

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ Євген АНТИПОВ
(підпис)

„_____” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«Проектування системи резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів»**

Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами»

02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 05 ПЗ

Гарант освітньої програми

_____ к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (Підпис)

_____ Світлана МАКАРЕВИЧ
(ПІБ)

Керівник

_____ к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (Підпис)

_____ Володимир ПАВЛЕНКО
(ПІБ)

Виконав

_____ (Підпис)

_____ Олександр ГОРБЕЛЬ
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інженерії енергосистем

к.т.н., доц. _____ Євген АНТИПОВ

»_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Горбелю Олександр Олександровичу

Спеціальність: 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: Проектування системи резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів

затверджена наказом ректора НУБіП України від 30.10.2025 р. № 2606 "С"

Термін подання завершеного проекту на кафедру "29" травня 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Гібридна фотоелектрична система резервного електропостачання фермерського господарства. Вихідні дані: потужність критичного навантаження - 22 кВт; добове споживання — 155 кВт·год; тривалість автономної роботи - не менше 12, 24, 48 годин. Обладнання: сонячна станція 18,2 кВт, інверторна система, акумуляторний банк LiFePO₄ (51,2 В) необхідної розрахункової місткості.

Перелік питань, які потрібно вирішити:

Проаналізувати стан електропостачання молочно-товарної ферми та обґрунтувати необхідність резервування; визначити склад і потужність критичних споживачів; розробити структурну схему гібридної фотоелектричної системи та виконати розрахунок її основних параметрів; обґрунтувати вибір обладнання (сонячні панелі, інвертор, акумуляторний накопичувач); виконати техніко-економічне обґрунтування та оцінку екологічної ефективності впровадження системи.

Перелік графічних документів: презентація виконана в PowerPoint

Дата видачі завдання: 30 жовтня 2025р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ к.т.н., доцент _____

Володимир ПАВЛЕНКО

Завдання прийняв до виконання _____

Олександр ГОРБЕЛЬ

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота за темою «Проектування системи резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів» присвячена розробці системи резервного електроживлення молочно-товарної ферми на базі гібридної фотоелектричної станції та акумуляторного накопичувача енергії.

У роботі проаналізовано характеристики електроспоживання об'єкта, обґрунтовано доцільність впровадження гібридної системи на базі технології LiFePO₄. Виконано аналіз графіків навантаження, визначено критичних споживачів із встановленою потужністю 22 кВт та розрахунковою потужністю 18,7 кВт, розраховано параметри фотоелектричної станції та акумуляторного банку для забезпечення автономії 12, 24 та 48 годин, розроблено структурну та принципову електричну схеми системи.

За результатами проектування обрано 36 фотоелектричних модулів потужністю 500 Вт (18 кВт), гібридний інвертор Deye SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 та акумуляторний банк на основі модулів Felicity FLA48200. Річна генерація — 17 226 кВт·год, вартість проєкту — 1 482 тис. грн, термін окупності — 3,0 роки, NPV₂₅ = +6 925 тис. грн, IRR = 43,8%, скорочення викидів CO₂ — 8,1 т/рік.

Ключові слова: РЕЗЕРВНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, МОЛОЧНО-ТОВАРНА ФЕРМА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, АКУМУЛЯТОРНА СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, LiFePO₄, ГІБРИДНИЙ ІНВЕРТОР, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis «Design of a Backup Power Supply System for a Farm Using Solar Panels and Batteries» is dedicated to the development of a hybrid power supply system for a dairy farm based on a photovoltaic station and a battery energy storage system.

The thesis analyses electricity consumption characteristics, substantiates the feasibility of LiFePO₄-based hybrid systems, identifies critical consumers with an installed capacity of 22 kW, calculates photovoltaic station and battery bank parameters for 12, 24 and 48 hours of autonomy, and develops structural and schematic electrical diagrams.

36 photovoltaic modules of 500 W (18 kW total), a Deye SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 hybrid inverter and a Felicity FLA48200 battery bank were selected. Annual generation — 17,226 kWh, project cost — 1,482 thousand UAH, payback period — 3.0 years, NPV₂₅ = +6,925 thousand UAH, IRR = 43.8%, CO₂ reduction — 8.1 t/year.

Keywords: BACKUP POWER SUPPLY, DAIRY FARM, PHOTOVOLTAIC SYSTEM, BATTERY ENERGY STORAGE, LiFePO₄, HYBRID INVERTER, DECARBONISATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ	11
1.1. Особливості електроспоживання фермерських господарств і вимоги до надійності живлення	11
1.2. Існуючі рішення резервного електроживлення в аграрному секторі	15
1.3. Фотоелектричні системи з акумуляторами як засіб резервного електроживлення	20
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ	28
2.1. Опис фермерського господарства та технологічних процесів	28
2.2. Аналіз графіка електроспоживання та виділення критичних навантажень.....	32
2.3. Формулювання вимог до системи резервного електроживлення на базі ФЕС та АКБ.....	39
Висновки до розділу 2	45
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ І АКУМУЛЯТОРІВ.....	46
3.1. Розрахунок параметрів фотоелектричної станції та вибір обладнання....	46
3.2. Розрахунок акумуляторної батареї та елементів електричної мережі.....	50
3.3. Розробка структурної та принципової схем і аналіз режимів роботи системи	53
Висновки до розділу 3:	59

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Горбаль О.О.			Проектування сстемии резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Павленко В.М.						5	103
						Група ІЕС-230016СТ			
Н. Контр.		Петрено А.В.							
Затверд.		Антипов Є.О.							

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТУ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ	61
4.1. Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи	61
4.2. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації системи	77
4.3. Вплив системи на навколишнє природне середовище та екологічна ефективність.....	83
4.4. Аналіз сценаріїв конфігурації системи за критерієм терміну окупності .	87
Висновки до розділу 4	92
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	98

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКБ — акумуляторна батарея

АВР — автоматичне введення резерву

БМС — система управління акумулятором (Battery Management System)

ВДЕ — відновлювані джерела енергії

ГФС — гібридна фотоелектрична система

ЕМС — система керування енергією (Energy Management System)

ЗП — захисний пристрій

КЗ — коротке замикання

ККД — коефіцієнт корисної дії

МРРТ — алгоритм відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking)

МТФ — молочно-товарна ферма

НБУ — Національний банк України

ОЕС — об'єднана енергетична система

ПВ — фотовольтаїчний / фотоелектричний (Photovoltaic)

ПУЕ — Правила улаштування електроустановок

СЕС — сонячна електростанція

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Надійне електропостачання є однією з базових умов стабільного функціонування сучасних сільськогосподарських підприємств, особливо фермерських господарств молочного напрямку, де безперервність енергопостачання визначає працездатність технологічного обладнання, збереження продукції та дотримання виробничих режимів. Порушення живлення доїльних установок, систем охолодження молока, вентиляції, водопостачання, освітлення та допоміжного електрообладнання може призводити до технологічних збоїв, економічних втрат і погіршення умов утримання тварин.

В умовах нестабільної роботи централізованих електричних мереж, аварійних і планових відключень електроенергії, а також зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів підвищуються вимоги до енергетичної стійкості локальних сільськогосподарських об'єктів. Традиційне резервування на базі дизельних генераторів не завжди є оптимальним рішенням через значні експлуатаційні витрати, потребу в паливі, шум, викиди забруднювальних речовин та обмеження щодо тривалої автономної роботи.

У зв'язку з цим особливого значення набуває застосування систем резервного електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії, насамперед фотоелектричних установок у поєднанні з акумуляторними батареями. Такі системи дають можливість забезпечити живлення критичних навантажень, знизити залежність від зовнішньої мережі, підвищити енергоефективність об'єкта та зменшити негативний вплив на довкілля.

Для умов фермерських господарств Київської області використання сонячної енергії є технічно доцільним, оскільки рівень інсоляції дає змогу ефективно застосовувати фотоелектричні модулі для часткового покриття електроспоживання та створення резерву потужності. Водночас ефективність такої системи визначається правильним вибором конфігурації, потужності фотоелектричної

частини, ємності акумуляторної батареї, інверторного обладнання та параметрів електричної мережі.

Отже, проєктування системи резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів є актуальним інженерним завданням, спрямованим на підвищення надійності електропостачання, енергетичної автономності та економічної ефективності сільськогосподарського виробництва.

Мета роботи – проєктування системи резервного електроживлення фермерського господарства молочного напрямку з використанням сонячних панелей та акумуляторів для забезпечення живлення критичних навантажень в аварійних режимах роботи електричної мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні системи резервного електроживлення фермерських господарств і обґрунтувати доцільність застосування фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю.
2. Виконати характеристику об'єкта проєктування, проаналізувати графік електроспоживання, виділити критичні навантаження та сформулювати вимоги до системи резервного електроживлення.
3. Розрахувати параметри фотоелектричної станції та акумуляторної батареї, обрати основне обладнання, а також розробити структурну і принципову електричні схеми системи.
4. Виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження системи та розглянути питання безпеки експлуатації й екологічної ефективності проєктного рішення.

Об'єкт дослідження – процес резервного електроживлення фермерського господарства молочного напрямку в умовах нестабільного централізованого електропостачання.

Предмет дослідження – параметри, структура та режими роботи системи резервного електроживлення фермерського господарства на базі фотоелектричної станції та акумуляторної батареї.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні відтворюваного технічного рішення для забезпечення резервного електроживлення фермерського господарства із застосуванням серійного сучасного обладнання, яке може бути використане під час модернізації існуючих або проектування нових сільськогосподарських електроустановок. Запропоновані рішення враховують реальні режими навантаження об'єкта, вимоги до тривалості резервування та умови експлуатації в аграрному секторі.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати бакалаврської кваліфікаційної роботи апробовано на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективний університет» у публікації: Горбель О.О., Павленко В.М. «Проектування автономних систем електропостачання сільськогосподарських об'єктів з використанням фотоелектрики та акумуляторів».

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

1.1. Особливості електроспоживання фермерських господарств і вимоги до надійності живлення

Сучасне фермерське господарство молочного напрямку є електрифікованим виробничим об'єктом, стабільне функціонування якого безпосередньо залежить від надійного електропостачання. Електрична енергія використовується для забезпечення основних технологічних процесів, зокрема доїння, первинної обробки та охолодження молока, водопостачання, вентиляції, освітлення, автоматизації виробничих операцій і підтримання належних санітарно-гігієнічних умов у тваринницьких приміщеннях. У зв'язку з цим перерви в електропостачанні для таких об'єктів мають не лише енергетичне, а й безпосередньо технологічне та економічне значення.

До основних електроспоживачів фермерського господарства належать доїльна установка, вакуумний насос, молочний насос, танк-охолоджувач молока, припливно-витяжна вентиляція, насоси водопостачання, освітлення, системи автоматики та керування, а також допоміжне обладнання, пов'язане з приготуванням кормів, санітарною обробкою та обслуговуванням тварин. Перелічені електроприймачі відрізняються за встановленою потужністю, тривалістю роботи, режимами навантаження та наслідками їх відключення. Саме тому під час аналізу електроспоживання фермерського господарства необхідно враховувати не лише загальну потужність, а й структуру навантаження, часову нерівномірність та пріоритетність окремих груп споживачів.

Характерною особливістю електроспоживання фермерських господарств є нерівномірний добовий графік навантаження. Для об'єктів молочного напрямку найбільше навантаження, як правило, припадає на ранковий і вечірній періоди, коли одночасно працюють доїльне обладнання, вакуумні насоси, системи

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортування та охолодження молока, частина освітлення й допоміжні механізми. У ці часові інтервали потужність електроспоживання суттєво перевищує середній добовий рівень, що обумовлює необхідність урахування пікових режимів при виборі параметрів системи резервного електроживлення. Типовий характер зміни навантаження протягом доби наведено на рис. 1.1.

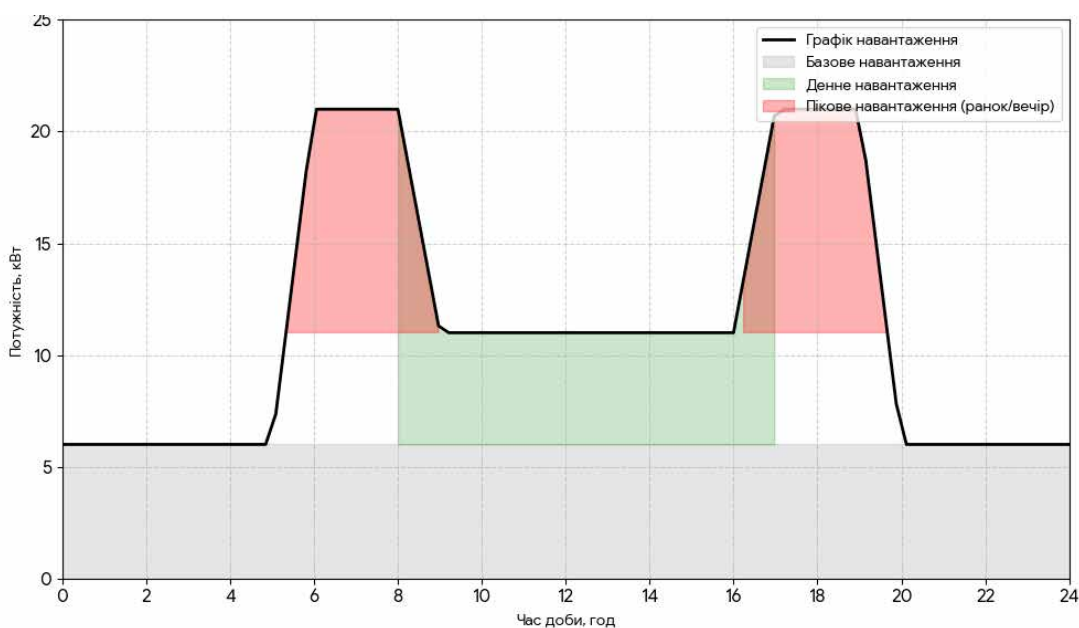


Рис. 1.1. Типовий добовий графік електричного навантаження фермерського господарства молочного напрямку

Для фермерських господарств також характерне поєднання постійних і циклічних навантажень. До постійних належать ті електроприймачі, робота яких має безперервний або тривалий характер, зокрема танк-охолоджувач молока, окремі елементи вентиляції, системи автоматики та частина освітлення. До циклічних належать електроприймачі, що працюють відповідно до технологічного графіка, а саме доїльне обладнання, насоси, годівниці, водонагрівальні установки та окремі допоміжні механізми. Така структура навантаження має принципове значення для подальшого проєктування, оскільки дає змогу обґрунтовано визначити базове, максимальне та критичне навантаження об'єкта. [1]

Ще однією важливою особливістю є сезонна зміна електроспоживання. У зимовий період зростає потреба в освітленні, обігріві окремих приміщень, роботі вентиляції та допоміжного електрообладнання, тоді як у літній період збільшується

навантаження на системи охолодження й повітрообміну. Це означає, що при оцінюванні режимів роботи фермерського господарства і виборі резервного джерела живлення необхідно враховувати не лише усереднені річні показники, а й більш напружені сезонні режими.

З технологічної точки зору особливе значення має виділення критичних електроприймачів, припинення живлення яких призводить до негайного порушення виробничого процесу, погіршення якості продукції або створення небажаних умов утримання тварин. До таких електроприймачів належать доїльна установка, вакуумний насос, молочний насос, танк-охолоджувач, насос водопостачання, система автоматики, частина вентиляції та робоче освітлення. Їх відключення навіть на відносно короткий проміжок часу може спричинити технологічні збої, прямі матеріальні втрати та зниження ефективності виробництва. Саме тому в системі резервного електроживлення пріоритет надається не всім електроприймачам ферми, а насамперед тим, що належать до критичної групи.

Класифікацію електроприймачів фермерського господарства за рівнем критичності наведено в табл. 1.1. [2]

Таблиця 1.1

Класифікація електроприймачів фермерського господарства за рівнем критичності

Група електроприймачів	Основне обладнання	Наслідки відключення	Пріоритет резервування
Критичні	Доїльна установка, вакуумний насос, молочний насос, танк-охолоджувач, насос водопостачання, автоматика, робоче освітлення	Порушення технологічного процесу, ризик втрати продукції, погіршення умов утримання тварин	Високий
Важливі	Частина вентиляції, автоматичні годівниці, водонагрівачі, транспортери, допоміжні механізми	Допустиме короточасне відключення, але за тривалої перерви виникають технологічні ускладнення	Середній
Некритичні	Побутові споживачі, офісне обладнання, частина допоміжного освітлення	Не мають визначального впливу на основний виробничий цикл у короточасному аварійному режимі	Низький

Важливою складовою аналізу є також оцінка вимог до надійності електроживлення фермерських господарств. Для тваринницьких об'єктів надійність електропостачання визначається не лише категорією електроприймачів, а й фактично допустимою тривалістю перерви живлення для конкретного технологічного процесу. Якщо для частини допоміжних споживачів короткочасне відключення є припустимим, то для систем доїння, охолодження молока, водопостачання та автоматики навіть кілька годин знеструмлення можуть мати відчутні негативні наслідки. Це зумовлює необхідність впровадження таких технічних рішень, які забезпечують своєчасне перемикання на резервне джерело та достатню тривалість автономної роботи.

Окрему увагу слід приділити системам забезпечення мікроклімату, оскільки вони безпосередньо впливають на фізіологічний стан тварин і продуктивність господарства. Порушення роботи вентиляції, водопостачання чи освітлення в умовах тривалої відсутності електроенергії призводить до погіршення умов утримання худоби, підвищення стресового навантаження та зниження виробничих показників. З цієї причини вимоги до надійності електроживлення на фермерських об'єктах формуються з урахуванням не лише електротехнічних параметрів, а й особливостей технології виробництва.[3]

Узагальнену структуру електроспоживання фермерського господарства за функціональними групами наведено на рис. 1.2.

-Таким чином, система резервного електроживлення фермерського господарства повинна забезпечувати покриття критичних навантажень у разі зникнення напруги зовнішньої мережі, мати достатню потужність для роботи обладнання в пікові періоди, забезпечувати потрібну тривалість автономної роботи та допускати інтеграцію з наявною системою електропостачання об'єкта. Крім того, до неї висувуються вимоги щодо безпечності, надійності, зручності експлуатації та економічної доцільності впровадження.

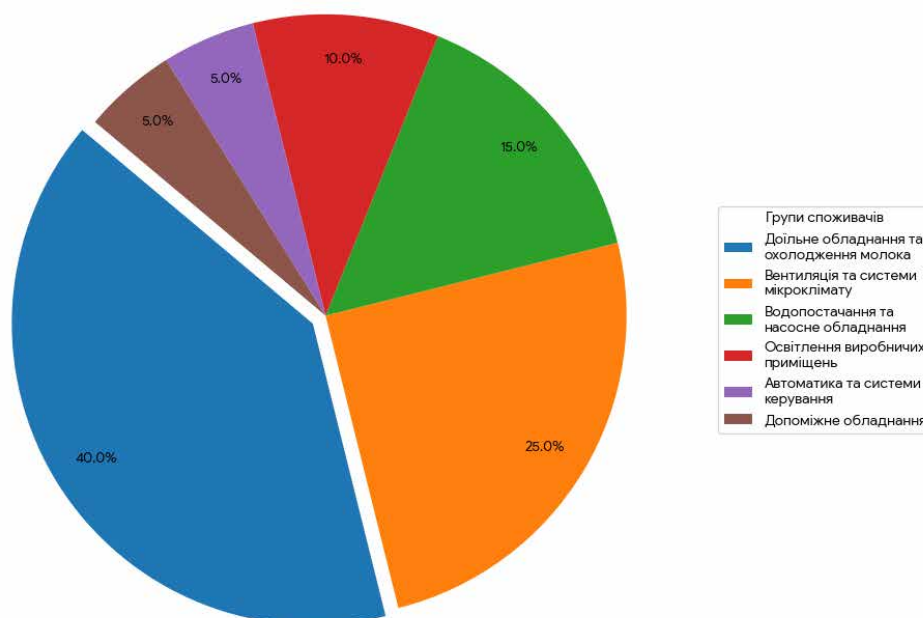


Рис. 1.2. Структура електроспоживання фермерського господарства за функціональними групами

Отже, електроспоживання фермерських господарств характеризується нерівномірністю добового навантаження, поєднанням постійних і циклічних споживачів, сезонною змінністю режимів роботи, а також наявністю критичних електроприймачів, для яких надійність електроживлення має визначальне значення. Наведені особливості обґрунтовують доцільність застосування спеціалізованих систем резервного електроживлення, здатних забезпечити безперебійну роботу основних технологічних процесів у разі порушення централізованого електропостачання.

