...12 кВт / 75 кВт·год	–	Забезпечення до 4 год резерву критичних навантажень	Літій-залізо-фосфатні батареї 48 В, 100...200 А·год + гібридний інвертор 10...12 кВт (типу Victron / Huawei LUNA)	1 інвертор + батарейні шафи сумарною ємністю 75 кВт·год	≈ 1 050
Зовнішня електромережа	–	≈ 32 000	20	Ввідний щит, лічильник, існуючі мережі 0,4 кВ оператора системи розподілу	–	витрати на приєднання та тарифну оплату (не капітальні витрати)

Біогазовий комплекс з електричною потужністю 12 кВт разом із реактором, газгольдером, системою підготовки біогазу та когенераційним агрегатом потребує найбільших капіталовкладень – орієнтовно 2,4 млн грн, але саме цей модуль забезпечує основну частку річної генерації.

Система накопичення енергії потужністю 10–12 кВт та ємністю близько 75 кВт·год характеризується порівняно високою питомою вартістю: орієнтовно 1,05 млн грн, проте вона не додає значної річної генерації, а виконує функцію підвищення надійності та гнучкості комбінованої системи. За рахунок BESS ферма може до 4 годин підтримувати роботу критичних споживачів (системи охолодження молока, вентиляція тваринницьких приміщень, автоматика) навіть у випадку зникнення напруги як від біогазової установки, так і від зовнішньої мережі. Якщо підсумувати капітальні витрати на основні елементи, орієнтовна вартість створення комбінованої системи електропостачання на базі СЕС 30 кВт, біогазового модуля 12 кВт та BESS 75 кВт·год становить близько 4,35 млн грн, що надалі може бути використано в розділі економічного обґрунтування для розрахунку строку окупності й інтегрального економічного ефекту.

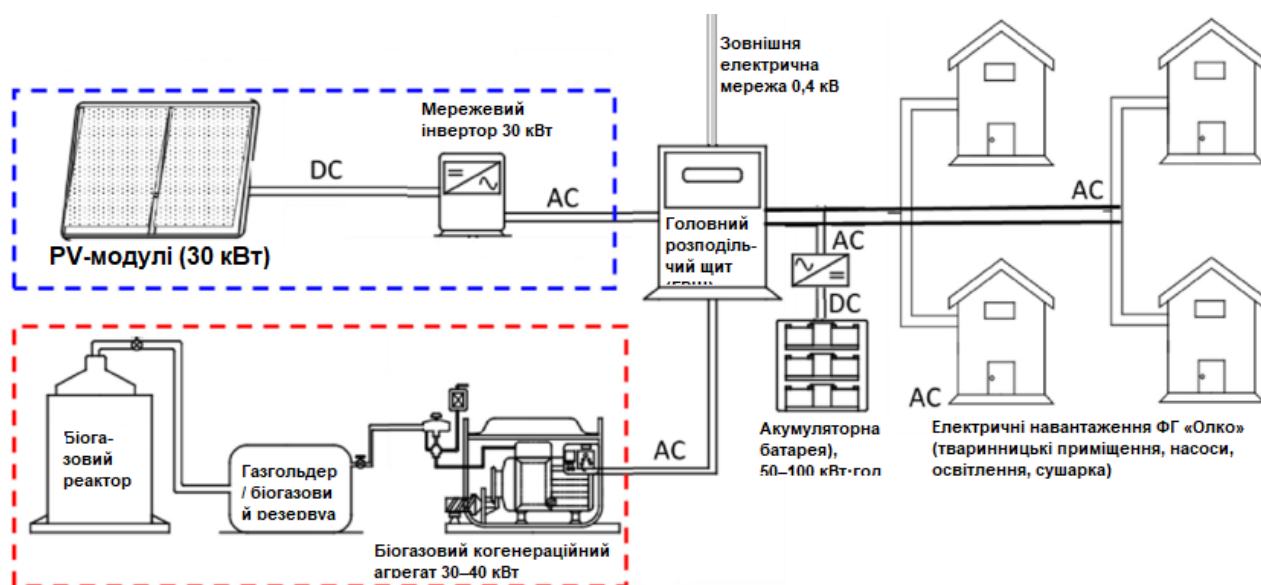


Рисунок 3.8 – Структурна схема комбінованої системи електропостачання фермерського господарства з PV-модулями, біогазовою когенераційною установкою та системою накопичення енергії

Наведена структурна схема ілюструє взаємодію основних елементів комбінованої енергосистеми фермерського господарства та відображає потоки енергії від різних джерел до кінцевого споживання. У верхньому лівому блоці показано фотоелектричну установку потужністю 30 кВт, яка генерує постійний струм, перетворюваний мережевим інвертором у змінний струм для подальшої подачі на головний розподільчий щит. Біогазовий комплекс, розташований у нижній частині схеми, включає реактор, газгольдер та когенераційний агрегат потужністю 30...40 кВт, що забезпечує стабільну генерацію електроенергії незалежно від сезонних коливань сонячної активності.

У центральній частині схеми розташований головний розподільчий щит, який виконує функції балансування потоків енергії та синхронізації роботи різних джерел. Саме в цьому вузлі здійснюється розподіл електроенергії між навантаженнями фермерського господарства, системою накопичення енергії (50–100 кВт·год) та зовнішньою мережею 0,4 кВ. Акумуляторні батареї, під'єднані через блок перетворення DC/AC, забезпечують резервне живлення критичних споживачів у періоди пікових навантажень або нестачі генерації.