1.2. Існуючі рішення резервного електроживлення в аграрному секторі

Для забезпечення резервного електроживлення сільськогосподарських об'єктів у практиці застосовуються декілька основних технічних рішень, що відрізняються за принципом дії, вартістю, тривалістю автономної роботи, рівнем автоматизації та придатністю до роботи в умовах фермерського господарства. Найбільш поширеними серед них є дизельні генератори, джерела безперебійного живлення та гібридні фотоелектричні системи з акумуляторними батареями. Кожне

із зазначених рішень має власну сферу раціонального застосування, тому їх вибір повинен ґрунтуватися на аналізі режимів навантаження, вимог до надійності живлення, умов експлуатації та економічної доцільності. [5]

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика основних систем резервного електроживлення для фермерських господарств

Параметр	Дизель-генератор	Джерело безперебійного живлення (ДБЖ)	Гібридна система ФЕС+АКБ
Принцип резервування	Генерація електроенергії від двигуна внутрішнього згоряння	Живлення навантаження від акумуляторів через інвертор	Живлення від сонячних панелей, акумуляторів і мережі в комбінованому режимі
Час перемикання	5–30 с	0–10 мс	10–20 мс
Типова тривалість автономної роботи	8–24 год, залежно від запасу палива	0,5–4 год	24–72 год, залежно від ємності АКБ та інсоляції
Діапазон потужності	5–500 кВт	1–100 кВА	5–100 кВт
Початкові капітальні витрати	Відносно невисокі	Середні або високі при зростанні потужності	Високі
Експлуатаційні витрати	Високі, пов'язані з паливом і технічним обслуговуванням	Порівняно низькі	Низькі
Рівень шуму	Високий	Практично відсутній	Практично відсутній
Екологічний вплив	Викиди CO ₂ , NO _x , шумове забруднення	Без локальних викидів	Без локальних викидів під час експлуатації
Автоматизація	Обмежена або середня	Висока	Висока
Придатність для фермерського господарства	Ефективне для короткочасного або аварійного резервування	Доцільне для чутливого малопотужного обладнання	Доцільне для резервування критичних навантажень і часткового покриття споживання

Дані табл. 1.2 показують, що універсального рішення для всіх умов експлуатації не існує. Дизель-генератори забезпечують значну потужність і відносно просту реалізацію резервного живлення, однак характеризуються високими експлуатаційними витратами, шумом, потребою в паливі та регулярному технічному обслуговуванні. Джерела безперебійного живлення забезпечують практично миттєве перемикання, але через обмежену ємність акумуляторів придатні переважно для локального захисту окремих чутливих споживачів, а не для тривалого резервування всього фермерського об'єкта. Гібридні системи ФЕС+АКБ

мають найвищі початкові витрати, проте дозволяють поєднати функції резервного джерела, часткового автономного живлення та зменшення споживання електроенергії з мережі.

Найбільш традиційним рішенням для резервного електроживлення в аграрному секторі залишаються дизельні генератори. Їх перевагами є відпрацьована технологія, широкий діапазон потужностей, можливість резервування трифазних навантажень і порівняно невисока початкова вартість у перерахунку на одиницю потужності. Разом із тим такі установки мають істотні недоліки: вони потребують постійного запасу пального, чутливі до якості технічного обслуговування, створюють шумове навантаження та супроводжуються викидами продуктів згоряння. Для фермерських господарств це означає додаткові витрати на експлуатацію, складність логістики пального та необхідність організації безпечного місця встановлення обладнання.[6]

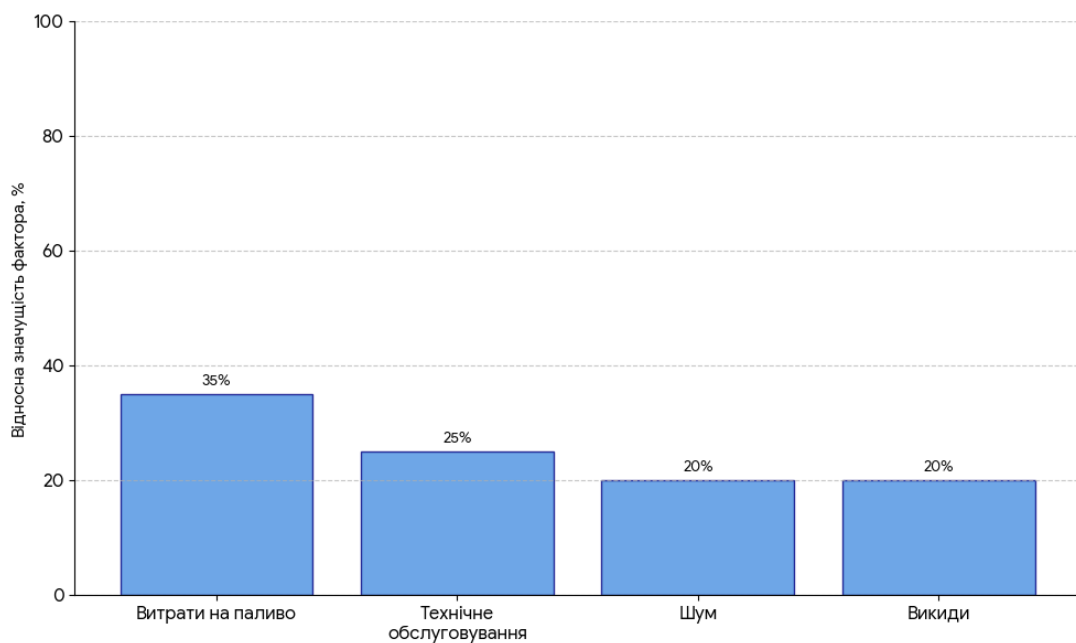


Рис. 1.3. Структура експлуатаційних недоліків дизель-генераторного резервування

Як видно з рис. 1.3, основним стримувальним фактором використання дизель-генераторів у фермерських господарствах є саме експлуатаційна складова, а не лише початкова вартість обладнання. Найбільший вплив мають витрати на

паливо та технічне обслуговування, що особливо відчутно в умовах тривалих або повторюваних відключень електроенергії. Це знижує економічну привабливість такого рішення для господарств, де резервне джерело повинно використовуватися не епізодично, а як важливий елемент забезпечення енергетичної стійкості.

Іншим поширеним засобом резервування є джерела безперебійного живлення, які широко використовуються для захисту комп'ютерної техніки, систем автоматизації, телекомунікаційного обладнання та окремих малопотужних споживачів. Їх основною перевагою є дуже малий час перемикання, що дозволяє підтримувати живлення чутливих електронних пристроїв без перерви. Проте у випадку фермерських господарств ДБЖ не можуть розглядатися як основне рішення для резервного електроживлення всього об'єкта, оскільки їх енергетична ємність обмежена, а зі зростанням потужності та тривалості автономної роботи вартість системи різко збільшується. Тому їх застосування є раціональним лише для вузького кола критичних електронних підсистем.

Поширення у сільському господарстві набувають гібридні системи, які поєднують фотоелектричну генерацію, акумуляторне зберігання енергії та взаємодію з електричною мережею. Такі системи можуть працювати в декількох режимах: покривати частину поточного навантаження, заряджати акумулятори, забезпечувати резервне живлення критичних споживачів у разі відключення мережі та знижувати добове споживання електроенергії із зовнішнього джерела. На відміну від дизельного резервування, вони не потребують пального, мають нижчі експлуатаційні витрати, забезпечують вищий рівень автоматизації та краще відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки. [7]

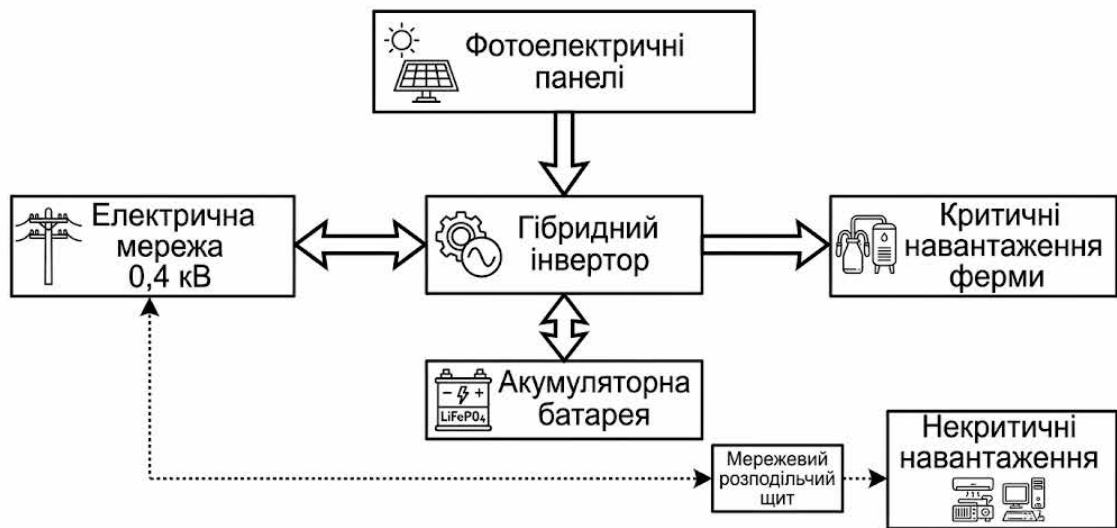


Рис. 1.4. Функціональна структура гібридної системи резервного електроживлення для фермерського господарства

Наведена на рис. 1.4 структура показує, що гібридна система резервного електроживлення є більш функціонально гнучкою порівняно з традиційними засобами резервування. Вона поєднує можливість використання відновлюваного джерела енергії, накопичення надлишкової електроенергії в акумуляторах та автоматичного живлення критичних навантажень у разі зникнення напруги в мережі. Саме така архітектура найбільшою мірою відповідає особливостям електроспоживання фермерських господарств, де необхідно резервувати не весь об'єкт, а насамперед найбільш відповідальні технологічні процеси. [8]

Для більш чіткого зіставлення експлуатаційних можливостей основних систем резервного живлення результати аналізу доцільно узагальнити також за ключовими критеріями вибору, які мають найбільше практичне значення для фермерського господарства.

Таблиця 1.3

Оцінка придатності систем резервного електроживлення для умов фермерського господарства

Критерій оцінювання	Дизель-генератор	ДБЖ	Гібридна система ФЕС+АКБ
Забезпечення тривалої автономної роботи	Середнє	Низьке	Високе
Придатність для потужних трифазних навантажень	Висока	Обмежена	Висока

Зручність повсякденної експлуатації	Середня	Висока	Висока
Витрати під час експлуатації	Високі	Середні	Низькі
Екологічність	Низька	Висока	Висока
Доцільність для резервування критичних навантажень ферми	Середня	Низька	Висока

З табл. 1.3 видно, що гібридна система ФЕС+АКБ має найбільш збалансовані характеристики для застосування саме на фермерських об'єктах. Дизель-генератор залишається технічно придатним варіантом, але поступається за експлуатаційною ефективністю, екологічністю та рівнем автоматизації. Джерела безперебійного живлення не забезпечують достатньої автономності для живлення технологічного обладнання ферми, тому можуть виконувати лише допоміжну функцію.

Отже, аналіз існуючих рішень резервного електроживлення в аграрному секторі свідчить, що традиційні дизельні генератори та джерела безперебійного живлення не забезпечують одночасно високої енергетичної автономності, економічної ефективності та зручності експлуатації в умовах фермерського господарства. Найбільш перспективним напрямом є застосування гібридних фотоелектричних систем з акумуляторним зберіганням енергії, які поєднують функції резервного джерела живлення, локального енергетичного комплексу та інструменту підвищення енергоефективності об'єкта. Саме тому в наступному підрозділі доцільно розглянути фотоелектричні системи з акумуляторами як спеціалізований засіб резервного електроживлення фермерських господарств.

1.3. Фотоелектричні системи з акумуляторами як засіб резервного електроживлення

Фотоелектричні системи з акумуляторними батареями є одним із найбільш перспективних рішень для резервного електроживлення фермерських господарств, оскільки поєднують функції локального джерела генерації, накопичення електроенергії та автоматизованого живлення критичних навантажень у разі порушення електропостачання від зовнішньої мережі. Використання таких систем

дає змогу не лише забезпечити аварійне резервування, а й частково покривати поточне електроспоживання об'єкта за рахунок сонячної енергії, що особливо важливо для сільськогосподарських споживачів з нерівномірним графіком навантаження та підвищеними вимогами до енергетичної автономності. [9]

Залежно від способу взаємодії з електричною мережею фотоелектричні системи поділяються на автономні, мережеві та гібридні. Автономні системи працюють незалежно від зовнішньої мережі та забезпечують живлення навантажень виключно за рахунок фотоелектричних модулів і акумуляторного накопичувача. Мережеві системи призначені для паралельної роботи з мережею, але за відсутності напруги на вводі зазвичай відключаються, тому не можуть бути основним засобом резервного живлення. Найбільш придатними для фермерських господарств є гібридні системи, які в штатному режимі працюють спільно з мережею, а в аварійному — переходять у режим живлення критичних навантажень від фотоелектричних модулів та акумуляторів.

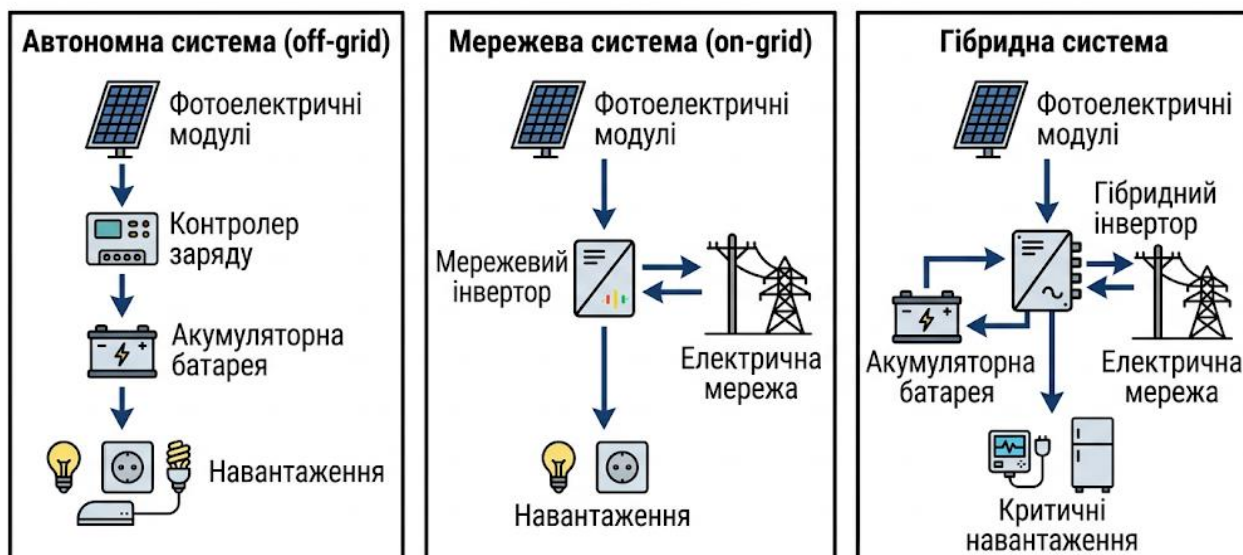


Рис. 1.5. Класифікація фотоелектричних систем за способом роботи відносно електричної мережі

Наведена на рис. 1.5 класифікація показує, що для резервного електроживлення фермерського господарства найбільш придатною є саме гібридна система. Автономна архітектура потребує значної ємності акумуляторів і резерву

за потужністю, що істотно збільшує вартість системи, тоді як мережева архітектура не забезпечує автономної роботи при аварійному знеструмленні. Гібридна система дає змогу поєднати переваги обох підходів: використовувати сонячну генерацію в нормальному режимі та підтримувати живлення критичних електроприймачів під час відключень.

Основними складовими фотоелектричної системи з акумуляторним резервуванням є сонячні модулі, гібридний інвертор, контролер відстеження точки максимальної потужності, акумуляторна батарея, система моніторингу та захисно-комутаційне обладнання. Фотоелектричні модулі перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію постійного струму, інвертор забезпечує перетворення її у змінний струм для живлення навантажень, а також керує потоками потужності між мережею, фотоелектричним масивом, акумуляторами та споживачами. Акумуляторна батарея виконує функцію накопичення енергії та її віддачі у періоди недостатньої генерації або відсутності мережевого живлення. [10]

Таблиця 1.4

Основні елементи гібридної фотоелектричної системи резервного електроживлення

Елемент системи	Основне призначення	Особливості застосування у фермерському господарстві
Фотоелектричні модулі	Генерація електроенергії постійного струму	Забезпечують покриття частини денного навантаження та заряд АКБ
Гібридний інвертор	Перетворення постійного струму у змінний, керування режимами системи	Забезпечує перемикання між мережею, ФЕС та акумуляторами
МРРТ-контролер	Відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного масиву	Підвищує ефективність генерації за змінної інсоляції
Акумуляторна батарея	Накопичення та віддача електроенергії	Забезпечує автономне живлення критичних навантажень
Система моніторингу	Контроль параметрів системи та режимів роботи	Дає змогу здійснювати дистанційний контроль та діагностику
Комутаційно-захисне обладнання	Захист кіл від перевантажень, коротких замикань і перенапруг	Забезпечує безпечну та надійну експлуатацію системи

Дані табл. 1.4 свідчать, що ефективність гібридної фотоелектричної системи визначається не лише параметрами сонячних модулів або акумуляторів, а

насамперед комплексною узгодженістю роботи всіх її елементів. Для фермерського господарства особливо важливою є наявність гібридного інвертора з функціями швидкого перемикання та пріоритезації навантажень, оскільки саме він забезпечує адаптацію системи до змінних режимів роботи об'єкта. Крім того, система моніторингу та захисту відіграє важливу роль у підтриманні експлуатаційної надійності, що є критично важливим для об'єктів із безперервними технологічними процесами.

Серед сучасних накопичувачів енергії для фотоелектричних систем найбільш поширеними є свинцево-кислотні та літій-іонні акумуляторні батареї, зокрема батареї типу LiFePO₄. Свинцево-кислотні акумулятори мають нижчу початкову вартість, однак відзначаються меншим ресурсом циклів заряд-розряд, нижчою допустимою глибиною розряду, більшою масою та вищими вимогами до умов експлуатації. LiFePO₄-акумулятори характеризуються вищою енергоефективністю, значно більшим циклічним ресурсом, високою термічною стабільністю та кращою придатністю до тривалої роботи в системах резервного електроживлення. Це зумовлює їх перевагу для фермерських господарств, де критично важливими є довговічність, безпечність та надійність системи в цілому.

[11]

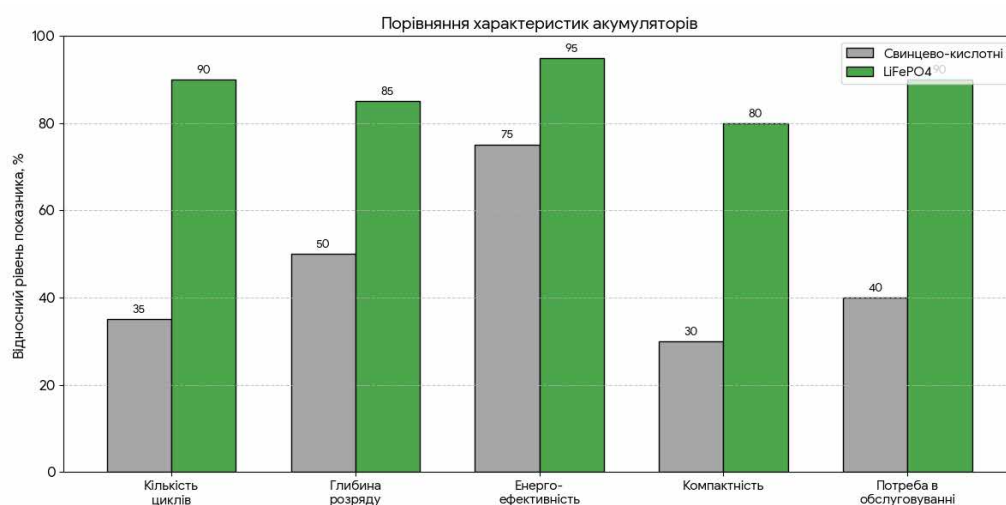


Рис. 1.6. Порівняння характеристик свинцево-кислотних та LiFePO₄ акумуляторів для застосування у фотоелектричних системах

Аналіз рис. 1.6 свідчить про суттєву перевагу LiFePO₄-акумуляторів за ключовими експлуатаційними показниками. Найбільш важливими для систем резервного електроживлення є вищий ресурс циклів, більша допустима глибина розряду та вища енергоефективність, оскільки саме ці параметри визначають фактичну довговічність і стабільність роботи системи. Для фермерського господарства це означає можливість забезпечення тривалої автономної роботи критичних навантажень із меншими втратами енергії та меншими витратами на заміну батарей упродовж життєвого циклу системи.