Електричні навантаження господарства представлені групою будівель та об'єктів, до яких належать тваринницькі приміщення, насосні станції, освітлення та обладнання для сушіння продукції. Всі ці споживачі отримують електроенергію з узгодженого енергетичного потоку, що формується комбінацією сонячної генерації, біогазової установки та зовнішньої мережі.

Загалом схема демонструє логічну і збалансовану конфігурацію комбінованої енергетичної системи, де сонячна генерація забезпечує денний профіль виробітку, біогазовий комплекс – базове навантаження, а система накопичення – стабілізацію режимів роботи. Така структура дає можливість підвищити енергоефективність та автономність фермерського господарства, а також зменшити залежність від зовнішньої електромережі.

З наведеної схеми видно, що всі джерела енергії працюють паралельно на спільну шину 0,4 кВ, а розподіл потоків потужності між ними визначається поточними режимами генерації, станом заряду акумуляторної батареї та

величиною навантаження. Така конфігурація забезпечує гнучке керування енергетичними потоками й дозволяє побудувати надійну, стійку до зовнішніх впливів систему електропостачання фермерського господарства, придатну до подальшого нарощування потужностей відновлюваних джерел.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз шкідливих чинників та їх джерела

У процесі експлуатації комбінованої енергетичної системи фермерського господарства виникає низка небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які впливають на персонал під час роботи з сонячними модулями, інверторним обладнанням, біогазовою когенераційною установкою та акумуляторними батареями. Серед основних загроз домінують електричні ризики, пов'язані з роботою в мережах 0,4 кВ, а також термічні та хімічні фактори, характерні для біогазових процесів. Важливе значення має оцінка можливих джерел небезпек, що дозволяє сформулювати комплекс превентивних заходів до моменту введення обладнання в експлуатацію.

Шкідливі чинники проявляються по-різному на кожному етапі роботи системи. Фотоелектричні модулі створюють ризик ураження електричним струмом навіть у вимкненому стані, оскільки вони генерують напругу при освітленні. Інверторні системи є джерелом підвищеного тепловиділення, а також електромагнітних полів. Біогазова установка створює специфічні небезпеки, пов'язані з виділенням метану, сірководню, підвищеною вологістю та ризиком вибуху газоповітряних сумішей. Акумуляторна батарея становить хімічну небезпеку через можливе виділення водню під час перезаряду та ризик витоку електроліту. Сукупність усіх цих чинників вимагає системного підходу до організації охорони праці.

Порівняння чинників у таблиці 4.1 вказує, що найбільшу небезпеку становлять системи, які працюють з хімічними речовинами та газами, зокрема біогазовий реактор і акумуляторні батареї. Метан, що утворюється під час анаеробного зброджування, формує вибухонебезпечні концентрації вже при вмісті близько 5 %, а сірководень чинить токсичну дію при концентраціях від 50 ppm. Акумуляторні батареї під час інтенсивного циклу заряду можуть

виділяти водень, концентрація якого 4 % у повітрі створює ризик спалахування. Електрична мережа 0,4 кВ також становить високий рівень небезпеки через струми короткого замикання, здатні викликати миттєвий дуговий розряд.

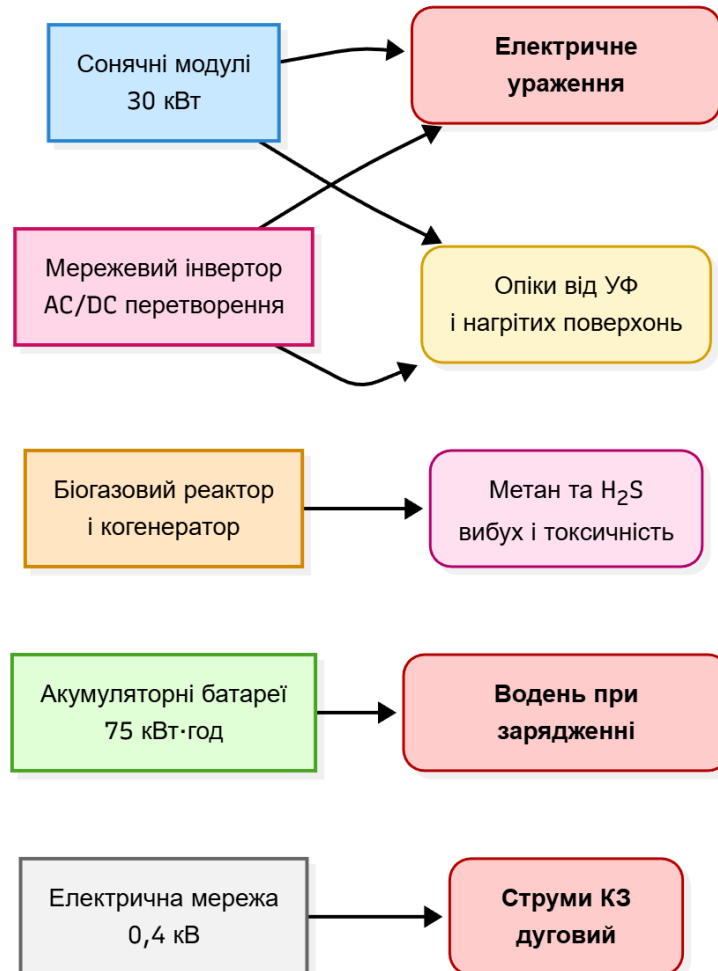


Рисунок 4.1 – Схема основних джерел шкідливих виробничих чинників

Сонячні модулі генерують небезпечну напругу навіть у вимкненому стані, що зумовлює постійну електричну загрозу під час технічного обслуговування. Інверторні установки є обладнанням із підвищеним тепловиділенням, а температури поверхні 70–80 °С створюють ризики термічних опіків.