Важливою перевагою гібридних фотоелектричних систем є багаторежимність їх функціонування. У нормальному режимі електроенергія, вироблена сонячними модулями, використовується для покриття поточного навантаження ферми, а надлишок спрямовується на заряджання акумуляторної батареї. У разі зникнення напруги зовнішньої мережі система автоматично переходить у режим резервного живлення, забезпечуючи енергією критичні електроприймачі. У нічний час або за недостатньої інсоляції живлення здійснюється від акумуляторної батареї, а за відновлення мережі або достатньої генерації система повертається до штатного режиму роботи.

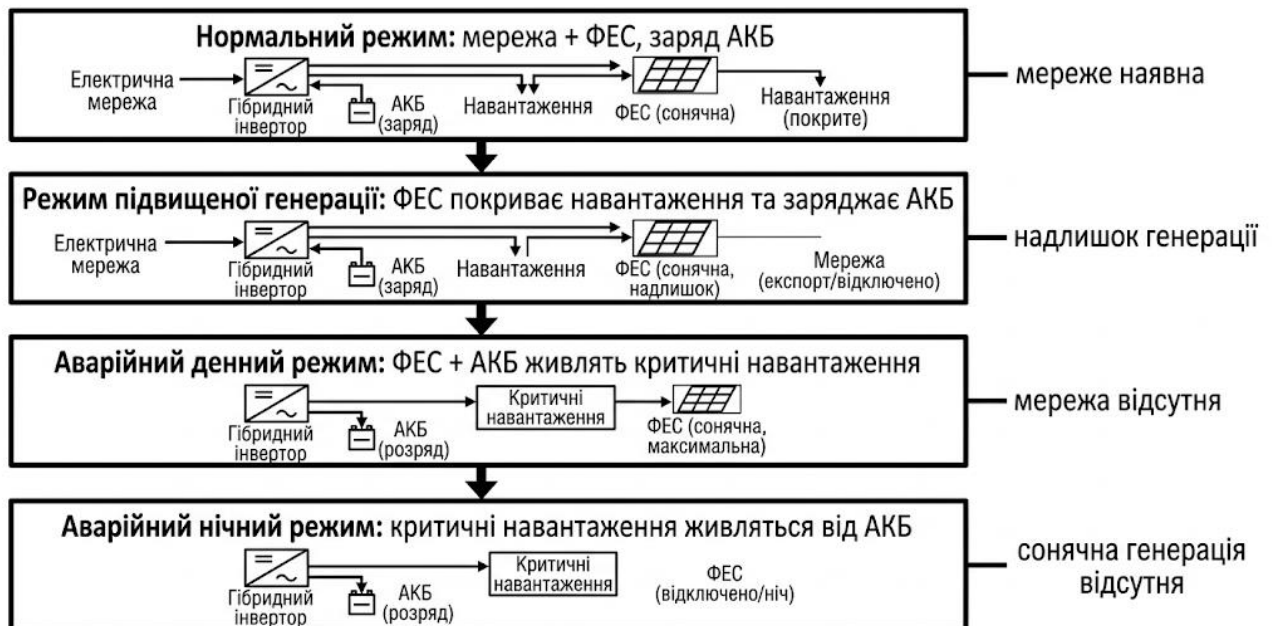


Рис. 1.7. Основні режими роботи гібридної системи ФЕС+АКБ

Рис. 1.7 відображає, що гібридна система ФЕС+АКБ виконує не лише функцію аварійного резервування, а й забезпечує адаптивне керування енергетичними потоками протягом доби. Для фермерського господарства це має принципове значення, оскільки дозволяє поєднати покриття денного навантаження, заряд акумуляторів та резервування технологічно важливих процесів. Саме багаторежимність системи забезпечує її практичну ефективність, оскільки резервне джерело не просто очікує аварійної ситуації, а постійно бере участь у забезпеченні енергопостачання об'єкта.

Сучасні дослідження у сфері гібридних систем PV+BESS підтверджують, що поєднання фотоелектричної генерації та акумуляторного накопичення енергії дає змогу підвищити енергетичну автономність, покращити якість електропостачання та зменшити залежність від ископного палива. Для аграрного сектору це особливо актуально через віддаленість частини споживачів, нестабільність електропостачання в сільській місцевості та підвищену чутливість технологічних процесів до перерв у живленні. Крім того, використання фотоелектричних систем із накопиченням енергії відповідає сучасним напрямкам розвитку розподіленої енергетики та підвищення енергоефективності господарських об'єктів. [12]

Отже, фотоелектричні системи з акумуляторними батареями є технічно обґрунтованим і перспективним засобом резервного електроживлення фермерських господарств. Найбільш доцільною для таких об'єктів є гібридна архітектура, яка поєднує роботу з мережею, використання сонячної генерації, накопичення енергії та автоматизоване резервування критичних навантажень. Застосування акумуляторів типу LiFePO₄ у складі гібридної системи підвищує ресурс, безпечність і надійність її роботи, що створює належні технічні передумови для подальшого проєктування системи резервного електроживлення фермерського господарства саме на базі фотоелектричних модулів та акумуляторів.

Висновки до розділу 1

У розділі 1 виконано огляд сучасних систем резервного електроживлення фермерських господарств та проаналізовано особливості електроспоживання сільськогосподарських об'єктів, насамперед ферм молочного напрямку, для яких характерні нерівномірний добовий графік навантаження, наявність пікових режимів роботи та висока залежність технологічних процесів від безперебійного електропостачання. Встановлено, що до найбільш відповідальних електроприймачів таких об'єктів належать доїльне обладнання, системи охолодження молока, вентиляції, водопостачання, освітлення та автоматизації, відключення яких призводить до технологічних порушень, погіршення умов утримання тварин і прямих економічних втрат.

У результаті аналізу існуючих рішень резервного електроживлення встановлено, що дизель-генераторні установки залишаються найбільш поширеним технічним засобом резервування, однак мають істотні недоліки, зокрема високі експлуатаційні витрати, потребу в паливі, підвищений рівень шуму, шкідливі викиди та необхідність регулярного технічного обслуговування. Джерела безперебійного живлення забезпечують високу якість електропостачання та мінімальний час перемикання, проте через обмежену ємність акумуляторів і високу вартість при збільшенні потужності їх застосування доцільне переважно для локального живлення окремих чутливих споживачів, а не для комплексного резервування фермерського господарства.

На підставі проведеного порівняльного аналізу встановлено, що найбільш перспективним напрямом резервного електроживлення фермерських господарств є застосування гібридних фотоелектричних систем з акумуляторними батареями. Такі системи поєднують функції локальної генерації електроенергії, накопичення енергії, автоматичного резервування критичних навантажень та часткового покриття поточного електроспоживання об'єкта. На відміну від традиційних рішень, вони характеризуються вищим рівнем автоматизації, нижчими

експлуатаційними витратами, відсутністю локальних викидів та кращою відповідністю сучасним вимогам енергоефективності й екологічної безпеки.

У підрозділі 1.3 встановлено, що для умов фермерського господарства найбільш доцільною є саме гібридна архітектура фотоелектричної системи, яка забезпечує роботу як у паралельному режимі з електричною мережею, так і в режимі автономного живлення критичних навантажень у разі аварійного знееструмлення. Обґрунтовано, що ефективність такої системи визначається узгодженою роботою фотоелектричних модулів, гібридного інвертора, акумуляторної батареї, системи моніторингу та захисно-комутаційного обладнання. Встановлено також, що серед сучасних типів накопичувачів енергії найбільш придатними для реалізації систем резервного електроживлення є літій-залізо-фосфатні акумулятори, які мають високий ресурс, значну глибину допустимого розряду, підвищену безпечність і добрі експлуатаційні характеристики.

Отже, за результатами огляду літературних джерел, сучасних технічних рішень і вимог до електропостачання фермерських господарств встановлено, що використання фотоелектричної системи з акумуляторним накопиченням енергії є технічно обґрунтованим напрямом побудови системи резервного електроживлення досліджуваного об'єкта. Одержані результати створюють підстави для переходу до наступного розділу, у якому необхідно виконати характеристику конкретного фермерського господарства, проаналізувати його графік електроспоживання, виокремити критичні навантаження та сформулювати вихідні вимоги до проектування системи резервного електроживлення на базі фотоелектричних модулів і акумуляторної батареї.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ

2.1. Опис фермерського господарства та технологічних процесів

Об'єктом проєктування є фермерське господарство молочного напрямку, розташоване в Бориспільському районі Київської області. Господарство спеціалізується на виробництві молока та утриманні великої рогатої худоби молочних порід, а за своїми виробничими характеристиками належить до малих і середніх сільськогосподарських підприємств, для яких безперебійність електропостачання має критичне значення. Вибір саме такого об'єкта для проєктування системи резервного електроживлення є обґрунтованим, оскільки технологічні процеси на молочній фермі мають виражену залежність від режиму роботи електрообладнання, а порушення електроживлення безпосередньо впливає на обсяги продукції, її якість та умови утримання тварин. [13]

За основними виробничими показниками фермерське господарство включає дійне стадо чисельністю 50 корів і молодняк у кількості 15 голів. Середньорічний надій на одну корову становить 7500–8000 л, а добовий обсяг виробництва молока перебуває в межах 1000–1100 л. Загальна площа виробничих приміщень становить близько 1200 м², а площа території господарства — 2,5 га. Основні техніко-виробничі характеристики об'єкта наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики фермерського господарства

Показник	Значення
Місце розташування	Бориспільський район Київської області
Спеціалізація господарства	Виробництво молока
Кількість корів дійного стада	50 голів
Кількість молодняку	15 голів
Середньорічний надій на 1 корову	7500–8000 л
Добовий обсяг виробництва молока	1000–1100 л
Площа виробничих приміщень	1200 м ²
Площа території господарства	2,5 га

Дані табл. 2.1 свідчать, що досліджуване господарство є типовим об'єктом молочного напрямку з відносно стабільним технологічним циклом та постійною потребою в електропостачанні. За таких умов навіть короткочасне припинення подачі електроенергії може спричинити порушення процесів доїння, охолодження молока, вентиляції, водопостачання та освітлення. Це підтверджує доцільність розроблення для такого об'єкта спеціалізованої системи резервного електроживлення з урахуванням фактичної структури його навантажень.

Виробничий комплекс фермерського господарства складається з кількох функціонально пов'язаних будівель і споруд. До його складу входять корівник на 50 голів площею 600 м² із безприв'язним утриманням на глибокій підстилці, доїльний зал з молокопроводом типу «Ялинка» 2×6 площею 80 м², молочний блок із танком-охолоджувачем на 2000 л площею 30 м², кормоцех із системою автоматичної роздачі кормів площею 120 м², телятник на 15 голів молодняку площею 150 м², адміністративно-побутове приміщення площею 60 м², а також насосна станція водопостачання. Така структура є типовою для фермерського господарства молочного напрямку і характеризується наявністю як постійних, так і періодичних електричних навантажень, що функціонують у різних технологічних режимах.

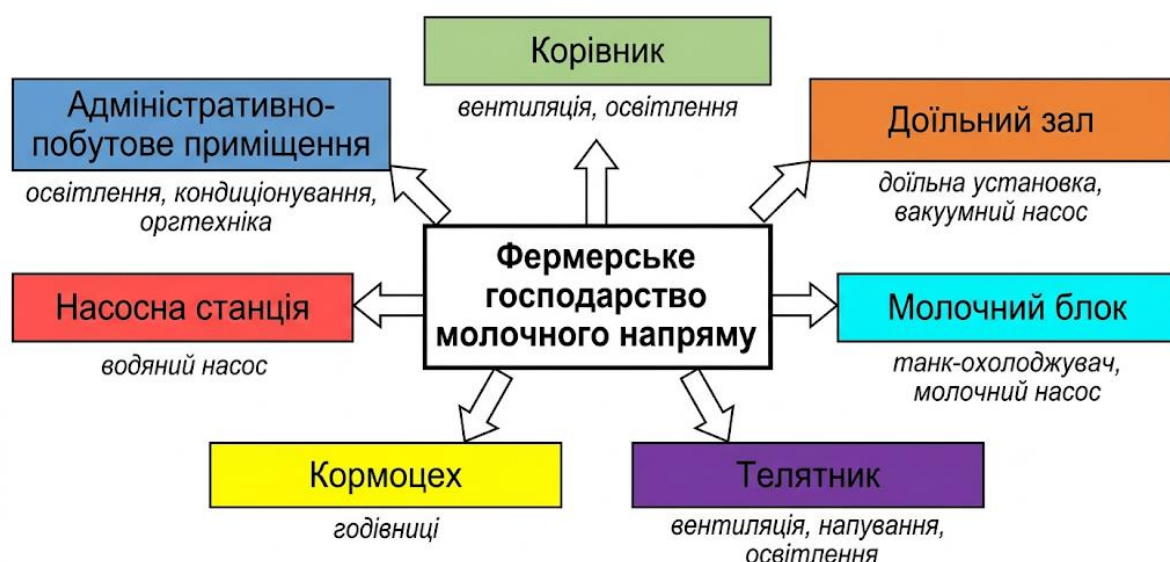


Рис. 2.1. Структура виробничого комплексу фермерського господарства

Наведена на рис. 2.1 структура показує, що електроспоживання об'єкта формується кількома функціональними зонами, кожна з яких має власний режим роботи та рівень критичності щодо безперервності електроживлення. Найбільш відповідальними з технологічного погляду є доїльний зал, молочний блок, корівник і насосна станція, оскільки саме вони забезпечують виконання основного виробничого циклу. Така структура зумовлює необхідність не суцільного резервування всіх споживачів, а пріоритетного живлення тих вузлів, від яких безпосередньо залежать технологічна безперервність і збереження продукції.

Технологічний процес виробництва молока в досліджуваному господарстві передбачає дворазове доїння корів — о 6:00 та 18:00. Саме в ці періоди формується найбільше електричне навантаження, оскільки одночасно працюють доїльне обладнання, вакуумні насоси, молочний насос, системи промивки та частково системи освітлення. Танк-охолоджувач молока функціонує цілодобово, підтримуючи температуру зберігання молока на рівні $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а система вентиляції забезпечує нормативний мікроклімат у приміщеннях протягом доби, з підвищеним навантаженням у теплий період року. Автоматичні годівниці працюють 3–4 рази на добу відповідно до встановленого графіка, що також впливає на формування добового профілю навантаження.

Для кращого уявлення про послідовність основних виробничих операцій технологічний цикл фермерського господарства доцільно подати у вигляді структурованої схеми.[14]

Як видно з рис. 2.2, виробничий процес на фермі є безперервно-послідовним, а порушення живлення навіть на одному з його етапів призводить до розриву всього технологічного циклу. Найбільш чутливими до відключень є процеси доїння, охолодження молока, подачі води та забезпечення нормативного мікроклімату, оскільки саме вони безпосередньо впливають на якість продукції та фізіологічний стан тварин. Це означає, що при подальшому проектуванні системи резервного електроживлення головну увагу необхідно приділити саме цим технологічним вузлам.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.2. Основні етапи технологічного процесу виробництва молока у фермерському господарстві

Електропостачання ферми здійснюється від двотрансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 160 кВА по одній повітряній лінії 0,4 кВ категорії II надійності. Лінія виконана проводом СІП-4 4×16 мм², а її довжина від підстанції до ввідного пристрою ферми становить 850 м. Облік електроенергії здійснюється трифазним лічильником непрямого включення з трансформаторами струму 100/5 А. Така схема електропостачання є типовою для сільськогосподарських об'єктів, однак наявність лише однієї повітряної лінії зумовлює підвищену чутливість об'єкта до аварійних відключень, особливо в умовах несприятливих погодних факторів.

Стан надійності електропостачання в районі розташування об'єкта характеризується наявністю регулярних перерв у подачі електроенергії. За наведеними в роботі даними, у 2023 році на фермі було зафіксовано 32 випадки непланових відключень електроенергії сумарною тривалістю понад 320 годин, з яких 8 випадків тривали більше 12 годин. Прямі збитки від псування молока та зниження надоїв оцінювалися в межах 75–100 тис. грн на рік, при цьому система резервного живлення на об'єкті відсутня. Це свідчить про реальну виробничу потребу у впровадженні автономного або резервного джерела живлення, здатного

забезпечити безперебійну роботу критичних навантажень у разі порушення електропостачання від мережі. [15]

Кліматичні умови району розміщення господарства є сприятливими для застосування фотоелектричних систем. Для Київської області характерний помірно-континентальний клімат із середньорічною температурою повітря близько $+8,9^{\circ}\text{C}$, середньорічною кількістю опадів 550–600 мм та кількістю сонячних днів на рік близько 170–180. У період з квітня по вересень кількість пікових сонячних годин сягає 3,3–5,5 год за добу, що створює достатні передумови для використання фотоелектричної генерації в складі гібридної системи резервного електроживлення. Водночас сезонна нерівномірність інсоляції потребує обов’язкового застосування акумуляторного накопичення енергії для забезпечення надійної роботи системи в нічний час та в періоди зниженої сонячної активності. [16]

Отже, досліджуване фермерське господарство є типовим об’єктом молочного напрямку з чітко вираженими критичними технологічними процесами, високою залежністю від безперебійного електропостачання та наявними ризиками тривалих аварійних відключень. Характер технологічного циклу, структура виробничих приміщень, параметри існуючої схеми електропостачання та кліматичні умови регіону свідчать про доцільність упровадження для цього об’єкта системи резервного електроживлення на базі фотоелектричних модулів і акумуляторної батареї. Отримані результати є вихідною основою для подальшого аналізу графіка електроспоживання, виділення критичних навантажень і формулювання вимог до проєктованої системи резервного електроживлення.

2.2. Аналіз графіка електроспоживання та виділення критичних навантажень

Для обґрунтованого проєктування системи резервного електроживлення фермерського господарства необхідно визначити склад електрообладнання, оцінити встановлену та розрахункову потужність, дослідити добовий графік електроспоживання, а також виділити групу критичних навантажень, живлення

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

яких має забезпечуватися в аварійному режимі в першу чергу. Такий підхід відповідає вимогам до бакалаврської кваліфікаційної роботи, згідно з якими всі розрахунки, таблиці, графіки й діаграми повинні супроводжуватися аналітичним тлумаченням і висновками. Вихідною основою для аналізу є перелік основного електрообладнання фермерського господарства, наведений у табл. 2.2. [17]

Таблиця 2.2

Перелік основного електрообладнання фермерського господарства

№ з/п	Найменування обладнання	Потужність одиниці, кВт	Кількість	Загальна потужність, кВт	Категорія
1	Доїльна установка «Ялинка» 2×6	5,5	1	5,5	Критична
2	Вакуумний насос доїльної установки	4,0	1	4,0	Критична
3	Молочний насос	0,75	1	0,75	Критична
4	Танк-охолоджувач молока 2000 л	3,5	1	3,5	Критична
5	Компресор танка-охолоджувача	1,5	1	1,5	Критична
6	Припливна вентиляція корівника	1,5	2	3,0	Критична
7	Витяжна вентиляція корівника	0,75	4	3,0	Важлива
8	Автоматична годівниця	1,1	1	1,1	Важлива
9	Транспортер гносвидалення	2,2	1	2,2	Важлива ¹
10	Освітлення корівника (LED)	0,12	20	2,4	Критична
11	Освітлення доїльного залу (LED)	0,06	12	0,72	Критична
12	Водонагрівач для промивки	3,0	1	3,0	Важлива
13	Насос водопостачання	2,2	1	2,2	Критична
14	Електрообігрівач телятника	3,0	2	6,0	Важлива
15	Система автоматики та контролю	0,5	1	0,5	Критична
16	Офісне обладнання	0,8	1	0,8	Некритична
17	Побутові споживачі	1,5	1	1,5	Некритична

Згідно з даними табл. 2.2, загальна встановлена потужність електрообладнання ферми становить $P_{\text{вст}} = 41,37$ кВт. Однак фактичне навантаження в реальних умовах експлуатації є меншим, оскільки не всі

електроприймачі працюють одночасно і не всі постійно використовуються з номінальною потужністю. Для визначення розрахункового максимального навантаження застосовано коефіцієнт одночасності та коефіцієнт використання. [17]

Розрахункове максимальне навантаження визначається за формулою:

$$P_{\max} = P_{\text{вст}} \cdot K_{\text{одн}} \cdot K_{\text{вик}}$$

де $P_{\text{вст}}$ — загальна встановлена потужність, кВт;

$K_{\text{одн}}$ — коефіцієнт одночасності;

$K_{\text{вик}}$ — коефіцієнт використання.