Таблиця 4.1 – Шкідливі та небезпечні чинники, характерні для комбінованої енергетичної системи

Джерело	Основні чинники	Характер впливу	Потенційні наслідки
Сонячні модулі 30 кВт	Постійна напруга 600–1000 В, УФ-випромінення	Електричний та опромінювальний фактор	Ураження струмом, опіки, пошкодження зору
Мережевий інвертор	Високі температури, ЕМ-поля	Термічний та електромагнітний фактор	Перегрів, опіки, погіршення самопочуття
Біогазовий реактор і когенератор	Метан, сірководень, шум до 85 дБ	Хімічний, вибуховий, акустичний	Отруєння, вибух, втрати слуху
Акумуляторні батареї 75 кВт·год	Виділення водню, електроліт	Пожежонебезпечний та хімічний фактор	Загоряння приміщення, опіки, корозія
Електромережа 0,4 кВ	Струм короткого замикання, дуговий розряд	Електричний та термічний фактор	Ураження струмом, пожежа, травми

Сукупність виявлених небезпечних чинників підтверджує необхідність запровадження спеціальних технічних та організаційних заходів безпеки, що включають вентиляцію газових приміщень, заземлення всього обладнання, використання захисних засобів та регулярний технічний огляд.

4.2. Створення безпечних умов праці під час електропостачання фермерського господарства

Безпечна експлуатація системи електропостачання фермерського господарства ґрунтується на комплексі технічних, організаційних та інструктажних заходів, спрямованих на запобігання ураженню персоналу електричним струмом, попередження пожеж, вибухів та аварійних режимів роботи обладнання. В умовах комбінованої енергетичної системи, що включає

сонячну електростанцію, біогазову когенераційну установку та систему накопичення енергії, рівень ризиків суттєво зростає через одночасну дію високої напруги, постійного струму, газових середовищ та хімічних компонентів. Тому формування безпечних умов праці потребує адаптації до специфіки кожного елемента енергетичної інфраструктури.

Під час роботи з фотоелектричними модулями найбільшу небезпеку становить генерація напруги до 1000 В постійного струму, яка зберігається навіть при відключенні інвертора. З цієї причини вимикачі навантаження та пристрої розмикання постійного струму повинні встановлюватися на доступних ділянках із чіткими попереджувальними позначеннями. Інверторні установки потребують забезпечення вентиляції для запобігання перегріву та захисту персоналу від контактів із нагрітими поверхнями. Для біогазової установки необхідно дотримуватися норм вибухозахисту, регулярно контролювати концентрації метану та сірководню, а реакторне приміщення повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією. Акумуляторні батареї вимагають захисту від коротких замикань, контролю температури та утримання в сухому середовищі із мінімізованим ризиком розливу електроліту чи утворення газових домішок.

Усі роботи, що виконуються з обладнанням, повинні проводитися персоналом, який має відповідну групу електробезпеки. Працівники повинні забезпечуватися діелектричними рукавицями, килимками, інструментом з ізоляційним покриттям та переносними заземленнями. Усі електроустановки ферми потребують регулярного огляду, перевірки цілісності кабельних ліній, стану запобіжників, автоматичних вимикачів, систем захисного відключення (УЗО) та контуру заземлення. Особливої уваги потребує точка комутації комбінованої системи з електромережею, оскільки невірна синхронізація або відмова інверторів можуть викликати аварійний зворотний потік енергії.

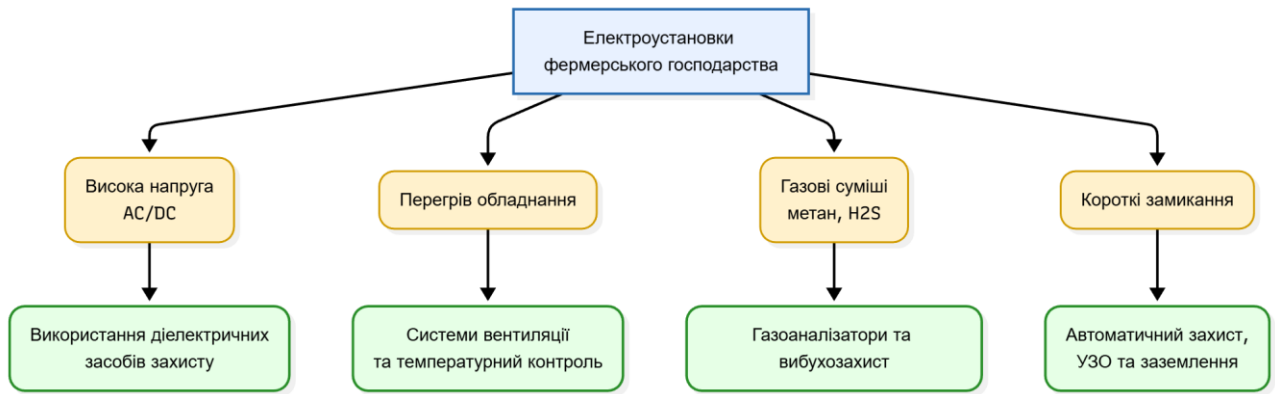


Рисунок 4.2 – Кольорова схема заходів забезпечення безпечної роботи електроустановок фермерського господарства

Таблиця 4.2 – Основні заходи створення безпечних умов праці в системі електропостачання