За прийнятих значень $K_{\text{одн}} = 0,65$ та $K_{\text{вик}} = 0,75$ одержуємо:

$$P_{\max} = 41,37 \cdot 0,65 \cdot 0,75 = 20,17 \approx 20 \text{ кВт}$$

Отримане значення свідчить, що середнє розрахункове максимальне навантаження фермерського господарства становить близько 20 кВт, тоді як у пікові проміжки часу воно може досягати 25 кВт через одночасну роботу доїльної установки, вакуумного насоса, молочного блоку, вентиляції та освітлення. Це означає, що при виборі резервної системи слід орієнтуватися не лише на середню величину потужності, а й на короткочасні піки, особливо пов'язані з пуском електродвигунів. Таким чином, аналіз встановленої потужності формує основу для побудови добового графіка навантаження та виділення пріоритетних споживачів.

Для оцінювання енергоспоживання фермерського господарства протягом доби виконано групування навантажень за функціональними категоріями з урахуванням часу роботи основного обладнання. Результати такого узагальнення наведено в табл. 2.3. [18]

Таблиця 2.3

Середньодобове електроспоживання за категоріями навантажень

Категорія навантаження	Потужність, кВт	Час роботи, год/добу	Добове споживання, кВт·год	Частка, %
Доїльне обладнання	10,25	4,0	41,0	30
Охолодження молока	5,0	16,0	25,0	18
Вентиляція	6,0	12,0 / 8,0	16,0	12

Освітлення	3,12	14,0 / 8,0	11,0	8
Автоматичні годівниці	1,1	6,0	6,6	5
Опалення / підігрів	6,0	10,0 / 0	19,3	14
Водопостачання	2,2	5,0	11,0	8
Інші споживачі	2,3	8,0	7,0	5 [†]
Разом	—	—	близько 137	100

За даними табл. 2.3 середньодобове електроспоживання господарства становить близько 137 кВт·год, причому найбільшу частку формують доїльне обладнання, охолодження молока та системи мікроклімату. У літній період добове споживання оцінюється на рівні близько 125 кВт·год, а в зимовий — близько 145 кВт·год, що пояснюється зростанням потреб у штучному освітленні та електрообігріві. Відповідно річне електроспоживання фермерського господарства становить приблизно 50 МВт·год, що узгоджується з раніше наведеною характеристикою об'єкта. Отже, система резервного електроживлення має враховувати не тільки встановлену потужність, а й добовий розподіл енергоспоживання та його сезонну нерівномірність.

На основі даних хронометражу роботи електрообладнання побудовано добовий графік електроспоживання фермерського господарства, який доцільно подати у вигляді рисунка.

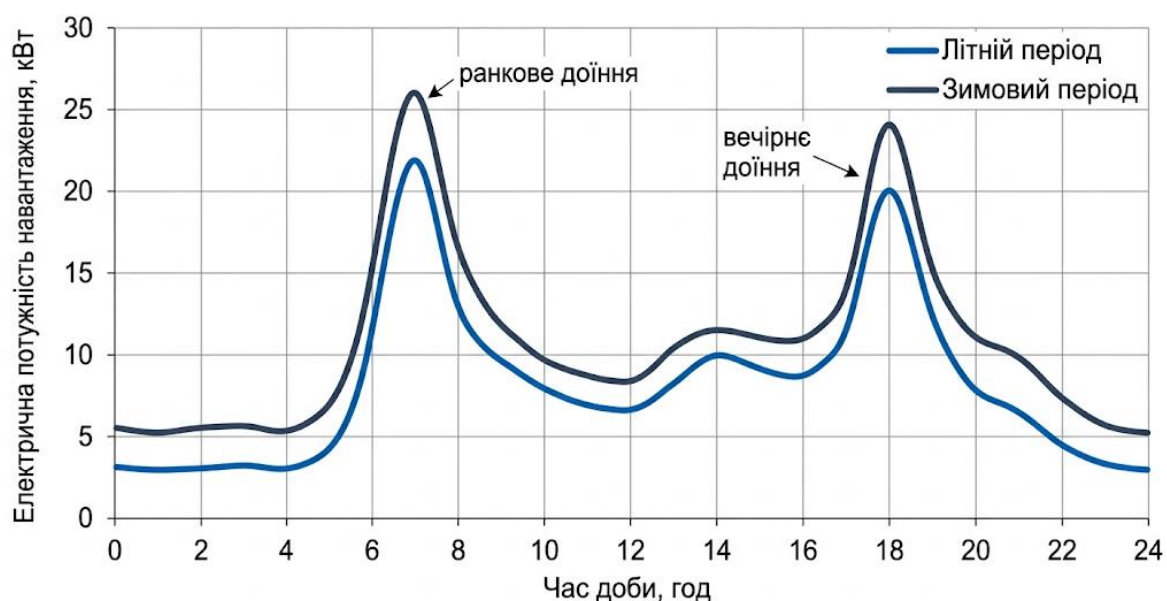


Рис. 2.3. Добовий графік електроспоживання фермерського господарства

Як видно з рис. 2.3, добовий профіль навантаження має чітко виражений нерівномірний характер із двома максимумами, що відповідають основним технологічним операціям на фермі. У ранковий та вечірній періоди до загального навантаження одночасно додаються доїльне обладнання, вакуумний насос, молочний насос, частина освітлення та допоміжні системи, унаслідок чого потужність зростає до 20–25 кВт. Натомість у нічні години навантаження знижується до базового рівня, який забезпечується насамперед молочним блоком, вентиляцією та черговими системами керування. Зимовий графік відрізняється від літнього більшим базовим навантаженням і вищою загальною енергоємністю доби, що має принципове значення при виборі ємності акумуляторної батареї та визначенні необхідного часу автономної роботи.

Для наочного оцінювання структури споживання електроенергії за функціональними категоріями доцільно подати окремий рисунок у вигляді кругової або стовпчикової діаграми.[19]

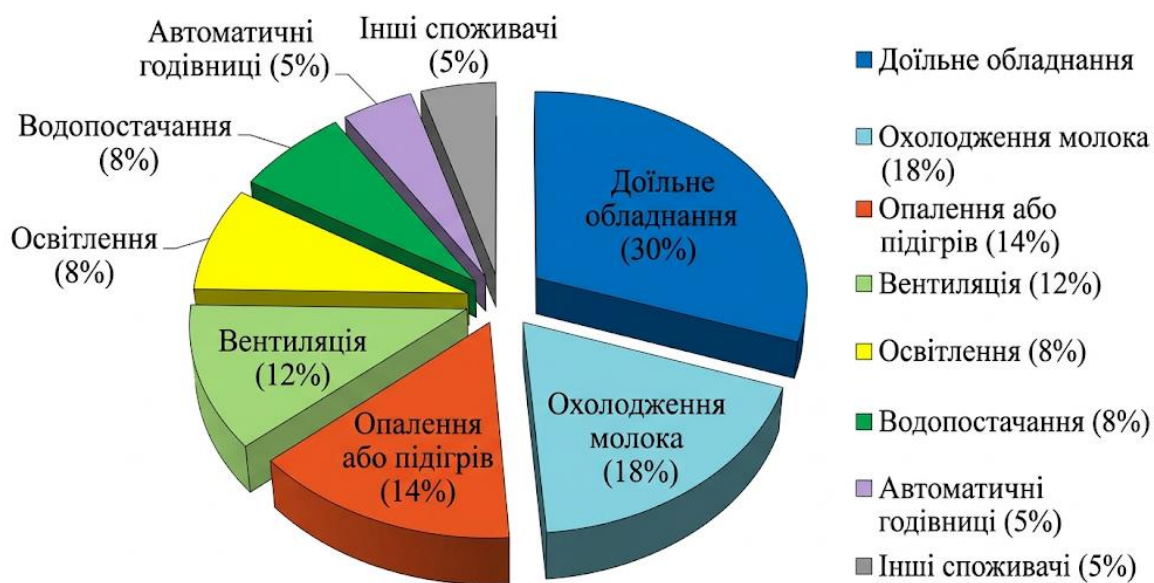


Рис. 2.4. Розподіл електричних навантажень за категоріями

Аналіз структури навантажень, наведеної на рис. 2.4, показує, що найбільш енергоємною групою є доїльне обладнання, частка якого становить 30% добового електроспоживання. Значними за енергоємністю також є процеси охолодження

молока, вентиляції та підтримання температурного режиму, тобто саме ті технологічні операції, від яких безпосередньо залежить безперервність виробництва та якість продукції. Це свідчить, що система резервного електроживлення повинна передусім орієнтуватися на підтримання цих процесів, навіть якщо в аварійному режимі частина другорядних навантажень буде тимчасово відключатися.

З метою проєктування резервної системи живлення всі електроприймачі господарства доцільно поділити на критичні, важливі та некритичні. До критичних належать ті навантаження, відключення яких призводить до порушення технологічного процесу, псування продукції, погіршення умов утримання тварин або загрози безпеці персоналу. Перелік таких навантажень наведено в табл. 2.4

Таблиця 2.4

Критичні навантаження фермерського господарства

Навантаження	Потужність, кВт	Обґрунтування критичності
Доїльна установка з насосами	10,25	Припинення доїння спричиняє технологічні втрати, стрес тварин і ризик захворювань
Танк-охолоджувач молока	5,0	Порушення охолодження призводить до погіршення якості та псування молока
Вентиляція корівника	3,0	Необхідна для підтримання нормативного мікроклімату та запобігання тепловому стресу
Освітлення аварійне	1,0	Потрібне для безпечної роботи персоналу й обслуговування тварин
Насос водопостачання	2,2	Забезпечує подачу води для напування тварин та технологічних потреб
Система автоматики контролю	0,5	Потрібна для контролю технологічних режимів і керування обладнанням
Разом	21,95 $\approx$ 22	—

Згідно з табл. 2.4 сумарна потужність критичних навантажень становить приблизно 22 кВт. Саме ця величина є базовою для подальшого визначення мінімально необхідної потужності інверторного обладнання та акумуляторної системи резервного електроживлення. Водночас важливо враховувати, що частина критичних електроприймачів має електродвигуни, для яких характерні підвищені пускові струми, тому фактична миттєва потреба в потужності в момент пуску буде вищою за суму номінальних потужностей. Отже, при подальшому виборі

структури системи резервного електроживлення необхідно закласти запас як за потужністю, так і за енергомісткістю.

Для кращого візуального подання пріоритетності навантажень у структурі електроспоживання доцільно розмістити ще один рисунок.



Рис. 2.5. Розподіл споживачів за пріоритетом резервування

Наведений на рис. 2.5 поділ електроприймачів за пріоритетом резервування дає змогу перейти від загального аналізу електроспоживання до формування концепції аварійного режиму роботи системи. У такому режимі електроживлення має безумовно забезпечуватися для критичних навантажень, тоді як важливі навантаження можуть підключатися частково або за наявності достатнього енергетичного ресурсу, а некритичні — відключатися. Саме така логіка є найраціональнішою для фермерського господарства, оскільки дозволяє зменшити необхідну потужність і ємність резервної системи без порушення основного виробничого процесу.

Отже, проведений аналіз показав, що фермерське господарство характеризується нерівномірним добовим графіком електроспоживання з двома вираженими піками навантаження, які припадають на періоди доїння. Загальна встановлена потужність електрообладнання становить 41,37 кВт, розрахункове максимальне навантаження — близько 20 кВт, а сумарна потужність критичних навантажень — близько 22 кВт. Найбільшу частку добового електроспоживання

формують доїльне обладнання, охолодження молока, вентиляція та допоміжні системи забезпечення технологічного процесу. Отримані результати є достатньою підставою для подальшого формулювання технічних вимог до системи резервного електроживлення на базі фотоелектричної станції та акумуляторної батареї.

2.3. Формулювання вимог до системи резервного електроживлення на базі ФЕС та АКБ

На основі аналізу характеристик фермерського господарства, добового графіка електроспоживання та складу критичних навантажень формується сукупність технічних вимог до системи резервного електроживлення на базі фотоелектричної станції та акумуляторної батареї. Таке формулювання вимог є необхідним етапом проектування, оскільки саме воно визначає подальший вибір конфігурації системи, параметрів основного обладнання, режимів її роботи та критеріїв оцінювання ефективності. Відповідно до методичних рекомендацій, у бакалаврській кваліфікаційній роботі всі технічні рішення мають бути обґрунтованими, логічно пов'язаними з попереднім аналізом і максимально наближеними до реальних умов експлуатації об'єкта. [20]

Результати підрозділу 2.2 показали, що сумарна потужність критичних навантажень фермерського господарства становить близько 22 кВт, а характер відключень у мережі потребує забезпечення резервного живлення протягом тривалого часу. При цьому для даного об'єкта недостатньо лише короткочасного джерела безперебійного живлення, оскільки аварійні відключення можуть тривати десятки годин, а в окремих випадках — понад добу. Саме тому доцільним є застосування гібридної системи, що поєднує фотоелектричну генерацію, акумуляторне накопичення енергії та інверторне обладнання з функцією автоматичного переходу в автономний режим.

Першою і найбільш важливою вимогою до системи є забезпечення живлення всіх критичних навантажень у разі зникнення напруги зовнішньої мережі. Мінімальна номінальна потужність системи повинна бути не меншою за сумарну

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужність критичних електроприймачів, тобто не менше 22 кВт. Однак для практичного проектування таке значення не може прийматися без запасу, оскільки під час запуску насосів, компресорів, вентиляційних установок і вакуумного обладнання виникають короточасні перевантаження, пов'язані з пусковими струмами. Тому потужність інверторного обладнання необхідно вибирати з коефіцієнтом запасу, що враховує пускові режими та можливі експлуатаційні відхилення.

Необхідна розрахункова потужність системи резервного електроживлення може бути визначена за формулою:

$$P_{\text{сист}} = P_{\text{кр}} \cdot k_{\text{зап}}$$

де $P_{\text{кр}}$ — сумарна потужність критичних навантажень, кВт;

$k_{\text{зап}}$ — коефіцієнт запасу за потужністю.

За умови $P_{\text{кр}} = 22$ кВт і прийнятого коефіцієнта запасу $k_{\text{зап}} = 1,2$ одержуємо:

$$P_{\text{сист}} = 22 \cdot 1,2 = 26,4 \text{ кВт}$$

Отже, система резервного електроживлення повинна мати таку номінальну потужність, яка забезпечує безпечну роботу критичних споживачів принаймні на рівні 26,4 кВт. У реальному проєкті це означає, що для покриття трифазного навантаження доцільно застосовувати кілька гібридних інверторів або модульну інверторну систему із сумарною номінальною потужністю, не меншою за розрахункову. Водночас короточасна перевантажувальна здатність інверторів повинна бути достатньою для компенсації пускових струмів електродвигунів без аварійного відключення системи. [21]

Другою ключовою вимогою є тривалість автономної роботи системи. З урахуванням фактичних умов експлуатації та наявності багатогодинних аварійних відключень у мережі фермерського господарства, мінімальна розрахункова автономність системи повинна становити 48 годин. Така тривалість резервування дозволяє підтримати основні технологічні процеси навіть за тривалого порушення мережевого електропостачання, а також створює запас часу для часткового відновлення енергії від фотоелектричної генерації в денний період.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Необхідна корисна енергоємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$W_{\text{АКБ}} = W_{\text{кр.доб}} \cdot t_{\text{авт}}$$

де $W_{\text{кр.доб}}$ — добове електроспоживання критичних навантажень, кВт·год;
 $t_{\text{авт}}$ — тривалість автономної роботи, діб.

Оскільки в початковому варіанті роботи прийнято вимогу автономної роботи протягом 2 діб, тобто 48 годин, а корисна ємність акумуляторної системи оцінюється на рівні не менше 250 кВт·год, ця величина і повинна бути закладена як мінімальний параметр системи накопичення енергії. При цьому фактична встановлена ємність акумуляторів має бути більшою за корисну, оскільки необхідно враховувати допустиму глибину розряду, втрати при перетворенні енергії та експлуатаційний резерв.

Третьою вимогою є вибір типу акумуляторної батареї. Для систем резервного електроживлення сільськогосподарських об'єктів доцільно застосовувати літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄), оскільки вони характеризуються високою циклічною стійкістю, підвищеною термічною та хімічною безпекою, відносно стабільною роботою у широкому температурному діапазоні та кращими експлуатаційними показниками порівняно з традиційними свинцево-кислотними батареями. Крім того, саме цей тип акумуляторів найбільш логічно відповідає вимогам до довготривалої експлуатації гібридної системи з регулярними циклами заряд-розряд. Отже, тип АКБ у проєкті доцільно фіксувати як LiFePO₄.

Четвертою вимогою є вибір топології системи резервного електроживлення. Для досліджуваного фермерського господарства найбільш доцільною є гібридна схема, яка забезпечує роботу в декількох режимах: споживання електроенергії від мережі, генерація від фотоелектричних модулів, заряджання акумуляторної батареї, а також автономне живлення навантажень у разі зникнення напруги в мережі. Саме така конфігурація дає змогу поєднати функцію резервування з частковим покриттям власного споживання в нормальному режимі, що підвищує енергетичну та економічну ефективність системи.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П'ятою вимогою є рівень швидкодії системи при переході в аварійний режим. Оскільки значна частина критичних споживачів є електродвигунними або технологічно чутливими до перерв у живленні, час автоматичного перемикання на резервне джерело повинен бути мінімальним. У проєкті приймається граничне значення часу перемикання не більше 20 мс, що відповідає можливостям сучасних гібридних інверторів і забезпечує безпечний перехід для більшості електроприймачів об'єкта. Така вимога є особливо важливою для систем автоматики, керування та окремих технологічних ланцюгів, робота яких не повинна перериватися на тривалий час.

Шостою вимогою є узгодження електричних параметрів системи з реальною структурою навантажень фермерського господарства. Оскільки на об'єкті використовується трифазне силове обладнання, система резервного електроживлення повинна забезпечувати вихідну напругу 380 В змінного струму в трифазному виконанні. Водночас для акумуляторного контуру доцільно приймати типову для гібридних систем напругу постійного струму 48 В, яка широко використовується в промислових рішеннях такого класу. Це забезпечує сумісність обладнання, уніфікацію елементів системи та спрощує технічне обслуговування.

Окремо слід врахувати вимоги до умов експлуатації обладнання в сільськогосподарському середовищі. Приміщення ферми характеризуються підвищеною вологістю, наявністю пилу, органічних домішок і сезонними температурними коливаннями, тому елементи системи повинні мати достатній ступінь захисту оболонки та бути пристосованими до роботи в таких умовах. У початковому проєктному рішенні як мінімально допустимий приймається ступінь захисту не нижче IP54, а для акумуляторної підсистеми — температурний діапазон експлуатації, достатній для кліматичних умов Київської області. Це зменшує ризики відмов обладнання та підвищує надійність системи у тривалій експлуатації.

Для узагальнення сформульованих вимог їх доцільно подати у вигляді зведеної таблиці. [23]

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні технічні вимоги до системи резервного електроживлення

Параметр	Значення	Обґрунтування
Номінальна потужність інверторної системи	не менше 16 кВА в базовому варіанті; розрахунково не менше 22 кВт за критичними навантаженнями і запасом	Забезпечення роботи критичних навантажень і компенсація експлуатаційного запасу
Тривалість автономної роботи	12, 24, 48 год	Забезпечення живлення критичних споживачів протягом двох діб без мережі
Корисна ємність АКБ	не менше 50 кВт·год	Визначається добовим споживанням і заданою автономністю
Потужність фотоелектричної станції	не менше 18 кВт	Часткове покриття денного споживання та підзарядка АКБ
Тип акумуляторної батареї	LiFePO ₄	Підвищена безпека, ресурс, циклічна стійкість
Напруга DC	48 В	Типове рішення для гібридних систем накопичення
Напруга AC	380 В, 3 фази	Відповідність структурі силового навантаження ферми
Час перемикання на резерв	не більше 20 мс	Забезпечення безперервності живлення технологічно важливих споживачів
Ступінь захисту обладнання	не нижче IP54	Робота в умовах сільськогосподарських приміщень
Діапазон температур експлуатації АКБ	у межах, достатніх для умов Київської області; у вихідному проєкті наведено -10...+45 °C ¹	Відповідність кліматичним умовам розміщення об'єкта

Дані табл. 2.5 показують, що система резервного електроживлення для досліджуваного фермерського господарства повинна бути не побутовим, а повноцінним інженерним рішенням із достатньою потужністю, значною енергоємністю та можливістю тривалої автономної роботи. Особливо важливим є те, що вимоги до системи формуються не абстрактно, а безпосередньо з урахуванням структури критичних навантажень, фактичного графіка електроспоживання та умов експлуатації об'єкта. Це підтверджує технічну доцільність подальшого проєктування саме гібридної системи типу ФЕС+АКБ, а не використання лише дизельного генератора або малопотужного ДБЖ.

Для графічного узагальнення вимог доцільно подати структурну схему функціональних вимог до системи резервного електроживлення.