Джерело небезпеки	Характер загрози	Необхідні профілактичні заходи
Фотоелектричні модулі	Постійна напруга до 1000 В	Використання DC-вимикачів, попереджувальних написів, роботи у світлонепроникному одязі
Мережеві інвертори	Перегрів, електромагнітні поля	Охолодження, регулярне техобслуговування, контроль температури корпусу
Біогазовий реактор	Метан, сірководень, вибухонебезпечність	Газоаналіз, вентиляція, вибухозахищене обладнання, ізоляція електрики
Акумуляторні батареї	Водень, короткі замикання	Контроль вентиляції, температури, герметичність корпусів, запобіжники
Електромережа 0,4 кВ	Струми КЗ, дуговий розряд	УЗО, автоматичні вимикачі, регулярна перевірка заземлення

Проведений аналіз дає можливість сформулювати системний підхід до організації безпечних умов праці при експлуатації енергетичного обладнання фермерського господарства. Головним є врахування специфіки різних джерел небезпек: постійної напруги від сонячних модулів, теплових навантажень інверторів, газовиділення біогазової установки та хімічних процесів у акумуляторах. Реалізація комплексу технічних заходів – вентиляції,

газоаналізу, заземлення, використання діелектричних засобів, перевірок УЗО та автоматичної комутаційної апаратури – дозволяє суттєво знизити ризики для персоналу й забезпечити надійну та стабільну роботу комбінованої системи електропостачання.

4.3. Розрахунок заземлення

Заземлювальний пристрій у системі електропостачання фермерського господарства виконує функцію захисту людей і обладнання від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, а також знижує ризик виникнення пожежі через струми замикання на корпус. Для електроустановок напругою до 1000 В, характерних для комбінованої системи електропостачання фермерського господарства, у більшості нормативних документів приймають граничний опір заземлення не більше $R_{\text{дон}} = 10 \text{ Ом}$. Розрахунок заземлювального пристрою виконується на основі вибору типу заземлювача, визначення питомого опору ґрунту, геометричних параметрів електродів і подальшої перевірки, чи забезпечує обрана конфігурація необхідний опір розтікання струму.

У якості робочого рішення доцільно розглянути контур заземлення, що складається з декількох вертикальних сталевих електродів, об'єднаних сталевією смугою у замкнений контур навколо будівлі розподільчого пункту фермерського господарства. Припустимо, що для району розташування ферми питомий опір ґрунту становить $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, як типовий для суглинків у вологих умовах. У розрахунку приймаємо чотири вертикальні заземлювачі довжиною $L = 3 \text{ м}$, діаметром $d = 0,016 \text{ м}$, розташовані по периметру будівлі на відстані приблизно трьох метрів один від одного і з'єднані сталевією смугою, заглибленою у ґрунт на глибину $0,6 \dots 0,7 \text{ м}$.

Опір одного вертикального заземлювача можна орієнтовно визначити за відомою формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{d} \right) - 1 \right]. \quad (4.1)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м; L – довжина електрода, м; d – діаметр стержня.

Підставляючи числові значення $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $L = 3 \text{ м}$, $d = 0,016 \text{ м}$, отримуємо величину опору одного стержня:

$$R_1 \approx \frac{80}{2\pi \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,016} \right) - 1 \right] \approx 20,9 \text{ Ом}.$$

Оскільки заземлювачів декілька, їхній сумарний опір буде меншим за опір одного електрода. Для групи з чотирьох стержнів можна використати коефіцієнт використання електродів η_4 , який враховує взаємний вплив полів розтікання струму. При типовій відстані між електродами, близькій до довжини стержня, коефіцієнт використання для чотирьох електродів становить приблизно $\eta_4 \approx 0,7$. Орієнтовний опір групового заземлювача визначають за співвідношенням:

$$R_3 \approx \frac{R_1}{n \cdot \eta_n}, \quad (4.2)$$

де n – кількість електродів, од; η_n – коефіцієнт використання.

Для прийнятого варіанта маємо:

$$R_3 \approx \frac{20,9}{4 \cdot 0,7} \approx 7,5 \text{ Ом}.$$

Це є меншим за нормативне граничне значення 100 Ом і, відповідно, задовольняє вимоги до захисного заземлення для електроустановок фермерського господарства.

На рисунку 4.3 наведено спрощену схему розміщення заземлювальних електродів відносно будівлі розподільчого пункту, яка може бути реалізована на території фермерського господарства.

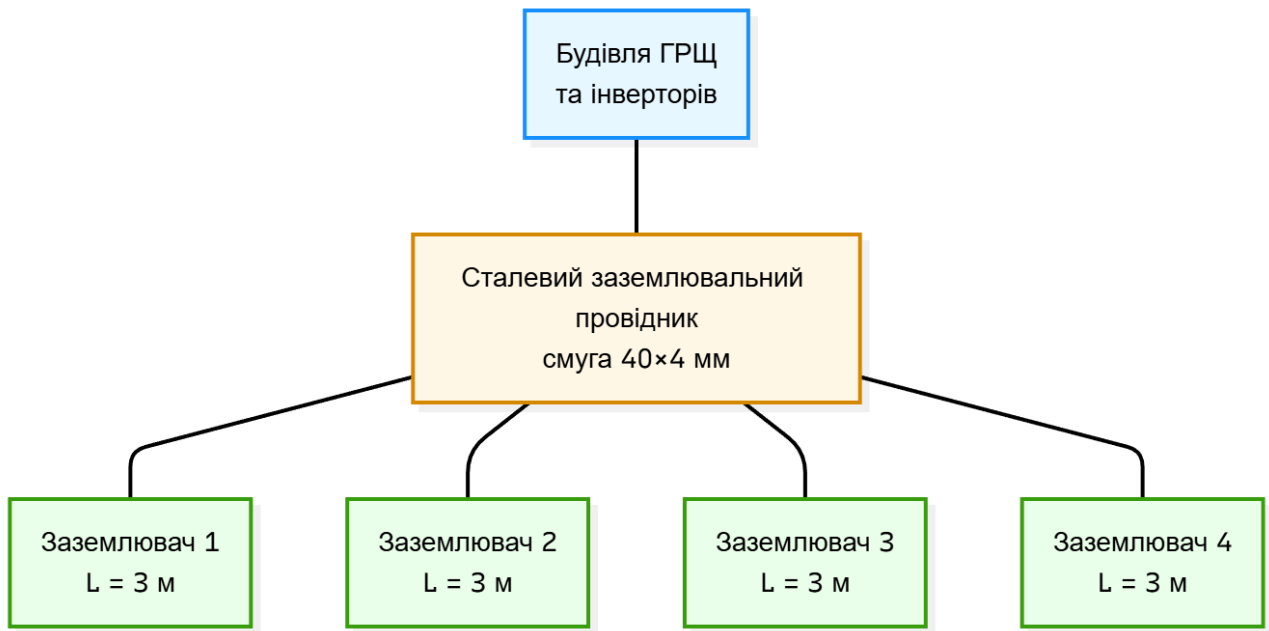


Рисунок 4.3 – Схема розташування вертикальних заземлювальних електродів навколо будівлі розподільчого пункту фермерського господарства

У таблиці 4.3 зведено основні вихідні дані та результати прикладу розрахунку опору заземлювального пристрою для фермерського господарства.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку опору заземлення

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Питомий опір ґрунту	Ом·м	80
Кількість вертикальних заземлювачів	од.	4
Довжина одного заземлювача	м	3,0
Діаметр сталюого стержня	м	0,016
Опір одного електрода	Ом	20,9
Коефіцієнт використання групи електродів	—	0,7
Розрахунковий опір заземлення	Ом	7,5
Допустимий опір за нормами	Ом	10

Аналіз отриманих результатів (табл. 4.3) показує, що при питомому опорі ґрунту 80 Ом·м застосування чотирьох вертикальних сталюих стержнів

довжиною 3 м дозволяє забезпечити опір заземлення на рівні близько 7,5 Ом, що менше за прийняте нормативне обмеження 10 Ом. У разі, якщо фактичний опір ґрунту буде вищим за розрахунковий, можна збільшити кількість електродів або їх довжину, а також об'єднати вертикальні заземлювачі з горизонтальними смугами більшої протяжності. Це забезпечить необхідний запас за величиною опору заземлення і підвищить надійність захисту персоналу та обладнання фермерського господарства під час експлуатації системи електропостачання.

4.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

У контексті організації евакуації персоналу важливим є розроблення плану дій у НС, який містить схеми маршрутів, список відповідальних осіб, місця розташування аварійних вимикачів та інструкції для кожної групи працівників. План має регулярно оновлюватися та доповнюватися відповідно до змін конфігурації енергетичної системи. Працівники повинні проходити періодичний інструктаж щодо правил безпеки, методів надання першої допомоги, використання засобів індивідуального захисту (захисні окуляри, діелектричні рукавиці, фільтрувальні респіратори у зонах роботи з біогазом).

Для зниження ризиків від природних надзвичайних ситуацій, таких як буревії, підтоплення, ожеледиця чи снігові навантаження, необхідно оцінити стійкість інфраструктури. Панелі СЕС повинні бути встановлені з урахуванням вітрових навантажень та мати антикорозійний захист. Акумуляторні системи необхідно розміщувати у приміщеннях із контрольованим мікрокліматом та захистом від проникнення води. Біогазові ємності мають бути обладнані системами аварійного скидання тиску та механізмами контролю температури.

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Оцінювання економічної ефективності комбінованої енергетичної системи ґрунтується на співставленні капітальних вкладень, річних експлуатаційних витрат та очікуваної економії електроенергії, яка формується внаслідок заміщення споживання з мережі власною генерацією. Методика розрахунку базується на визначенні приведених витрат та чистої теперішньої вартості, що дозволяє оцінити довгострокову результативність проєкту з урахуванням амортизації, річного виробітку та економії енергоресурсів.

Основою розрахунку є формула визначення річного економічного ефекту від впровадження комбінованої системи:

$$E_r = C_m \cdot W_s - C_{ex}, \quad (5.1)$$

де C_m – тариф на електроенергію із зовнішньої мережі, грн/кВт·год; W_s – річний обсяг електроенергії, який виробляється системою та заміщує закупівлю з мережі, кВт·год; C_{ex} – річні операційні витрати на обслуговування обладнання.

Для комплексної оцінки використовується показник чистої теперішньої вартості, який визначається як:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{E_r(t)}{(1+r)^t} - C_0, \quad (5.2)$$

де r – ставка дисконту; n – термін експлуатації системи, років; C_0 – капітальні інвестиції.

Додатково застосовується розрахунок строку окупності:

$$T = \frac{C_0}{E_r}, \quad (5.3)$$

Для проведення оцінювання прийнято такі вихідні параметри: встановлена потужність фотоелектричної системи становить 30 кВт із

прогнозованим річним виробітком 32 тис. кВт·год; біогазова когенераційна установка потужністю 12 кВт генерує 96,25 тис. кВт·год на рік; частка енергії, яка закуповується із зовнішньої мережі, не перевищує 32 тис. кВт·год. Сумарна генерація комбінованої системи становить близько 128,25 тис. кВт·год, що дозволяє замінити приблизно 80 % потреби фермерського господарства. Для тарифу на електроенергію 6,5 грн/кВт·год річна економія досягає 833 тис. грн. Річні витрати на експлуатацію, включаючи сервіс інверторів, обслуговування біогазового реактора та деградацію PV-модулів, оцінюються на рівні 90 тис. грн, тому чистий річний ефект перевищує 740 тис. грн.