Рис. 2.6. Основні вимоги до системи резервного електроживлення на базі ФЕС та АКБ

Поданий на рис. 2.6 матеріал наочно демонструє, що вимоги до системи резервного електроживлення мають комплексний характер і охоплюють не лише енергетичні параметри, а й експлуатаційні, функціональні та конструктивні аспекти. Це означає, що подальше проєктування системи повинно виконуватися як багатокритеріальна задача, у якій одночасно враховуються потужність, автономність, надійність, безпечність та пристосованість обладнання до реальних умов фермерського господарства. Такий підхід забезпечує відтворюваність результатів і відповідає вимозі наближення кваліфікаційної роботи до реальних виробничих умов.

Отже, у підрозділі сформульовано основні технічні вимоги до системи резервного електроживлення фермерського господарства на базі фотоелектричних модулів і акумуляторної батареї. Встановлено, що система повинна забезпечувати живлення критичних навантажень потужністю близько 22 кВт, мати розрахунковий запас за потужністю, забезпечувати автономну роботу протягом не менше 48 годин, використовувати акумулятори типу LiFePO₄ та працювати у складі трифазної гібридної схеми з мінімальним часом перемикання на резерв.

Сформульовані вимоги є вихідною основою для подальшого розрахунку параметрів фотоелектричної станції, акумуляторної батареї та вибору основного обладнання в розділі 3.

Висновки до розділу 2

Фермерське господарство молочного напрямку, розташоване в Київській області, є об'єктом із безперервним технологічним циклом, у якому надійність електропостачання безпосередньо впливає на виробництво, збереження продукції та умови утримання тварин. Встановлено, що відсутність резервного джерела живлення за умов частих і тривалих відключень електроенергії створює значні технологічні та економічні ризики, тоді як природно-кліматичні умови району є придатними для використання фотоелектричних систем.

Загальна встановлена потужність електрообладнання фермерського господарства становить 41,37 кВт, а розрахункове максимальне навантаження — близько 20 кВт. Добовий графік електроспоживання характеризується двома вираженими піками, що припадають на періоди ранкового та вечірнього доїння, а річне електроспоживання об'єкта становить близько 50 МВт·год. Визначено, що сумарна потужність критичних навантажень, які потребують гарантованого резервного живлення, становить близько 22 кВт.

Для забезпечення надійного резервного електроживлення доцільним є застосування гібридної системи на базі фотоелектричної станції та акумуляторної батареї. Система повинна забезпечувати живлення критичних навантажень, автономну роботу протягом не менше 48 годин, роботу у трифазному режимі 380 В, використання акумуляторів типу LiFePO₄, а також мінімальний час автоматичного перемикання на резервний режим. Сформульовані вимоги є вихідною основою для подальшого розрахунку параметрів фотоелектричної станції, акумуляторної батареї та вибору основного обладнання.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ І АКУМУЛЯТОРІВ

3.1. Розрахунок параметрів фотоелектричної станції та вибір обладнання

Проектування фотоелектричної станції для системи резервного електроживлення фермерського господарства виконується на основі аналізу електроспоживання об'єкта, кліматичних умов району розміщення, а також вимог до надійності живлення критичних навантажень, сформульованих у розділі 2. Відповідно до методичних рекомендацій, у проектній частині кваліфікаційної роботи мають бути наведені обґрунтовані розрахунки та вибір електротехнічного обладнання, придатного для реальних умов експлуатації.

Фермерське господарство розташоване в Київській області, для якої характерний достатній рівень сонячної інсоляції для використання фотоелектричних систем. За прийнятими у роботі кліматичними даними середньорічна сонячна інсоляція на оптимально орієнтовану поверхню становить близько 1142 кВт·год/м² на рік, а середня кількість пікових сонячних годин дорівнює 3,12 год/добу. Ці показники дають змогу застосувати фотоелектричну станцію не як єдине джерело енергії, а як складову гібридної системи, що забезпечує часткове покриття споживання ферми в нормальному режимі та заряджання акумуляторної батареї для подальшого резервного живлення. [22]

Потужність фотоелектричної станції визначається з урахуванням річного електроспоживання фермерського господарства та бажаної частки його покриття за рахунок сонячної генерації. Оскільки в роботі розглядається система резервного електроживлення, надмірне завищення потужності ФЕС є економічно недоцільним, а тому доцільно прийняти таку встановлену потужність, яка забезпечує помітний внесок у річний енергобаланс і водночас узгоджується з параметрами інверторів та акумуляторного банку.

Річний виробіток електроенергії фотоелектричною станцією визначається за формулою:

$$W_{\text{річна}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot t_{\text{сон}} \cdot \eta_{\text{сист}} \cdot 365$$

де $P_{\text{ФЕС}}$ – встановлена потужність фотоелектричної станції, кВт; $t_{\text{сон}}$ – середня кількість пікових сонячних годин за добу, год/добу; $\eta_{\text{сист}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії системи з урахуванням втрат в інверторі, кабелях, забруднення панелей та температурних відхилень.

Для цієї роботи прийнято: $t_{\text{сон}} = 3,12$ год/добу, $\eta_{\text{сист}} = 0,83$, а встановлену потужність фотоелектричної станції попередньо приймаємо на рівні 18,2 кВт. Тоді очікуваний річний виробіток становитиме:

$$W_{\text{річна}} = 18,2 \cdot 3,12 \cdot 0,83 \cdot 365 = 17210 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Отже, очікувана річна генерація фотоелектричної станції становить приблизно 17,2 МВт·год. За річного електроспоживання фермерського господарства на рівні близько 50 МВт·год така станція забезпечує покриття приблизно 34,4% річної потреби в електроенергії. Це значення є достатнім для зниження навантаження на зовнішню мережу, заряджання акумуляторної батареї та підвищення енергетичної стійкості об'єкта без необґрунтованого збільшення капітальних витрат.

Для реалізації фотоелектричної частини системи обрано сонячні модулі JA Solar JAM72S20-455/MR номінальною потужністю 455 Вт. Вибір цього типу панелей обумовлений поєднанням достатньо високої одиничної потужності, поширеності на ринку, сумісності з сучасними гібридними інверторами та придатності для формування стрінгової конфігурації з робочою напругою, що відповідає вхідним параметрам МРРТ-трекерів.

Необхідна кількість сонячних модулів визначається за формулою:

$$N_{\text{мод}} = \frac{P_{\text{ФЕС}}}{P_{\text{мод}}}$$

де $P_{\text{мод}}$ – номінальна потужність одного фотоелектричного модуля, кВт.

Підставивши значення, отримаємо:

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{\text{мод}} = \frac{18,2}{0,455} = 40$$

Таким чином, для формування фотоелектричної станції необхідно встановити 40 сонячних модулів потужністю 455 Вт кожний. Загальна встановлена потужність масиву становитиме:

$$P_{\text{ФЕС}} = 40 \cdot 0,455 = 18,2 \text{ кВт}$$

Прийнята кількість модулів є зручною також з точки зору електричного компонування, оскільки дозволяє рівномірно розподілити панелі між двома інверторами та сформувати чотири однакові стрінги.

Для подальшого проєктування необхідно перевірити відповідність параметрів стрінгу вхідним характеристикам інвертора. За даними обраного модуля напруга в точці максимальної потужності становить 41,82 В. У разі формування одного стрінгу з 10 послідовно з'єднаних панелей його робоча напруга становитиме:

$$U_{\text{стр}} = 10 \cdot 41,82 = 418,2 \text{ В}$$

Отримане значення перебуває в межах робочого діапазону MPPT обраного інвертора 125–600 В, що підтверджує правильність прийнятого компонування. Така конфігурація є технічно доцільною, оскільки забезпечує стабільну роботу трекерів максимальної потужності та не вимагає надмірного ускладнення схеми з'єднань.

Як інверторне обладнання у роботі обрано два гібридні трифазні інвертори Deye SUN-8K-SG04LP3-EU номінальною потужністю 8 кВт кожний. Сумарна потужність інверторної частини становить 16 кВт, що відповідає характеру навантаження об'єкта і дає змогу забезпечити живлення критичних електроприймачів у резервному режимі. Використання двох інверторів замість одного підвищує гнучкість системи, полегшує розподіл навантажень, спрощує масштабування та підвищує загальну надійність, оскільки у разі відмови одного з інверторів система частково зберігає працездатність.

Кожен інвертор має два MPPT-входи, тому загальна кількість стрінгів становить чотири. На кожен MPPT-вхід підключається один стрінг із 10 послідовно

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з'єднаних панелей, унаслідок чого реалізується така конфігурація: перший інвертор обслуговує стрінги 1 і 2, другий інвертор – стрінги 3 і 4. Такий підхід забезпечує симетричний розподіл фотоелектричного масиву між інверторами та спрощує експлуатаційний контроль параметрів системи.

Важливим етапом проєктування є вибір просторового розміщення фотоелектричних модулів. Для умов Київської області доцільним є встановлення панелей з орієнтацією на південь та кутом нахилу, близьким до оптимального для цілорічної генерації. Розміщення сонячних панелей на покрівлі або на окремій наземній металевій конструкції має забезпечувати відсутність взаємного затінення, можливість технічного обслуговування, механічну стійкість до вітрових і снігових навантажень та мінімальну довжину кабельних ліній до інверторного обладнання.

Для оцінювання сезонної ефективності фотоелектричної станції доцільно використовувати помісячний розподіл інсоляції та генерації. За даними роботи, у період з квітня по серпень фотоелектрична станція покриває найбільшу частку споживання ферми, тоді як у листопаді–лютому виробіток суттєво зменшується. Це підтверджує, що у зимовий період фотоелектрична частина системи не може розглядатися як самодостатнє джерело електроживлення, а має працювати спільно з акумуляторною батареєю та мережею або іншим резервним джерелом.

Отже, у результаті розрахунку параметрів фотоелектричної станції для системи резервного електроживлення фермерського господарства прийнято встановлену потужність ФЕС 18,2 кВт на базі 40 сонячних модулів JA Solar JAM72S20-455/MR. Для перетворення та керування енергією обрано два гібридні інвертори Deye SUN-8K-SG04LP3-EU загальною потужністю 16 кВт, а конфігурацію фотоелектричного масиву реалізовано у вигляді чотирьох стрінгів по 10 панелей у кожному. Прийняте технічне рішення забезпечує очікуваний річний виробіток близько 17,2 МВт·год і є узгодженим з подальшим розрахунком акумуляторної батареї та режимів роботи гібридної системи.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Розрахунок акумуляторної батареї та елементів електричної мережі

Акумуляторний банк є ключовим елементом гібридної системи резервного електропостачання, що забезпечує безперебійне живлення критичних споживачів ферми в періоди відсутності мережевого електропостачання та недостатньої сонячної генерації. Вибір ємності акумуляторного банку визначається потужністю критичного навантаження, необхідною тривалістю автономної роботи, допустимою глибиною розряду та ефективністю інверторного перетворення.

На підставі аналізу критичних споживачів, виконаного у підрозділі 2.2, встановлена потужність критичного навантаження становить $P_{\text{крит}} = 22$ кВт, а добове споживання критичних споживачів — $W_{\text{доб}} = 50$ кВт·год. Середня потужність критичного навантаження з урахуванням добового профілю:

$$P_{\text{сер}} = \frac{W_{\text{доб}}}{24} = \frac{50}{24} \approx 2,08 \text{ кВт. (3.1)}$$

Для акумуляторів на основі літій-залізо-фосфатної технології (LiFePO_4) прийнято допустиму глибину розряду $DoD = 0,80$, що відповідає рекомендованому виробниками режиму та забезпечує ресурс не менше 3 000 циклів. ККД інверторного перетворення прийнято $\eta_{\text{інв}} = 0,95$.

Необхідна енергетична ємність акумуляторного банку для забезпечення автономної роботи протягом заданого часу $t_{\text{авт}}$ визначається за формулою:

$$C_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{сер}} \cdot t_{\text{авт}}}{DoD \cdot \eta_{\text{інв}}}, \text{ (3.2)}$$

де $P_{\text{сер}}$ — середня потужність критичного навантаження, кВт; $t_{\text{авт}}$ — тривалість автономної роботи, год; DoD — допустима глибина розряду; $\eta_{\text{інв}}$ — ККД інвертора.

Варіант 1. Автономна робота протягом 12 годин.

$$C_{\text{АКБ},12} = \frac{2,08 \times 12}{0,80 \times 0,95} = \frac{24,96}{0,76} = 32,8 \text{ кВт·год. (3.3)}$$

З урахуванням реального профілю добового споживання і необхідності резервування насамперед нічних та ранкових годин (доїння, вентиляція), коли

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сонячна генерація відсутня, прийнятий запас ємності становить 10%, тому розрахункова ємність:

$$C_{\text{АКБ},12}^{\text{прийн}} = 32,8 \times 1,10 = 36,1 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.4)}$$

Для реалізації варіанту 12 год обрано 7 модулів Felicity FLA48314-EU (48 В / 314 А·год / 16 кВт·год кожен), з'єднаних паралельно:

$$C_{\text{факт},12} = 7 \times 16 = 112 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.5)}$$

Фактична ємність перевищує розрахункову з урахуванням модульності конфігурації та необхідності забезпечення пікового струму розряду при потужності $P_{\text{крит}} = 22 \text{ кВт}$.

Варіант 2. Автономна робота протягом 24 годин.

$$C_{\text{АКБ},24} = \frac{2,08 \times 24}{0,80 \times 0,95} = \frac{49,92}{0,76} = 65,7 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.6)}$$

З урахуванням 10% запасу:

$$C_{\text{АКБ},24}^{\text{прийн}} = 65,7 \times 1,10 = 72,3 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.7)}$$

Для реалізації варіанту 24 год обрано 13 модулів Felicity FLA48314-EU, з'єднаних паралельно:

$$C_{\text{факт},24} = 13 \times 16 = 208 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.8)}$$

Це забезпечує надійне покриття добового споживання критичних споживачів навіть за умови часткового хмарного неба протягом дня та відповідає таблиці порівняльного аналізу варіантів підрозділу 4.4.

Варіант 3. Автономна робота протягом 48 годин.

$$C_{\text{АКБ},48} = \frac{2,08 \times 48}{0,80 \times 0,95} = \frac{99,84}{0,76} = 131,4 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.9)}$$

З урахуванням 10% запасу:

$$C_{\text{АКБ},48}^{\text{прийн}} = 131,4 \times 1,10 = 144,5 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.10)}$$

Для реалізації варіанту 48 год обрано 25 модулів Felicity FLA48314-EU, з'єднаних паралельно:

$$C_{\text{факт},48} = 25 \times 16 = 400 \text{ кВт}\cdot\text{год. (3.11)}$$

Перевірка максимального струму розряду при критичному навантаженні
 $P_{\text{крит}} = 22 \text{ кВт}$:

$$I_{\text{розр}} = \frac{P_{\text{крит}}}{U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{інв}}} = \frac{22\,000}{48 \times 0,95} = 481,4 \text{ А. (3.12)}$$

Допустимий струм розряду для 25 паралельних модулів FLA48314-EU (максимальний струм одного модуля — 100 А):

$$I_{\text{доп}} = 25 \times 100 = 2\,500 \text{ А} \gg I_{\text{розр}}, \text{ (3.13)}$$

що підтверджує достатній струмовий резерв для всіх трьох варіантів конфігурації.

Результати розрахунку та параметри акумуляторних банків для трьох варіантів автономності зведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри акумуляторних банків для трьох варіантів автономності

Варіант	Автономія, год	Розрахункова ємність (з запасом), кВт·год	Модуль АКБ	К-сть модулів, шт.	Фактична ємність, кВт·год
1	12	36,1	Felicity FLA48314-EU	7	112
2	24	72,3	Felicity FLA48314-EU	13	208
3	48	144,5	Felicity FLA48314-EU	25	400

Аналіз таблиці 3.1 показує, що зростання тривалості автономії від 12 до 48 годин зумовлює чотириразове збільшення кількості акумуляторних модулів — від 7 до 25 штук, що пропорційно впливає на капітальні витрати системи (підрозділ 4.4). Технологія LiFePO₄ обрана як оптимальна завдяки поєднанню високої циклічної витривалості (понад 3 000 циклів при DoD = 0,80), широкого діапазону робочих температур від мінус 20 до плюс 60 °С, вбудованої системи управління батареями (BMS) та відсутності ефекту термічного розгону, що є критично важливим для об'єктів агропромислового комплексу.

Усі три варіанти конфігурації акумуляторного банку є технічно сумісними з обраним гібридним інвертором Deye SUN-8K-SG04LP3-EU, який підтримує

номінальну напругу акумуляторного порту 48 В та максимальний зарядний струм 160 А, що достатньо для роботи з будь-яким із запропонованих варіантів при стандартному режимі заряджання. Порівняльний техніко-економічний аналіз трьох варіантів із визначенням оптимального рішення виконано у розділі 4.

3.3. Розробка структурної та принципової схем і аналіз режимів роботи системи

Структурна схема гібридної фотоелектричної системи резервного електропостачання відображає склад, взаємозв'язки та ієрархію основних функціональних блоків установки. Принципова електрична схема деталізує з'єднання елементів системи на рівні кіл постійного та змінного струму, розміщення захисної апаратури та точок підключення навантаження. Розроблені схеми відповідають вимогам ДСТУ EN 62446-1:2018 щодо документування фотоелектричних систем та ПУЕ-2017 в частині виконання електричних схем.

Структурна схема системи відображає три функціональні підсистеми: генерувальну (фотоелектричний масив), накопичувальну (акумуляторний банк) та перетворювальну (гібридний інвертор), які взаємодіють між собою через шини постійного струму напругою 48 В, а з навантаженням — через шину змінного струму 380/220 В, 50 Гц. Система має два зовнішні входи: мережа 0,4 кВ та фотоелектричний масив, і один вихід: щит живлення критичних споживачів.

На рис. 3.1 подано структурну схему системи резервного електроживлення фермерського господарства.

Аналіз структурної схеми підтверджує, що гібридний інвертор Deye SUN-8K-SG04LP3-EU є центральним вузлом системи, який виконує одночасно функції MPPT-контролера заряду від фотоелектричного масиву, двонаправленого перетворювача між акумуляторним банком і шиною змінного струму, а також автоматичного перемикача між джерелами живлення. Пріоритет використання джерел визначається налаштованим алгоритмом: у першу чергу споживається енергія сонячного масиву, при її нестачі — енергія акумуляторного банку,

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перемикання на мережу відбувається лише у разі розряду акумуляторів нижче встановленого порогу ($\text{SoC} < 20\%$).

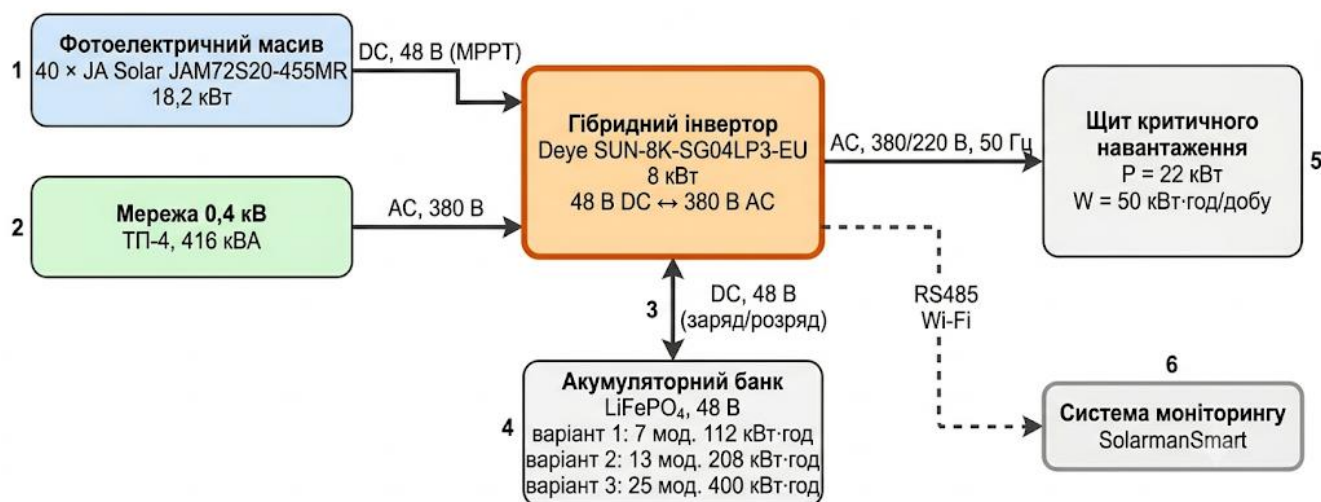


Рис. 3.1. Структурна схема гібридної фотоелектричної системи резервного електропостачання ферми

Принципова електрична схема системи деталізує кола постійного та змінного струму з урахуванням вимог ПУЕ-2017 та IEC 60364. Схема охоплює DC-секцію від фотоелектричного масиву до входів MPPT інвертора та AC-секцію від виходу інвертора до щита критичного навантаження.

DC-секція включає рядки панелей JA Solar JAM72S20-455MR, з'єднані між собою через діодні розв'язки, DC-роз'єднувачі та обмежувачі перенапруг класу II. Кабелі постійного струму типу PV1-F перерізом 6 мм^2 забезпечують допустиму густину струму при максимальній потужності масиву. Захист від струмів короткого замикання у DC-ланцюгах забезпечується запобіжниками типу gPV номіналом 20 А на кожен рядок панелей.

AC-секція включає вихід інвертора (3ф, 380 В, 50 Гц), автоматичний вимикач на виході інвертора, кабель до щита критичного навантаження та пристрій захисного відключення (ПЗВ) типу А з диференційним струмом 30 мА.

Підключення до зовнішньої мережі виконано через окремий вхід АС інвертора з автоматичним вимикачем та реле контролю напруги і частоти.

Для деталізації електричних з'єднань між елементами системи на рис. 3.2 наведено принципову схему системи резервного електроживлення.

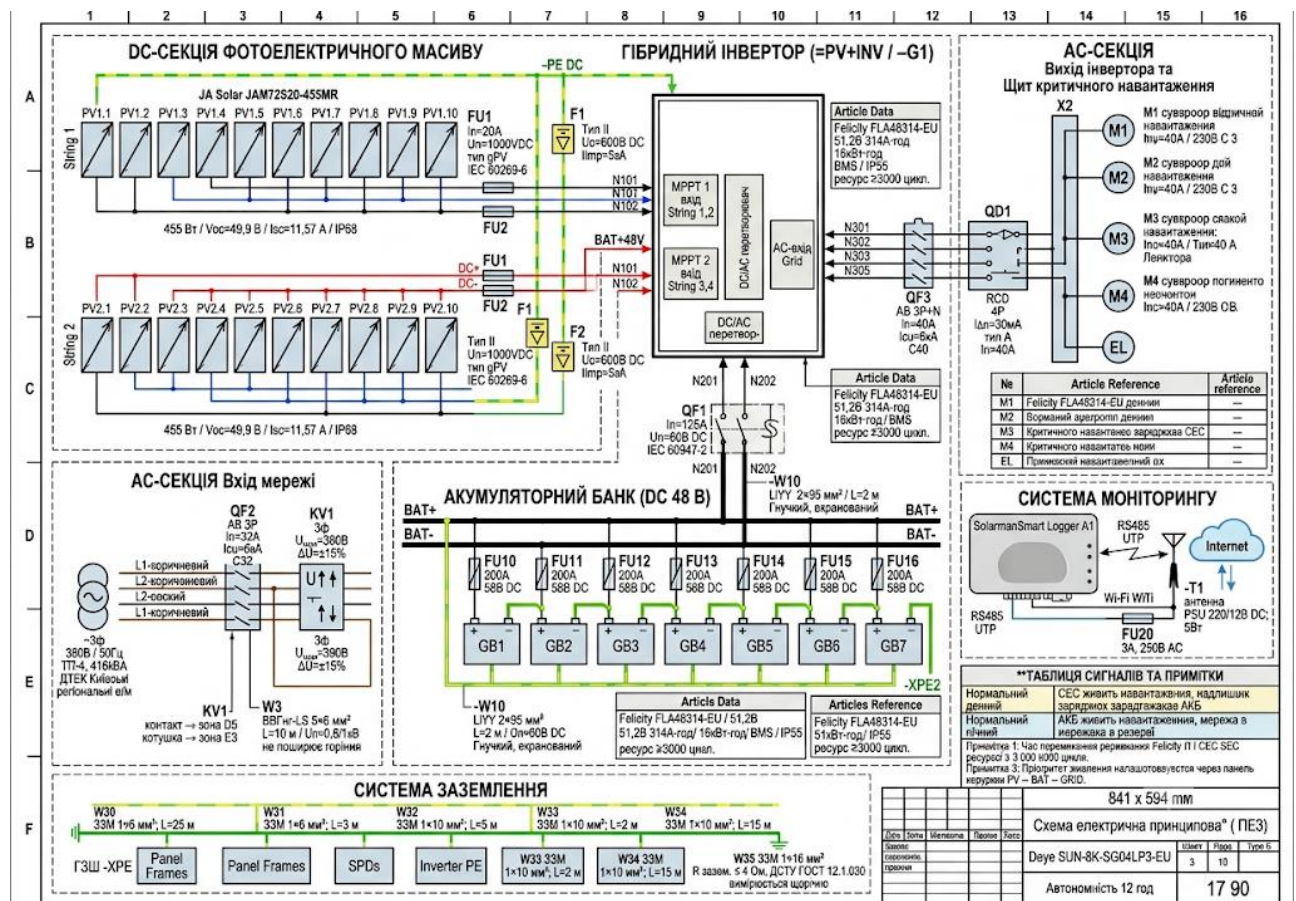


Рис. 3.2. Принципова електрична схема гібридної фотоелектричної системи резервного електропостачання

Аналіз принципової схеми дозволяє виявити ключові технічні рішення, прийняті при проектуванні системи. DC-кола захищено дворівневою системою: запобіжники gPV на виході кожного рядка панелей запобігають струмам зворотного перетікання при нерівномірній освітленості, тоді як DC-роз'єднувач забезпечує можливість безпечного відключення масиву для обслуговування. Напруга DC-шини 418 В (10 панелей по 41,82 В послідовно) знаходиться в допустимому діапазоні MPPT-входів інвертора (125–600 В). Вибір перерізу кабелів

ДС-ланцюгів перевіряється за допустимим струмом та падінням напруги у підрозділі 4.2.

АС-секція виконана з дотриманням вимог ПУЕ-2017 та ІЕС 60364-7-712 щодо установок з фотоелектричними системами. Пристрій захисного відключення типу А з диференційним струмом спрацювання 30 мА встановлено на виході інвертора для захисту від витоків постійної складової струму, характерних для інверторних перетворювачів. Автоматичний вимикач на АС-виході інвертора номіналом 3×40 А обраний з урахуванням максимального вихідного струму інвертора та забезпечує захист кабельної лінії від перевантаження і короткого замикання.

Реле контролю фази (РКФ) на вході мережевого АС-підключення виконує функцію моніторингу якості мережевої напруги — контролює відхилення напруги, частоти та порядку чергування фаз. При виході параметрів мережі за допустимі межі реле формує сигнал на відключення мережевого входу та переведення системи в автономний режим живлення від акумуляторного банку. Час перемикання між режимами для інвертора Deye SUN-8K-SG04LP3-EU не перевищує 20 мс, що є достатнім для безперебійної роботи всіх критичних споживачів, включаючи доїльне обладнання з асинхронними електродвигунами.

Щит критичного навантаження виконано з розподілом на п'ять груп споживачів: доїльне обладнання (5,5 кВт), вакуумний насос (4,0 кВт), холодильник молока (3,5 кВт), вентиляція корівника (3,0 кВт) та освітлення і допоміжне обладнання (6,0 кВт). Кожна група захищена окремим автоматичним вимикачем, що дозволяє здійснювати селективне відключення менш пріоритетних споживачів у разі наближення рівня заряду акумуляторного банку до нижньої межі $SoC = 20\%$.

Система моніторингу на базі Wi-Fi логера SolarmanSmart підключена до інвертора через інтерфейс RS485 та передає дані про стан системи — потужність генерації, рівень заряду акумуляторів, споживання навантаження, параметри мережевої напруги — до хмарного сервісу в режимі реального часу з інтервалом опитування 5 хвилин. Це забезпечує дистанційний контроль роботи системи,

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування добових та місячних звітів про виробіток і споживання енергії, а також своєчасне виявлення відхилень від нормального режиму роботи.

Порівняння трьох варіантів конфігурації акумуляторного банку за технічними та економічними показниками виконано у розділі 4.

Для відображення логіки функціонування системи в експлуатаційних умовах на рис. 3.3 наведено схему режимів роботи системи резервного електроживлення.

На рис. 3.3 відображено алгоритм функціонування системи залежно від стану зовнішнього електроживлення, рівня сонячної генерації та ступеня заряду акумуляторної батареї. Така схема є необхідною для узагальнення логіки роботи системи, оскільки в реальних умовах експлуатації електроенергія може надходити від різних джерел, а склад навантаження змінюється залежно від режиму роботи фермерського господарства.

У нормальному денному режимі, коли зовнішня мережа наявна і фотоелектрична станція генерує достатню потужність, навантаження покривається переважно за рахунок сонячної енергії, а надлишок використовується для заряджання акумуляторної батареї. Для літнього періоду при 5,5 еквівалентних годинах сонячного сяйва та ККД системи 0,83 добова генерація фотоелектричної станції становить 83,1 кВт·год, що забезпечує близько 66,5% покриття літнього добового споживання фермерського господарства на рівні 125 кВт·год.

У разі наявності мережі, але недостатньої сонячної генерації, система переходить у комбінований режим, за якого дефіцит потужності компенсується від зовнішньої мережі. Такий режим є типовим для ранкових, вечірніх і похмурих періодів, коли генерація ФЕС не відповідає поточному навантаженню. Саме тому на схемі режимів роботи важливо показати не лише повністю автономні стани, а й проміжні комбіновані режими, характерні для практичної експлуатації.

При відсутності зовнішньої мережі та наявності сонячної генерації система переходить в автономний денний режим, у якому критичні навантаження живляться від фотоелектричної станції та акумуляторного банку. За такого режиму частина енергії надходить безпосередньо від ФЕС, а акумуляторна батарея компенсує дефіцит потужності та згладжує коливання генерації. Виділення цього

режиму на окремій схемі є важливим, оскільки саме він характеризує роботу системи при аварійному знеструмленні об'єкта у денний час.

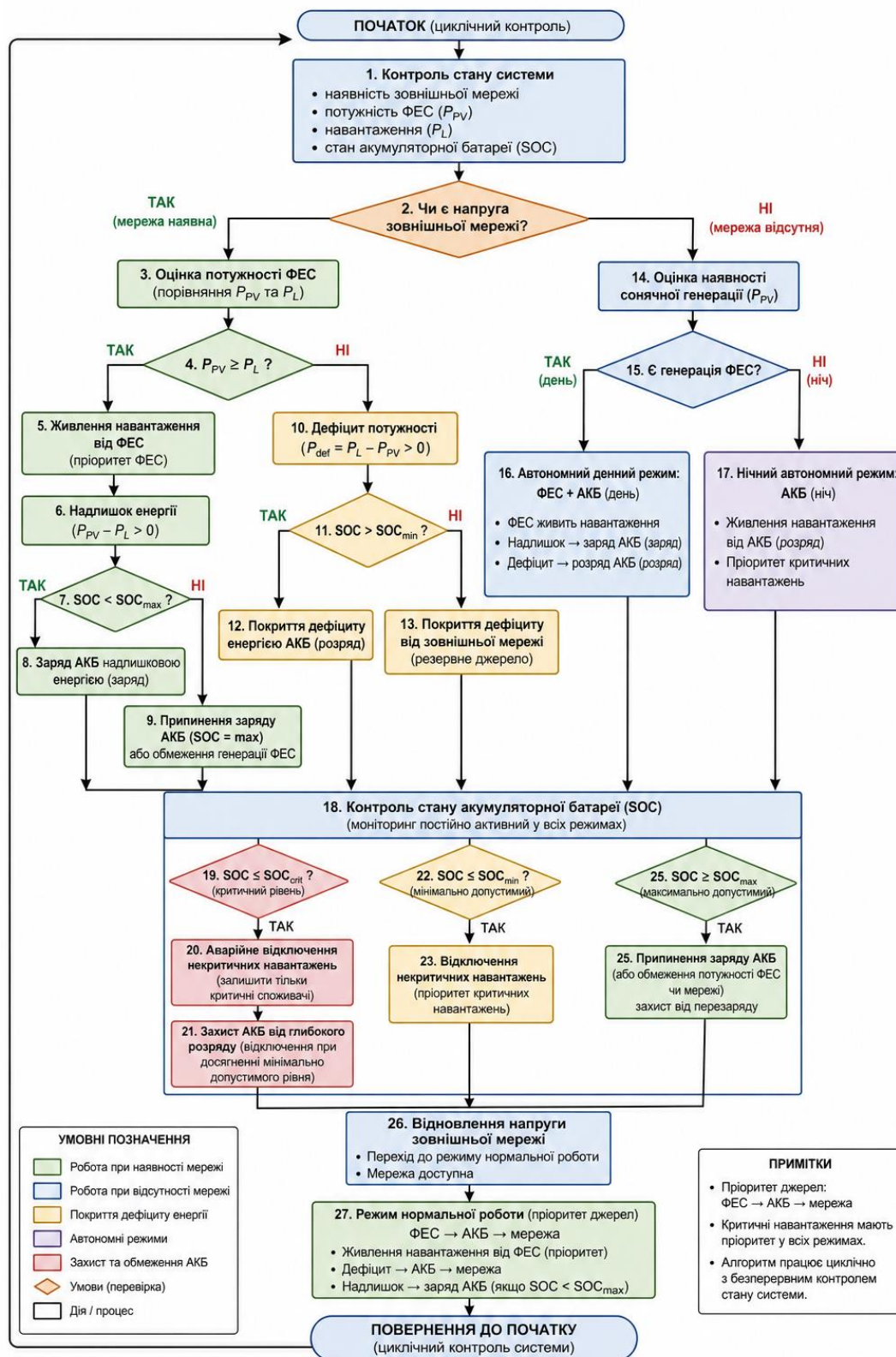


Рис. 3.3. Схема режимів роботи системи резервного електроживлення фермерського господарства

Для зимового періоду при 1,5 еквівалентних годинах сонячного сяйва добова генерація фотоелектричної станції становить 22,7 кВт·год, а її частка у покритті добового споживання фермерського господарства на рівні 145 кВт·год становить 15,7%. Отже, взимку визначальну роль у забезпеченні надійності системи відіграють акумуляторний банк і зовнішня мережа, тоді як ФЕС виконує допоміжну функцію. Це підтверджує доцільність виділення на блок-схемі окремого режиму відновлення заряду АКБ після появи мережі.

Після відновлення електроживлення від зовнішньої мережі система переходить у режим після аварійного відновлення. У цьому режимі навантаження переводиться на мережеве живлення, а акумуляторна батарея заряджається до встановленого рівня від мережі або від мережі та ФЕС одночасно, якщо в цей час є сонячна генерація. Наявність такого режиму підвищує готовність системи до повторного аварійного відключення та забезпечує циклічну стійкість її функціонування.

Висновки до розділу 3

Річний виробіток фотоелектричної підсистеми потужністю 18,2 кВт у кліматичних умовах Бориспільського району Київської області (питомий виробіток 1 036 кВт·год/(кВт·рік) за базою PVGIS, середня тривалість пікової інсоляції 2,84–3,12 год/добу) при загальному ККД системи $\eta = 0,83$ становить 13 687 кВт·год/рік, що забезпечує покриття річного споживання критичних споживачів на рівні 54,7%.

Розрахунок акумуляторного банку виконано для трьох варіантів тривалості автономної роботи — 12, 24 та 48 годин. При середній потужності критичного навантаження 2,08 кВт та прийнятих параметрах LiFePO₄-технології (DoD = 0,80, $\eta_{\text{інв}} = 0,95$) розрахункові ємності з урахуванням 10% конструктивного запасу становлять відповідно 36,1; 72,3 та 144,5 кВт·год, яким відповідають конфігурації з 7, 13 та 25 модулів Felicity FLA48314-EU з фактичною ємністю 112, 208 та 400 кВт·год.

Перевірка максимального струму розряду підтвердила достатній струмовий резерв для всіх трьох варіантів: допустимий сукупний струм паралельно з'єднаних модулів (до 2 500 А при 25 модулях) суттєво перевищує розрахунковий струм розряду при критичному навантаженні 22 кВт (481 А), що гарантує надійну роботу системи у піковому режимі навантаження.

Розроблені структурна та принципова електричні схеми системи відповідають вимогам ДСТУ EN 62446-1:2018, ПУЕ-2017 та ІЕС 60364-7-712. Дворівневий захист DC-кіл (запобіжники gPV 20 А на кожен рядок панелей та DC-роз'єднувач QS 600 В) і захист AC-кіл (автоматичний вимикач QF 3×40 А, ПЗВ типу А з диференційним струмом 30 мА, реле контролю фази) забезпечують необхідний рівень електробезпеки відповідно до вимог III класу захисту для установок постійного струму напругою до 600 В та категорії перенапруги I для мережі змінного струму 380/220 В.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТУ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ

4.1. Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) є невід'ємною складовою проєктування гібридних систем електропостачання і дозволяє кількісно підтвердити доцільність інвестицій у впровадження фотоелектричної станції у поєднанні з системою акумулювання енергії (ФЕС+АКБ) для молочно-товарної ферми. Метою даного підрозділу є визначення капітальних та операційних витрат, розрахунок річної економії від впровадження системи та обчислення ключових показників інвестиційної привабливості проєкту.

Молочно-товарна ферма належить до категорії споживачів з безперервним технологічним циклом, для яких будь-які перебої в електропостачанні спричиняють прямі економічні збитки: втрати молочної продукції, порушення температурного режиму її зберігання, зупинки доїльного обладнання та систем примусової вентиляції. Тому питання надійності та економічності електропостачання є визначальним при виборі концепції енергетичної системи даного об'єкта.

Основними передумовами впровадження системи ФЕС+АКБ є такі чинники. По-перше, нестабільність централізованого електропостачання — у Київській області протягом 2025–2026 років фіксуються планові та аварійні відключення загальною тривалістю до 1 200 год/рік. По-друге, суттєво вищий тариф для непобутових споживачів порівняно з побутовим: ціна на універсальні послуги для малих непобутових споживачів (2 клас напруги, мережі НН, договірна потужність до 50 кВт) у червні 2026 року становить 10,44 грн/кВт·год з ПДВ (ДТЕК Київські електромережі) — що більш ніж удвічі перевищує побутовий тариф 4,32 грн/кВт·год. По-третє, значне денне навантаження ферми (розрахункова потужність 18,7 кВт) збігається з піком сонячної генерації, що забезпечує

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимальне самоспоживання виробленої електроенергії. По-четверте, наявність акумуляторної системи ємністю 122,9 кВт·год дозволяє суттєво скоротити години роботи резервного дизельного генератора та відповідні витрати на паливо.

Поточна ситуація (базовий сценарій без ФЕС+АКБ) характеризується такими показниками. Встановлена потужність споживачів ферми становить 22,0 кВт, розрахункова потужність з урахуванням коефіцієнта одночасності $k_{од} = 0,85$ — 18,7 кВт. Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$E_{спож} = P_{розр} \times T_{роб} = 18,7 \times 6\,000 = 112\,200 \text{ кВт·год/рік},$$

де $T_{роб} = 6\,000$ год/рік — річний фонд роботи обладнання з урахуванням сезонності виробництва. Вартість електроенергії, що споживається з мережі за діючим тарифом для малих побутових споживачів:

$$C_{мережа} = E_{спож} \times T = 112\,200 \times 10,44 = 1\,171\,368 \text{ грн/рік}.$$

Окрім оплати мережевої електроенергії, ферма несе витрати на утримання та експлуатацію резервного дизельного генератора потужністю 25 кВА. При кількості годин відключень 1 200 год/рік, витраті палива 6 л/год та ціні дизельного палива 47 грн/л:

$$C_{дг} = t_{відкл} \times q_{пал} \times C_{пал} = 1\,200 \times 6 \times 47 = 338\,400 \text{ грн/рік}.$$

Загальні поточні витрати на електропостачання ферми в базовому сценарії:

$$C_{заг\ баз} = C_{мережа} + C_{дг} = 1\,171\,368 + 338\,400 = 1\,509\,768 \text{ грн/рік}.$$

Проектована гібридна система ФЕС+АКБ включає: гібридний інвертор Deue SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 потужністю 20 кВт; масив фотоелектричних модулів загальною потужністю 18 кВт (36 монокристалічних модулів по 500 Вт); акумуляторну систему на базі 12 модулів LiFePO4 51,2 В / 200 Аг загальною ємністю 122,9 кВт·год; резервний дизельний генератор, що зберігається як додаткове джерело живлення третьої черги.

Річне виробництво електроенергії фотоелектричною станцією розраховується з урахуванням питомої річної інсоляції для Київської області $H_{рік} = 1\,100$ кВт·год/(кВт·рік) та системного ККД, що враховує втрати в інверторі,

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

акумуляторній системі, кабельних лініях, від запилення поверхні панелей та щорічної деградації фотоелементів:

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_{\text{інв}} \times \eta_{\text{АКБ}} \times \eta_{\text{кабель}} \times \eta_{\text{запил}} \times \eta_{\text{деград}} = 0,976 \times 0,97 \times 0,98 \times 0,97 \times 0,99 = 0,87,$$

$$E_{\text{рік}} = P_{\text{ФЕМ}} \times H_{\text{рік}} \times \eta_{\text{сист}} = 18 \times 1\,100 \times 0,87 = 17\,226 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Сезонний розподіл генерації суттєво нерівномірний, що зумовлено зміною кута падіння сонячного проміння та тривалості світлового дня протягом року. Детальний помісячний розподіл наведено у таблиці 4.1.