Капітальні вкладення включають вартість сонячної електростанції у розмірі 900 тис. грн, біогазової установки потужністю 12 кВт вартістю 1,8 млн грн та системи накопичення енергії ємністю 75 кВт·год орієнтовною ціною 750 тис. грн. Загальні початкові інвестиції становлять близько 3,45 млн грн. При наведених параметрах строк окупності проєкту становить 4,6 року, а чиста теперішня вартість за 10-річного використання при дисконті 12 % залишається позитивною та перевищує 1,9 млн грн, що свідчить про економічну обґрунтованість реалізації системи.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунків економічних показників від використання комбінованої енергетичної системи фермерського господарства «ОЛКО»

Показник	Одиниця виміру	Значення
Річний виробіток комбінованої системи	кВт·год	128250
Частка покриття потреб господарства	%	80
Річна економія коштів	тис. грн	833
Річні експлуатаційні витрати	тис. грн	90
Чистий річний економічний ефект	тис. грн	743
Загальні інвестиції	тис. грн	3450
Термін окупності	років	4,6
Чиста теперішня вартість (NPV) за 10 років	тис. грн	1900

Результати розрахунків підтверджують, що впровадження комбінованої системи електропостачання із потужністю СЕС 30 кВт, біогазової установки 12 кВт та акумуляторної системи 75 кВт·год забезпечує річний власний виробіток на рівні 128,25 тис. кВт·год, що покриває близько 80% енергопотреб фермерського господарства. Річна економія становить приблизно 833 тис. грн, тоді як експлуатаційні витрати не перевищують 90 тис. грн, що формує чистий ефект у 743 тис. грн/рік. Загальні інвестиції у розмірі 3,45 млн грн окупаються за 4,6 року, а розрахунковий NPV за 10 років досягає 1,9 млн грн, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження системи.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Підвищення вартості електроенергії, нестабільність тарифів, а також ризики аварій у мережевій інфраструктурі стимулюють фермерські господарства шукати альтернативні стратегії енергозабезпечення. Водночас поширення сучасних технологій фотоелектричних модулів, зниження їхньої вартості та зростання ефективності перетворення сонячної енергії створюють сприятливі умови для впровадження комбінованих енергетичних систем.

Сучасний баланс електрогенерації України демонструє зростання ролі відновлюваних джерел енергії, частка яких у березні 2025 року становила 9 % (рис. 1.1). Структурна схема гібридної системи (рис. 1.2) підтверджує ефективність поєднання сонячної, вітрової та біоенергетичної генерації із накопичувачами енергії для підвищення автономності фермерських господарств. Такий підхід забезпечує стабільніше енергопостачання та сприяє переходу аграрного сектору до більш ефективних і екологічно сталих моделей.

Комбіновані системи електропостачання забезпечують фермерським господарствам значно вищу надійність і прогнозованість енергозабезпечення порівняно з використанням одного джерела енергії. Завдяки поєднанню сонячної, вітрової та біоенергетичної генерації такі системи створюють підґрунтя для формування енергонезалежних та економічно стабільних агровиробництв.

Виконано аналіз схем гібридних енергетичних систем. Встановлено, що вибір схеми гібридної енергетичної системи визначається цілями конкретного господарства, структурою навантаження та доступністю локальних ресурсів. Основним критерієм оптимізації є мінімізація повної вартості життєвого циклу системи при забезпеченні необхідного рівня надійності, що нерідко досягається із застосуванням методів багатокритеріальної оптимізації.

Доцільність впровадження комбінованих енергетичних систем у фермерських господарствах обґрунтована як з технічної, так і з економічної та екологічної точок зору. Враховуючи специфіку енергоспоживання аграрних

підприємств, нерівномірність навантаження та доступність місцевих відновлюваних ресурсів, такі системи можуть стати потужним інструментом підвищення стійкості й ефективності агровиробництва.

Нами вибрано як об'єкт дослідження, фермерське господарство «ОЛКО», що розташоване у селі Секунь Ковельського району Волинської області, яке здійснює свою діяльність із 2004 року.

Електропостачання фермерського господарства здійснюється від централізованої мережі середньої напруги через трансформаторну підстанцію типу 10/0,4 кВ. Розподіляється системою шин низької напруги та лініями до основних споживачів. Нами зображена однолінійна схема (рис. 2.2), де на шині середньої напруги (22 кВ) встановлено силові трансформатори потужністю по 1 МВА, а на шині низької напруги 415 В від них живляться як традиційні споживачі. Є можливість передбачити живлення від джерел генерації з відновлюваних джерел енергії.

Проведений аналіз свідчить, що найбільше навантаження у ФГ «ОЛКО» формують тваринницькі приміщення – 50 кВт (42 %) від загальної потужності. Значну частку також становлять зерносушарка та складські об'єкти – 40 кВт (33%), тоді як насосні станції, адміністративні будівлі та резерв ВДЕ разом забезпечують менше 30% навантаження. Це підтверджує технологічну спрямованість енергоспоживання господарства та потребу в стабільному енергозабезпеченні виробничих процесів.

На основі змодельованих даних побудовано добовий графік навантаження за групами споживачів (рис. 2.4). У нічний час потужність не опускається нижче базового рівня близько 20...25 кВт, який забезпечують охолодження продукції та мінімальна вентиляція. Перший виражений пік навантаження формується у ранкові години, коли одночасно працюють системи доїння, насосне обладнання та освітлення. Другий, більш тривалий пік припадає на вечірній проміжок часу, коли, окрім технологічних процесів, активізуються побутові споживачі та освітлення.

Найнижчі значення споживання електроенергії спостерігаються у січні–лютому, тоді як у липні–серпні споживання зростає за рахунок систем охолодження, а у вересні–жовтні за рахунок зерносушіння. Це підтверджує доцільність застосування комбінованих систем електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, які можуть забезпечити покриття сезонних піків без надмірного навантаження на мережу.

Оцінювання потенціалу відновлюваних джерел енергії для фермерського господарства «ОЛКО» ґрунтується на кліматичних та ресурсних характеристиках місцевості села Секунь Ковельського району. Для сонячної та вітрової енергетики доцільно використовувати дані кліматичних баз Meteonorm, сервісу PVGIS та карт Global Wind Atlas, які дають змогу отримати середньорічні значення сонячної радіації та швидкості вітру для заданих координат.

У результаті моделювання встановлено, що фотоелектрична станція потужністю 30 кВт здатна виробляти ≈ 32273 кВт·год/рік, працюючи з оптимальним кутом нахилу 35° та азимутом 0° . Максимальна генерація спостерігається влітку – 4105...4135 кВт·год у червні–липні, тоді як узимку виробіток падає до 808...1260 кВт·год. Це підтверджує, що СЕС може суттєво зменшити денне споживання в теплий сезон, але взимку потребує підтримки з боку додаткових джерел або мережі.

Вітровий потенціал оцінюється за середньорічною швидкістю вітру на висоті розташування осі ротора вітрової турбіни. Якщо за даними Global Wind Atlas середня швидкість вітру на висоті 10 м становить близько 4,8 м/с, то з урахуванням степеневого закону зміни швидкості з висотою можна прийняти, що на висоті 50 м швидкість досягає приблизно 5,6 м/с.

За наявних умов території фермерського господарства «ОЛКО» основним джерелом потенційної генерації може стати біоенергетика, яка забезпечує близько 96,2 МВт·год електроенергії на рік. Для порівняння, встановлена фотоелектрична система потужністю 30 кВт генерує приблизно 33,0 МВт·год, а вітрова турбіна потужністю 10 кВт – близько 20,0 МВт·год річної

електроенергії. Це свідчить про те, що біоенергетичний компонент здатен покривати до 60...65% потенційного річного споживання електроенергії господарства, тоді як сонячна та вітрова генерація виконують роль допоміжних модулів, що підвищують стійкість та гнучкість комбінованої системи енергопостачання.

Найбільшу гнучкість щодо інтеграції має саме біоенергетична складова, оскільки вона здатна працювати незалежно від погодних умов та забезпечувати базове навантаження. Сонячна генерація є важливим доповненням у літній період, коли навантаження тваринницьких приміщень та зерносушарок значно зростає, тоді як вітрова генерація компенсує нестачу електроенергії у зимові місяці.

Проаналізована перспективна однолінійна схема (рис. 3.1) підтверджує можливість інтеграції сонячної генерації, вітрових установок, біогазового модуля та системи накопичення у єдину комбіновану архітектуру для ФГ «ОЛКО». Поєднання цих елементів дозволяє сформувати гнучку енергосистему, яка може працювати як у паралелі з мережею, так і в автономному режимі під час аварій чи нестачі потужності. Такий підхід забезпечує підвищення надійності електропостачання та раціональне використання доступного місцевого відновлюваного потенціалу.

На підставі аналізу конфігурацій комбінованої енергетичної системи електропостачання господарства встановлено, варіант «PV + біогаз + BESS» забезпечує достатньо високий рівень енергетичної незалежності господарства, використовує наявний біоресурс (відходи тваринництва та рослинництва) і водночас залишає резерв для можливого подальшого масштабування системи у напрямі повної гібридизації. Саме тому цей варіант є найбільш обґрунтованим для детальних інженерних та економічних розрахунків у наступних підрозділах роботи.

Нами виконано розрахунок параметрів сонячної електростанції. Встановлено, що оптимальна встановлена потужність сонячної електростанції визначається за цільовим річним виробітком і питомим енерговиробництвом на

1 кВт пікової потужності. Річне електроспоживання фермерського господарства становить порядку 160000 кВт·год, тоді для покриття приблизно 20% потреб цільовий річний енерговиробництво СЕС становить на рівні 32000 кВт·год.

Структурно інтеграція сонячної електростанції у систему електропостачання фермерського господарства реалізується через мережевий інвертор, що працює в паралельному режимі з існуючою мережею 0,4 кВ. На рисунку 3.7 наведено узагальнену електричну схему підключення СЕС до внутрішньої мережі господарства. Сезонний розподіл добре відображає реальні кліматичні умови Західної України і підтверджує необхідність поєднання фотоелектричної генерації з іншими джерелами, щоб забезпечити стабільний енергетичний баланс ФГ «ОЛКО» протягом усього року.

На підставі виконаних розрахунків встановлено, що найбільший внесок у покриття навантаження ФГ «ОЛКО» забезпечує біогазова когенераційна установка – приблизно 96 тис. кВт·год на рік, що формує близько 60 % загальної генерації. Сонячна електростанція потужністю 30 кВт додає ще 32 тис. кВт·год, забезпечуючи 20 % потреб та зменшуючи денні пікові навантаження мережі.