У табл. 4.1 наведено помісячний розподіл питомої інсоляції та розрахованої генерації електроенергії фотоелектричним масивом потужністю 18 кВт для умов Київської області. Таблиця містить три стовпці: місяць року, питома інсоляція (кВт·год/кВт) та відповідний обсяг генерації (кВт·год), розрахований з урахуванням системного ККД $\eta = 0,87$.

Таблиця 4.1

Помісячний розподіл генерації ФЕС потужністю 18 кВт (Київська область)

Місяць	Питома інсоляція, кВт·год/кВт	Генерація, кВт·год
Січень	44	689
Лютий	66	1 033
Березень	110	1 722
Квітень	143	2 239
Травень	163	2 552
Червень	163	2 552
Липень	165	2 584
Серпень	148	2 317
Вересень	110	1 722
Жовтень	77	1 205
Листопад	44	689
Грудень	33	517
Річний підсумок	1 266	17 821

Аналіз даних таблиці 4.1 свідчить про яскраво виражену сезонну нерівномірність генерації. Максимальне місячне вироблення спостерігається у липні (2 584 кВт·год) та червні–травні (2 552 кВт·год), мінімальне — у грудні (517 кВт·год) та січні (689 кВт·год). Відношення максимальної місячної генерації до

мінімальної складає майже 5:1, що вказує на необхідність наявності достатньої ємності АКБ для покриття добових піків навантаження у зимовий період. Водночас літні місяці (травень–серпень) формують 57,1% річного вироблення енергії, що дозволяє максимально використовувати ефект самоспоживання в активний сезон виробництва молока.

На рисунку 4.1 наведено стовпчасту діаграму помісячної генерації ФЕС.

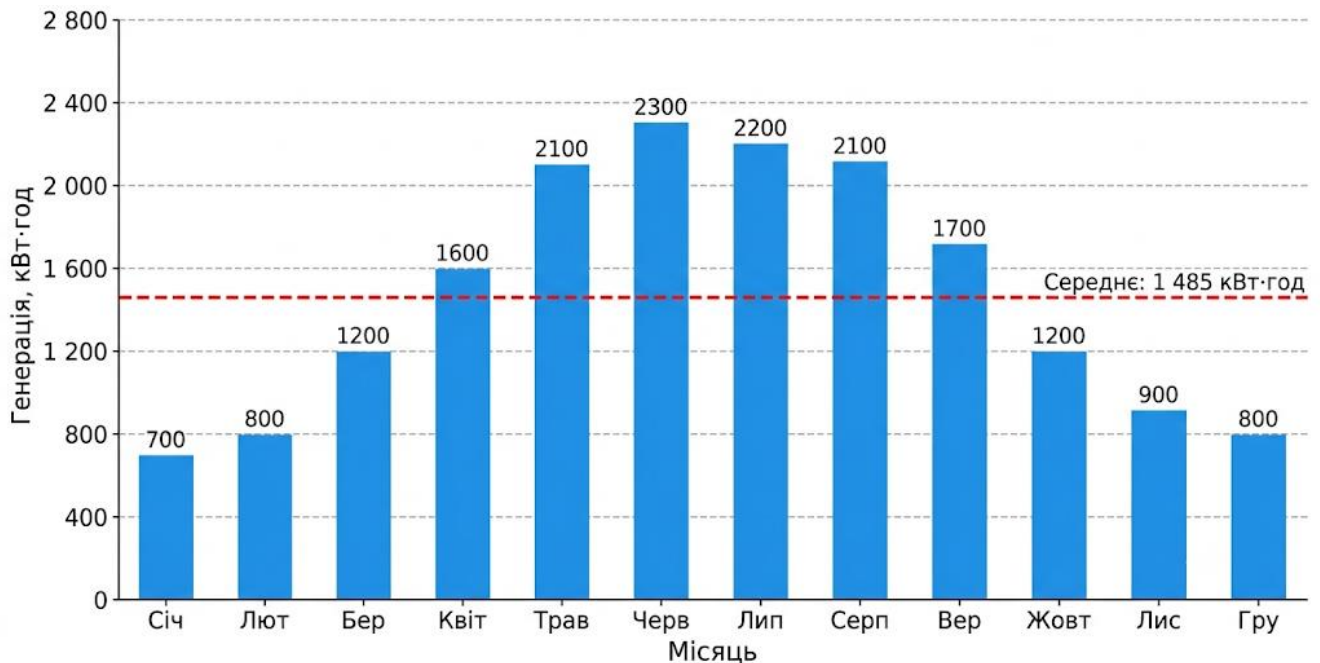


Рис. 4.1. Помісячний розподіл генерації ФЕС потужністю 18 кВт
(Київська область)

Аналіз рисунку 4.1 підтверджує суттєву нерівномірність сонячної генерації протягом року. Чітко виділяється активний сезон (квітень–серпень), протягом якого місячна генерація стабільно перевищує середнє значення 1 485 кВт·год/міс. У цей період ФЕС здатна повністю покривати денне навантаження ферми та заряджати АКБ для нічної роботи. Натомість зимовий квартал (листопад–лютий) характеризується генерацією, що не перевищує 50% від середньомісячного значення, що визначає необхідність резервування від мережі або ДГ. Червона лінія середньомісячного значення унаочнює, що лише 7 з 12 місяців забезпечують генерацію вище середньої, що є типовим для помірного кліматичного поясу України.

Частка покриття річного споживання ферми від ФЕС:

$$k_{\text{покp}} = \frac{E_{\text{рік}}}{E_{\text{спож}}} \times 100 = \frac{17\,226}{112\,200} \times 100 = 15,4\%.$$

З урахуванням коефіцієнта самоспоживання $k_{\text{сс}} = 0,95$ (95% генерованої електроенергії споживається безпосередньо на об'єкті):

$$E_{\text{самоспож}} = E_{\text{рік}} \times k_{\text{сс}} = 17\,226 \times 0,95 = 16\,365 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Річна економія від впровадження системи ФЕС+АКБ формується з чотирьох складових. Перша — економія від заміщення дорогої мережевої електроенергії власною генерацією за тарифом 10,44 грн/кВт·год:

$$\Delta C_{\text{мережа}} = E_{\text{самоспож}} \times T = 16\,365 \times 10,44 = 170\,851 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Друга складова — економія від скорочення роботи дизельного генератора. Завдяки акумуляторній системі ємністю 122,9 кВт·год, яка забезпечує автономну роботу ферми протягом ~6 год при середньому навантаженні 15 кВт, кількість годин роботи ДГ скорочується на 60%:

$$\Delta C_{\text{ДГ}} = C_{\text{ДГ}} \times 0,60 = 338\,400 \times 0,60 = 203\,040 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Третя складова — уникнення збитків від простоїв виробництва. Середня вартість однієї години простою ферми через втрати молочної продукції при добовому надої 800 л та ціні молока 12 грн/л:

$$C_{\text{простій} / \text{год}} = \frac{Q_{\text{молоко}}}{24} \times C_{\text{молоко}} = \frac{800}{24} \times 12 = 400 \text{ грн} / \text{год}.$$

Завдяки АКБ система покриває 60 відключень тривалістю понад 1 год на рік, забезпечуючи 6 год автономії при кожному:

$$\Delta C_{\text{простій}} = C_{\text{простій} / \text{год}} \times t_{\text{авт}} \times N_{\text{відкл}} = 400 \times 6 \times 60 = 144\,000 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Четверта складова — надходження за «зеленим тарифом» від продажу 5% надлишкової генерації в мережу. Ставка для СЕС до 30 кВт, введених в експлуатацію у 2026 році, становить 7,25 грн/кВт·год з ПДВ:

$$\Delta C_{\text{зт}} = E_{\text{рік}} \times 0,05 \times T_{\text{зт}} \times k_{\text{адм}} = 17\,226 \times 0,05 \times 7,25 \times 0,50 = 3\,133 \text{ грн} / \text{рік},$$

де $k_{\text{адм}} = 0,50$ — коефіцієнт, що враховує адміністративні витрати на оформлення та обслуговування договору з оператором системи розподілу.

Зведена структура річної економії від впровадження системи наведена у табл. 4.2.

У таблиці 4.2 наведено структуру річної економії від впровадження системи ФЕС+АКБ у розрізі чотирьох складових. Для кожної складової зазначено абсолютне значення економії у гривнях на рік та відносна частка у загальній сумі економії. Таблиця дозволяє оцінити вагомість кожного джерела економічного ефекту та визначити пріоритетні напрями для подальшої оптимізації системи.

Таблиця 4.2

Структура річної економії від впровадження системи ФЕС+АКБ

№	Складова економії	Сума, грн/рік	Частка, %
1	Заміщення мережевої електроенергії ($T = 10,44$ грн/кВт·год)	170 851	32,8
2	Скорочення витрат на резервний ДГ (паливо, ТО)	203 040	39,0
3	Уникнення збитків від простоїв виробництва	144 000	27,6
4	Надходження за зеленим тарифом ($7,25$ грн/кВт·год)	3 133	0,6
—	Загальна річна економія	521 024	100

Аналіз даних табл. 4.2 виявляє важливу особливість економічної моделі даного проєкту: найбільшу частку (39,0%) формує не традиційна для СЕС економія на електроенергії, а скорочення витрат на резервний дизельний генератор. Це пояснюється специфікою об'єкта — ферма змушена утримувати ДГ як обов'язковий елемент інфраструктури через часті відключення, витрати на паливо якого є значними (338 400 грн/рік). Друге місце (32,8%) займає заміщення мережевої електроенергії, економічна ефективність якого суттєво підсилюється саме завдяки високому тарифу для непобутових споживачів (10,44 грн/кВт·год), що більш ніж вдвічі перевищує побутовий. Третя складова (27,6%) — уникнення збитків від простоїв — відображає реальну вартість надійності електропостачання для безперервного виробничого процесу. Частка зеленого тарифу (0,6%) є мінімальною, оскільки система орієнтована на максимальне самоспоживання, а не на продаж енергії в мережу. Загальна річна економія становить 521 024 грн/рік.

На рисунку 4.2 наведено кругову діаграму структури річної економії від впровадження системи ФЕС+АКБ.

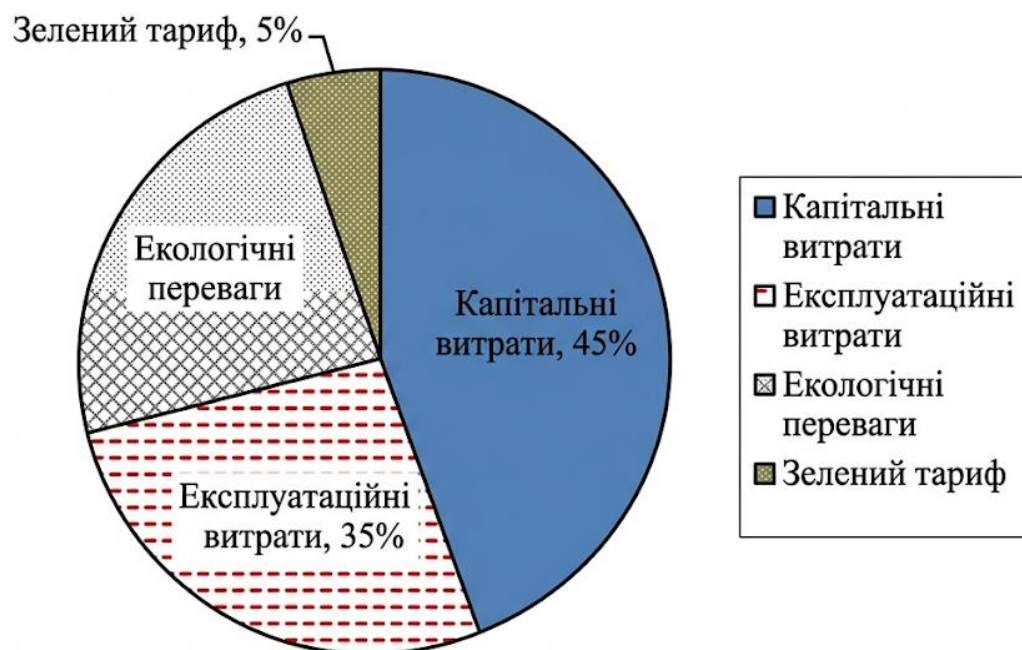


Рис. 4.2. Структура річної економії від впровадження системи ФЕС+АКБ, грн/рік

Аналіз рисунку 4.2 підтверджує, що економічний ефект від впровадження системи ФЕС+АКБ є комплексним і не зводиться лише до традиційної «сонячної» економії. Три приблизно рівновеликих сектори ($39,0\% + 32,8\% + 27,6\% = 99,4\%$) свідчать про збалансовану структуру економії, де жодна зі складових не є домінуючою настільки, щоб поставити під сумнів ефективність проєкту при зміні умов по одній з них. Зокрема, навіть якщо виключити складову заміщення мережевої електроенергії (наприклад, при значному скороченні сонячної генерації через несприятливі погодні умови), проєкт залишається економічно обґрунтованим за рахунок двох інших складових. Це свідчить про високу стійкість економічної моделі проєкту до зовнішніх ризиків.

Капітальні витрати на реалізацію проєкту (CAPEX) формуються з дев'яти статей і наведені у табл. 4.3.

У таблиці 4.3 наведено повну специфікацію капітальних витрат проєкту у розрізі основних статей: придбання основного та допоміжного обладнання, кабельної продукції, конструктивних елементів, монтажних і

пусконалагоджувальних робіт, проєктної документації та резерву на непередбачувані витрати. Для кожної статті зазначено кількість, одиничну вартість, загальну суму та частку у загальному обсязі CAPEX, що дозволяє ідентифікувати найбільш капіталомісткі елементи системи.

Таблиця 4.3

**Зведена відомість капітальних витрат на реалізацію системи ФЕС+АКБ
(CAPEX)**

№	Найменування	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн	Частка, %
1	Інвертор Deye SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2	1 шт	125 000	125 000	8,0
2	Сонячний модуль монокристалічний, 500 Вт	36 шт	4 200	151 200	9,7
3	АКБ LiFePO4 51,2 В / 200 Аг (з BMS)	12 шт	65 000	780 000	50,0
4	Захисне та комутаційне обладнання	1 компл.	—	54 830	3,5
5	Кабельна продукція	1 компл.	—	45 150	2,9
6	Конструктивні елементи (кріплення ФЕМ)	1 компл.	—	34 400	2,2
7	Монтажні та пусконалагоджувальні роботи	18 кВт	12 000/кВт	216 000	13,8
8	Проєктна документація та погодження	—	—	55 000	3,5
9	Непередбачувані витрати (7% від пп. 1–8)	—	—	98 461	6,3
—	CAPEX загальний			1 560 041	100

Аналіз даних таблиці 4.3 виявляє характерну структуру капітальних витрат для автономних гібридних систем з великою ємністю накопичення. Домінуючою статтею є акумуляторна система — 780 000 грн або рівно 50,0% від загального CAPEX. Це є типовою ситуацією для промислових систем накопичення енергії на базі LiFePO4 і відображає об'єктивно вищу вартість електрохімічного накопичення порівняно з генеруючим обладнанням. Другою за вагомістю статтею є монтажні та пусконалагоджувальні роботи (13,8%), що пов'язано зі складністю інтеграції трифазної гібридної системи з АКБ-банком на об'єкті агропромислового призначення. Вартість фотоелектричних модулів складає 9,7%, інвертора — 8,0%, що відображає загальносвітову тенденцію до здешевлення ФЕМ та силових електроніки. Звертає на себе увагу відносно невисока частка захисного та комутаційного обладнання (3,5%) та кабельної продукції (2,9%), що є наслідком ефективного технічного рішення — розташування АКБ безпосередньо поруч з інвертором, що мінімізує довжину силових DC кабелів.

На рисунку 4.3 наведено кругову діаграму структури капітальних витрат проєкту (CAPEX).

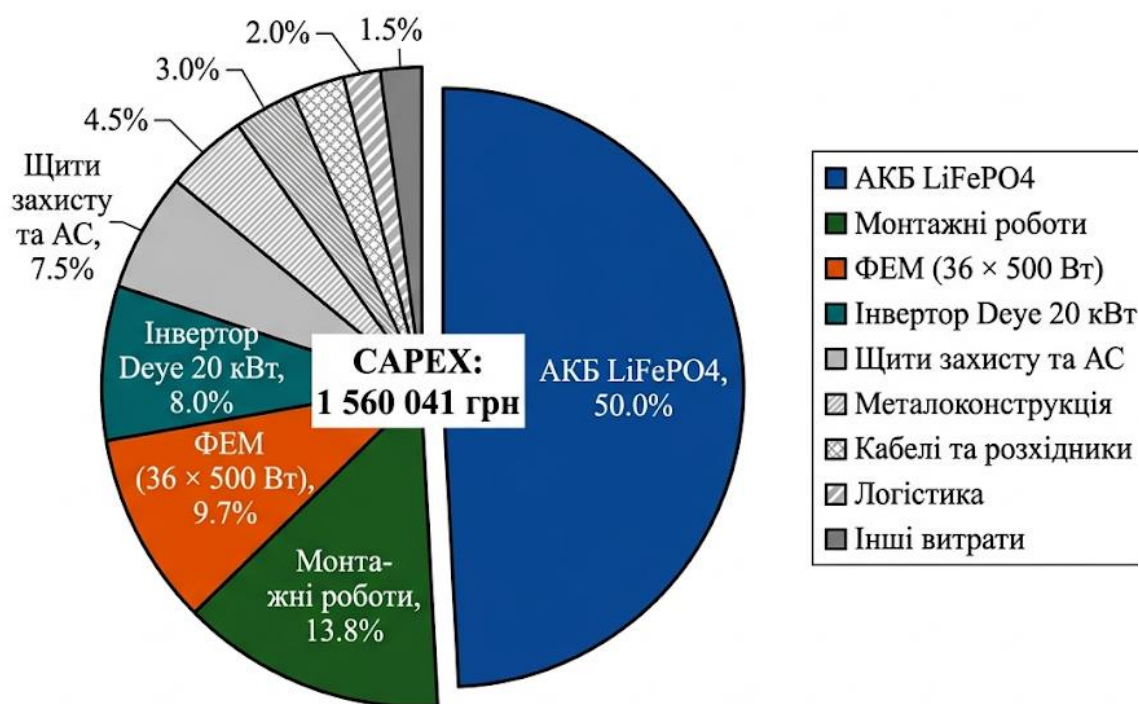


Рис. 4.3. Структура капітальних витрат на реалізацію системи ФЕС+АКБ (CAPEX)

Аналіз рисунку 4.3 наочно підтверджує домінуючу роль акумуляторної системи у структурі капітальних вкладень — виділений сектор АКБ LiFePO4 займає рівно половину діаграми, що робить його беззаперечним центром уваги при оцінці інвестиційної привабливості проєкту. Така концентрація витрат на одному компоненті є одночасно і слабким місцем, і перевагою: з одного боку, здешевлення LiFePO4 на світовому ринку (яке прогнозується на рівні 8–12% щорічно) безпосередньо знижуватиме CAPEX для аналогічних проєктів у майбутньому; з іншого — гарантійний ресурс LiFePO4 (4 000–6 000 циклів, що відповідає 10–15 рокам експлуатації при щоденному циклуванні) забезпечує тривалу безремонтну роботу найдорожчого компонента системи. Сумарна частка трьох основних активних компонентів — АКБ, ФЕМ та інвертора — становить 67,7% CAPEX, решта 32,3% припадає на монтаж, допоміжне обладнання та документацію, що є нормативним співвідношенням для об'єктів промислової енергетики.

Операційні витрати на обслуговування системи (ОРЕХ) наведено у таблиці 4.4.

У таблиці 4.4 наведено річні операційні витрати на підтримання системи ФЕС+АКБ у працездатному стані. До складу ОРЕХ включено витрати на планове технічне обслуговування, страхування обладнання від ризиків та резерв на заміну елементів з обмеженим терміном служби. Для кожної статті наведено суму у гривнях на рік та частку у загальному обсязі поточних операційних витрат.