Наведена структурна схема ілюструє взаємодію основних елементів комбінованої енергосистеми фермерського господарства та відображає потоки енергії від різних джерел до кінцевого споживання. Система накопичення енергії разом із зовнішньою електромережею формують гнучкий резерв, що дозволяє підтримувати стабільну роботу критичних споживачів і забезпечує надійність комбінованої енергетичної системи.

Нами розроблено заходи з охорони праці. Забезпечення належних умов охорони праці та готовності до дій у надзвичайних ситуаціях є основною умовою стабільного і безпечного функціонування комбінованої енергетичної системи фермерського господарства.

Результати розрахунків підтверджують, що впровадження комбінованої системи електропостачання із потужністю СЕС 30 кВт, біогазової установки 12 кВт та акумуляторної системи 75 кВт·год забезпечує річний власний виробіток

на рівні 128,25 тис. кВт·год, що покриває близько 80% енергопотреб фермерського господарства. Загальні інвестиції у розмірі 3,45 млн. грн окупаються за 4,6 року, а розрахунковий NPV за 10 років досягає 1,9 млн грн, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження 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. Боярчук В. М., Фтома О. В., Боярчук О. В. Ефективність інвестицій у виробництво ріпаку та біопалива на його основі. Проблеми і перспективи розвитку підприємництва. 2014. № 2(1). С. 77-83.
3. 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
4. Гальчак В.П., Боярчук В.М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця: Навчальний посібник. - Львів, 2008. - 135с.
5. Глобальний атлас вітру. URL: <https://globalwindatlas.info/en/area/Ukraine/Volyns'ka> (дата звернення: 01.10.2025).
6. Данилишин В., Кузнецова Л. Аналіз виробництва біогазу та перспективи розвитку біогазових технологій в Україні. Біоресурси і природокористування. 2023. Т. 27, № 3. С. 45–53.
7. Лехман Ф.Д., Рубльов В.І. Запобігання аварійності і травматизму в сільському господарстві. К.: Урожай, 1993. 272с.
8. Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 12.10.2025 р.).
9. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://surl.li/privru>
10. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://ur0.jp/7wLyJ>

11. 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.
12. 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.
13. Фотогальтаїчна географічна інформаційна система. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
14. Akikur R. K., Saidur R., Ping H. W., Ullah K. R. Comparative evaluation of grid-tied and stand-alone hybrid renewable energy systems for rural electrification. Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 225. 113–151. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113351.
15. Ali S., Jang C.-M. Optimum design of hybrid renewable energy system for sustainable energy supply to a remote island. Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 3. Article 1280. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031280>
16. Basem A. Application of hybrid renewable energy systems for supplying ... / A. Basem. – International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2024. – DOI: 10.1093/ijlct/ctae126/7719006.
17. Ember. Global Electricity Review 2025: How Clean is the World's Electricity? Ember Climate, 2025. URL: <https://ember-climate.org> (дата звернення: 22.10.2025).
18. Emezirinwune M.U., Adejumobi I.A., Adebisi O. Synergizing hybrid renewable energy systems and sustainable agriculture for rural development in Nigeria / M.U. Emezirinwune, I.A. Adejumobi, O.A. Adebisi. – e-Prime: Advances in Electrical Engineering Electronics and Energy. – 2024. – Vol. 7, No. 1:100492.
19. ExPro. URL: <https://expro.com.ua/novini/chastka-vde-u-struktur-generac-elektroenerg-u-berezn-2025-r-sklala-mayje-9>

20. Giedraityte A., Rimkevicius S., Marciukaitis M., Radziukynas V., Bakas R. Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 4. P. 1744. DOI: 10.3390/app15041744.
21. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., Salman H.M., Jaszczur M. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. P. 101621. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101621.
22. Hybrid Renewable Energy System. URL: https://encyclopedia.pub/entry/13881?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 14.09.2025).
23. International Energy Agency (IEA). *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. Paris: IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
24. International Energy Agency. *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. Paris: IEA, 2023. 242 p.
25. International Renewable Energy Agency. *Renewable Power Generation Costs in 2023*. Abu Dhabi: IRENA, 2024. 76 p.
26. Khan M. J., Iqbal M. T. Analysis of hybrid renewable energy systems for small-scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. P. 111–122. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111012.
27. Luthander R., Lingfors D., Widén J. Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaic systems using battery storage. *Energy*. 2022. Vol. 256. 124–139. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124678.
28. Maican E., Vîlcu C., Sorică C. та ін. Hybrid Renewable Energy Systems for Isolated Farms. A Review. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59, No. 3. P. 75–92. DOI: 10.35633/INMATEH-59-09.
29. Mérida García A., Gallagher J., Rodríguez Díaz J.A., McNabola A. An economic and environmental optimization model for sizing a hybrid renewable energy and battery storage system in off-grid farms / A. Mérida García, J. Gallagher,

J.A. Rodríguez Díaz, A. McNabola. – Renewable Energy. – 2024. – Vol. 220. – DOI: 10.1016/j.renene.2023.119588.

30. Nazarov D. Renewable energy sources for the agricultural sector / D. Nazarov. – In: Proceedings of the WFCES 2024. – 2024. – Vol. 71. – p. 01002.

31. Raza M., Saad M., Shahzad M. Optimization of hybrid solar-wind systems for agricultural applications. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 406. Article 137–148. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137148.

32. Tryhuba A. Optimizing energy systems of livestock farms with hybrid energy systems / A. Tryhuba et al. – Scientific Reports. – 2025. – DOI: 10.1038/s41598-025-92836-6.

33. 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).