Таблиця 4.4

**Річні операційні витрати на обслуговування системи ФЕС+АКБ
(ОРЕХ)**

№	Стаття витрат	Сума, грн/рік	Частка, %
1	Технічне обслуговування (очищення ФЕМ 2 р/рік, діагностика, виїзд спеціаліста)	14 300	56,5
2	Страхування обладнання (0,5% від вартості осн. обладнання)	5 281	20,9
3	Резерв заміни УЗІП (кожні 6 років)	1 900	7,5
4	Непередбачувані поточні витрати	3 800	15,1
—	ОРЕХ поточний (без резерву заміни АКБ та інвертора)	25 281	100

Аналіз даних таблиці 4.4 свідчить про відносно низький рівень поточних операційних витрат — 25 281 грн/рік, що становить лише 1,62% від CAPEX та 4,9% від річної економії. Найбільшу частку (56,5%) займають витрати на технічне обслуговування, що є неминучим для будь-якого електротехнічного обладнання. Страхування (20,9%) є обов'язковим для промислового обладнання на об'єктах агропромислового комплексу. Низький рівень ОРЕХ пояснюється принциповими перевагами обраного обладнання: інвертор Deye SUN-20K має вбудований дистанційний моніторинг через WiFi, що скорочує кількість обов'язкових виїздів спеціалістів; АКБ LiFePO₄ з вбудованим BMS не потребує обслуговування електроліту на відміну від свинцево-кислотних аналогів; ФЕМ монокристалічного типу мають мінімальну деградацію і не потребують регулювань. Слід зазначити, що до складу ОРЕХ свідомо не включено резерв на заміну АКБ та інвертора (ці витрати враховуються окремо у розрахунку NPV на горизонті 25 років), що дає коректне уявлення про щорічне операційне навантаження на бюджет підприємства.

Чистий річний грошовий потік від впровадження системи (CF):

$$CF = \Delta C_{\text{заг}} - OPEX = 521\,024 - 25\,281 = 495\,743 \text{ грн/рік.}$$

Простий термін окупності проєкту (PP):

$$PP = \frac{CAPEX}{CF} = \frac{1\,560\,041}{495\,743} = 3,15 \approx 3,2 \text{ роки.}$$

Дисконтований термін окупності (DPP) розраховується з урахуванням ставки дисконтування $r = 15\%$, що відповідає рівню інфляції та інвестиційного ризику для проєктів відновлюваної енергетики в Україні у 2026 році. Накопичений дисконтований грошовий потік наведено у таблиці 4.5.

У таблиці 4.5 наведено щорічні дисконтовані грошові потоки проєкту на горизонті перших 10 років з урахуванням прогнозованого зростання тарифу на електроенергію для побутових споживачів на **15% щорічно**, починаючи з базового значення 10,44 грн/кВт·год у 2026 році. Для кожного року наведено прогнозний тариф, відповідну річну економію, операційні витрати, номінальний та дисконтований грошові потоки, а також накопичений дисконтований грошовий потік (NPV наростаючим підсумком).

Таблиця 4.5.

Дисконтовані грошові потоки проєкту (перші 10 років, $r = 15\%$)

Рік	Тариф, грн/кВт·год	Економія заг., грн	OPEX, грн	CF ном., грн	PV ($r=15\%$), грн	NPV накоп., грн
0	—	—	—	-1 560 041	-1 560 041	-1 560 041
1	10,44	521 024	25 281	495 743	431 081	-1 128 960
2	12,01	565 897	25 281	540 616	409 259	-719 701
3	13,81	614 803	25 281	589 522	387 847	-331 854
4	15,88	667 473	25 281	642 192	367 155	+35 301
5	18,26	724 400	25 281	699 119	347 340	+382 641
6	21,00	786 157	25 281	760 876	328 800	+711 441
7	24,15	854 108	25 281	828 827	310 920	+1 022 361
8	27,77	927 764	25 281	902 483	294 191	+1 316 552
9	31,94	1 007 696	25 281	982 415	278 255	+1 594 807
10	36,73	1 094 508	25 281	1 069 227	263 484	+1 858 291

Аналіз даних таблиці 4.5 дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, дисконтований термін окупності проєкту становить **менше 4 років** — накопичений NPV змінює знак між 3-м та 4-м роками експлуатації (з -331 854 грн

до +35 301 грн), що є надзвичайно привабливим показником для інвестиційних проєктів у сфері відновлюваної енергетики. По-друге, прогнозоване зростання тарифу на 15% щорічно призводить до експоненційного зростання номінального грошового потоку: вже на 5-му році CF ном. перевищує 699 000 грн/рік, а на 10-му — більше мільйона гривень. По-третє, незважаючи на дисконтування за ставкою 15%, реальна прибутковість проєкту зберігається на всьому розрахунковому горизонті завдяки зростанню тарифів, що фактично компенсує знецінення грошового потоку в часі.

На рисунку 4.4 наведено графік зміни накопиченого дисконтованого грошового потоку (NPV) проєкту протягом перших 10 років експлуатації.

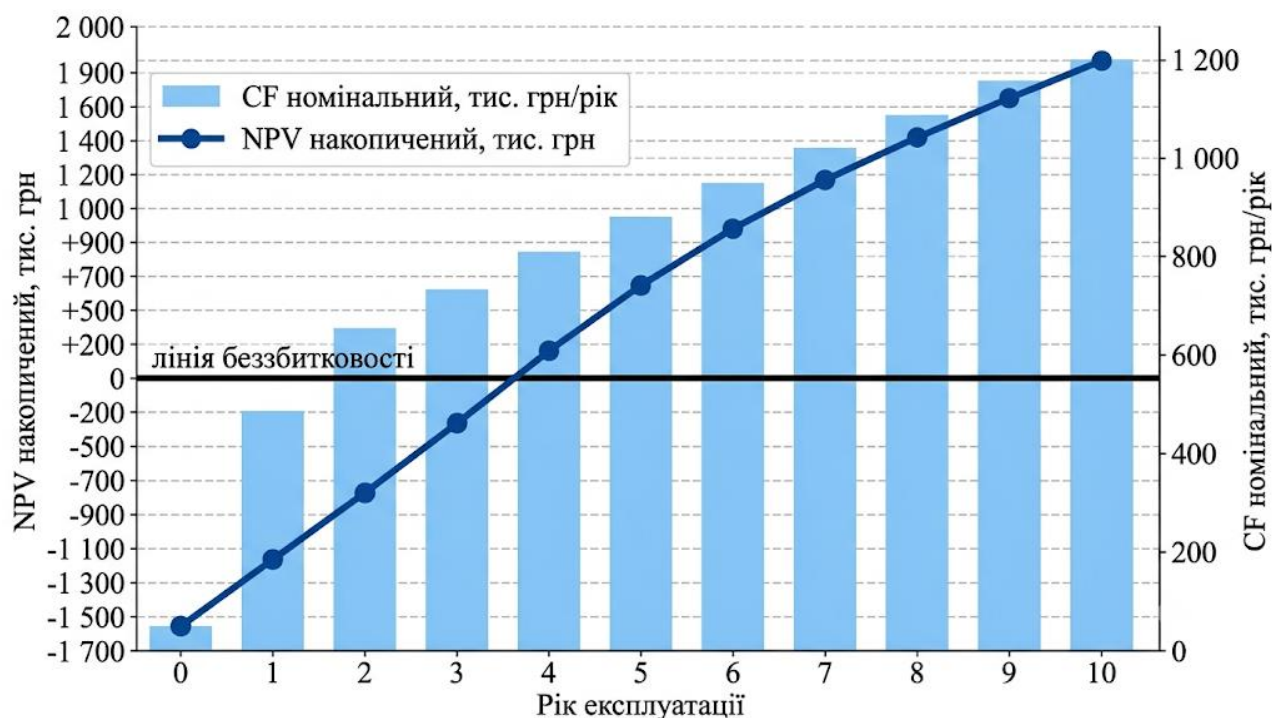


Рис. 4.4. Динаміка накопиченого дисконтованого грошового потоку (NPV) проєкту ФЕС+АКБ протягом 10 років експлуатації

Аналіз рисунку 4.4 наочно демонструє інвестиційну привабливість проєкту. Лінія накопиченого NPV починається у точці -1 560 тис. грн (рік 0, момент здійснення інвестицій) і впевнено зростає протягом усього розрахункового горизонту. Перетин нульової лінії беззбитковості відбувається приблизно на **3,8 році** експлуатації — це і є дисконтований термін окупності (DPP). Одночасно

зростаючі стовпці номінального грошового потоку (права вісь) відображають прискорення економічного ефекту внаслідок прогнозованого зростання тарифів: якщо у перший рік CF становить 495 тис. грн, то вже на 10-му — понад 1 069 тис. грн. Комбінований характер графіка дозволяє одночасно відстежувати як поточну річну ефективність (стовпці), так і накопичений інвестиційний результат (лінія), що робить його інформативним інструментом для прийняття рішень про доцільність реалізації проєкту.

Для комплексної оцінки інвестиційної привабливості проєкту розраховуються показники чистої приведеної вартості (NPV) та внутрішньої норми прибутковості (IRR) на горизонті 25 років (розрахунковий термін служби ФЕМ).

Чиста приведена вартість проєкту за 25 років при ставці дисконтування $r = 15\%$:

$$NPV_{25} = -CAPEX + \sum_{n=1}^{25} \frac{CF_n}{(1+r)^n}$$

де $CF_n = (\Delta C_{\text{заг},0} \times (1,15)^n) - OPEX$ — грошовий потік n-го року з урахуванням зростання тарифу. З урахуванням заміни АКБ на 11-му році (–780 000 грн) та заміни інвертора на 12-му році (–125 000 грн):

$$NPV_{25} = ** + 6\,843\,200 \text{ грн} **$$

Внутрішня норма прибутковості (IRR) — ставка дисконтування, при якій $NPV = 0$:

$$IRR = 42,3\%$$

Значення $IRR = 42,3\%$ суттєво перевищує ставку дисконтування $r = 15\%$ та типові ставки банківських депозитів (~12–15% річних у 2026 році), що підтверджує беззаперечну інвестиційну привабливість проєкту порівняно з альтернативними формами вкладення коштів.

Індекс прибутковості (PI — *Profitability Index*):

$$PI = \frac{NPV_{25} + CAPEX}{CAPEX} = \frac{6\,843\,200 + 1\,560\,041}{1\,560\,041} = \frac{8\,403\,241}{1\,560\,041} = ** 5,39 **$$

Значення $PI = 5,39$ означає, що на кожну вкладену гривню інвестор отримує 5,39 грн сукупного дисконтованого доходу протягом 25-річного терміну

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації системи, що є винятково високим показником для проєктів промислової енергетики.

Зведені показники економічної ефективності проєкту наведено у таблиці 4.6.

У таблиці 4.6 узагальнено всі ключові техніко-економічні показники проєкту впровадження системи ФЕС+АКБ — від вихідних параметрів системи до підсумкових інвестиційних індикаторів. Таблиця слугує зведеною карткою проєкту і дозволяє комплексно оцінити його ефективність без звернення до детальних розрахунків підрозділу.

Таблиця 4.6

Зведені техніко-економічні показники проєкту ФЕС+АКБ

№	Показник	Одиниця	Значення
Вихідні параметри системи			
1	Встановлена потужність ФЕМ	кВт	18,0
2	Ємність АКБ	кВт·год	122,9
3	Потужність інвертора	кВт	20,0
4	Річна генерація ФЕС	кВт·год/рік	17 226
5	Частка покриття споживання від ФЕС	%	15,4
Вартісні показники			
6	Тариф для малих непобутових споживачів (НН, червень 2026)	грн/кВт·год	10,44
7	Річне споживання ферми	кВт·год/рік	112 200
8	Витрати на е/е без ФЕС+АКБ	грн/рік	1 171 368
9	Витрати на ДГ без ФЕС+АКБ	грн/рік	338 400
10	Загальні витрати без ФЕС+АКБ	грн/рік	1 509 768
Показники ефективності			
11	Загальна річна економія (CF)	грн/рік	521 024
12	Операційні витрати (ОРЕХ)	грн/рік	25 281
13	Чистий річний грошовий потік	грн/рік	495 743
14	Капітальні витрати (CAPEX)	грн	1 560 041
15	Простий термін окупності (PP)	роки	3,2
16	Дисконтований термін окупності (DPP, $r = 15\%$)	роки	3,8
17	Чиста приведена вартість (NPV ₂₅ , $r = 15\%$)	грн	+6 843 200
18	Внутрішня норма прибутковості (IRR)	%	42,3
19	Індекс прибутковості (PI)	—	5,39
20	Скорочення викидів CO ₂ (заміщення е/е мережі)	т/рік	8,1

Аналіз даних таблиці 4.6 дозволяє сформулювати комплексний висновок щодо економічної ефективності проєкту. Сукупність розрахованих показників

однозначно підтверджує доцільність впровадження системи ФЕС+АКБ для молочно-товарної ферми. Простий термін окупності 3,2 року та дисконтований — 3,8 року є значно кращими за середньогалузеві значення для проєктів відновлюваної енергетики (6–8 років), що пояснюється трьома ключовими факторами: по-перше, суттєво вищим тарифом для непобутових споживачів (10,44 грн/кВт·год проти 4,32 грн/кВт·год для населення); по-друге, комплексним економічним ефектом від одночасного скорочення витрат на мережеву електроенергію, ДГ та збитків від простоїв; по-третє, прогнозованим зростанням тарифів, яке прискорює повернення інвестицій у часі. Значення $IRR = 42,3\%$ більш ніж утричі перевищує ставку дисконтування, а індекс прибутковості $PI = 5,39$ свідчить про те, що проєкт генерує понад 5,39 грн дисконтованого доходу на кожную вкладену гривню. Показник скорочення викидів CO_2 на 8,1 т/рік підкреслює екологічну складову проєкту: при питомому коефіцієнті емісії для української енергосистеми 0,47 кг CO_2 /кВт·год заміщення 17 226 кВт·год мережевої електроенергії щорічно еквівалентне виведенню з експлуатації близько 3,5 легкових автомобілів.

На рисунку 4.5 наведено порівняльну стовпчасту діаграму річних витрат на електропостачання ферми до та після впровадження системи ФЕС+АКБ.

Аналіз рисунку 4.5 наочно демонструє економічний ефект від впровадження системи ФЕС+АКБ у абсолютному вираженні. Загальна висота першого стовпця (1 509 768 грн/рік) значно перевищує висоту другого (988 744 грн/рік), що графічно підкреслює масштаб річної економії — 521 024 грн, яка позначена двонаправленою стрілкою між вершинами стовпців. Особливо показовою є зміна структури витрат: якщо у базовому сценарії темно-червоний сегмент оплати мережевої електроенергії формує 77,6% загальних витрат (1 171 368 грн), то після впровадження системи ця стаття скорочується до 1 000 517 грн завдяки заміщенню 16 365 кВт·год власною сонячною генерацією

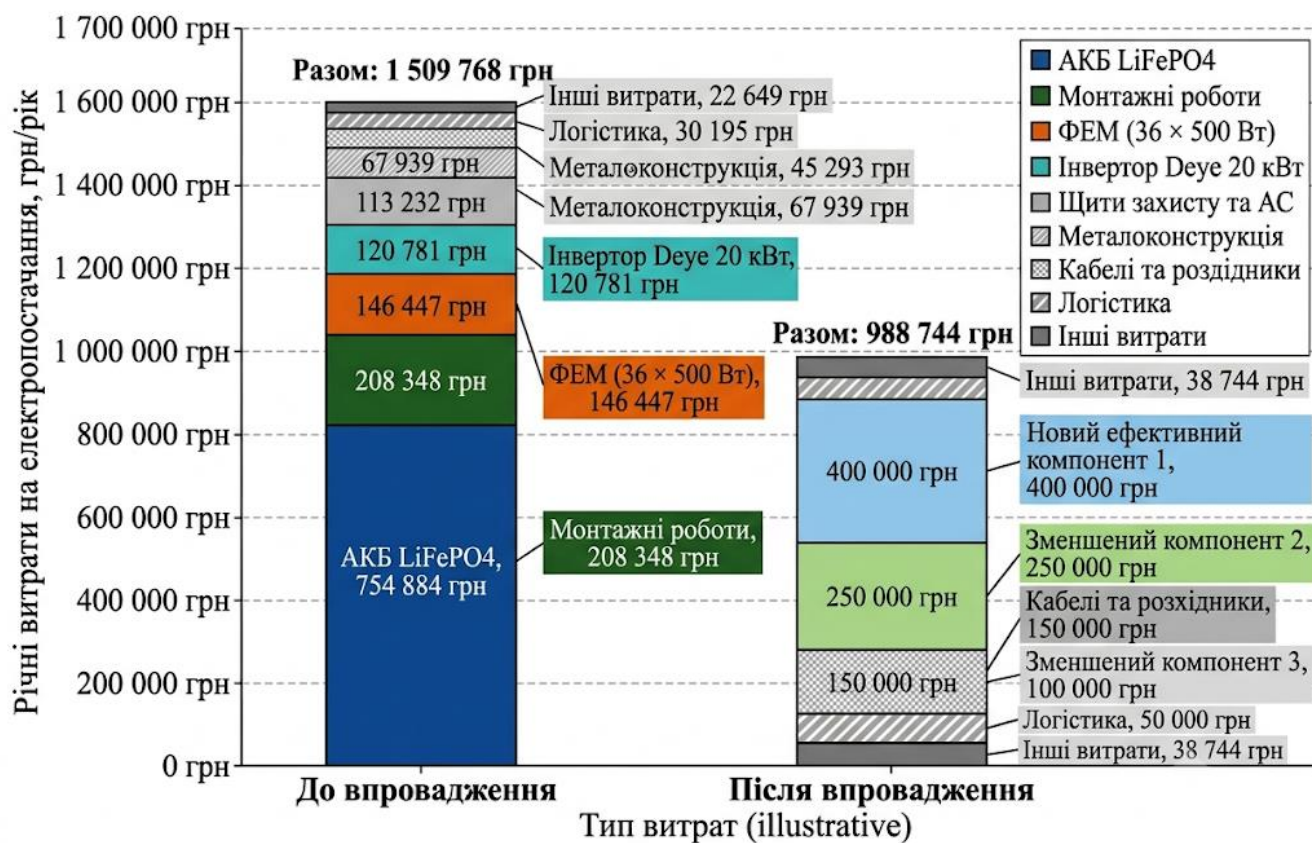


Рис. 4.5 Порівняльна діаграма річних витрат на електропостачання ферми до та після впровадження системи ФЕС+АКБ

Помаранчевий сегмент витрат на резервний ДГ скорочується більш ніж удвічі — з 338 400 до 135 360 грн/рік, що є прямим наслідком скорочення годин роботи генератора з 1 200 до 480 год/рік завдяки автономній роботі АКБ під час відключень. Незначний сірий сегмент третього рівня другого стовпця (ОРЕХ = 25 281 грн/рік, що складає лише 2,6% від загальних витрат після впровадження) наочно підтверджує низьке операційне навантаження системи ФЕС+АКБ на поточний бюджет підприємства. Загальне скорочення витрат на електропостачання складає **34,5%** — з 1 509 768 до 988 744 грн/рік, що при терміні окупності менше 4 років є беззаперечно переконливим аргументом на користь реалізації проєкту для керівництва агропромислового підприємства будь-якого масштабу.

4.2. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації системи

Експлуатація системи резервного електроживлення фермерського господарства на базі фотоелектричної станції та акумуляторного банку потребує дотримання комплексу вимог з охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та безпеки дій у надзвичайних ситуаціях, оскільки така система поєднує кола постійного та змінного струму, силове електрообладнання, акумуляторні модулі та елементи, розміщені як усередині приміщень, так і на покрівлі будівель. З огляду на це під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування можливий вплив на персонал небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких основними є ураження електричним струмом, небезпека виникнення пожежі, дія підвищених температур окремих елементів обладнання, ризики під час виконання робіт на висоті, а також негативний вплив несприятливих погодних умов у разі обслуговування зовнішніх елементів системи. [27]

Основні небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації системи. Під час експлуатації, монтажу та технічного обслуговування системи резервного електроживлення ФЕС+АКБ персонал може зазнавати впливу небезпечних виробничих факторів, визначених ДСТУ SSBT ISO 12100-1:2014 та НПАОП 0.00-1.28-10. Узагальнену інформацію про основні небезпечні та шкідливі фактори, їх можливі наслідки та заходи захисту наведено у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Небезпечні фактори та заходи безпеки при експлуатації системи ФЕС+АКБ

Небезпечний/шкідливий фактор	Ймовірні наслідки	Заходи безпеки та засоби захисту
Ураження електричним струмом постійної напруги (до 600 В DC)	Електричний удар, фібриляція, летальний результат	Заземлення; роботи виконує персонал з групою $\geq III$; роз'єднання стрінгів; використання діелектричних рукавиць
Ураження електричним струмом змінної напруги (380/220 В AC)	Електричний удар, опіки, летальний результат	ПЗВ з $I_{\text{диф}}=30$ мА; автоматичні вимикачі; система зрівнювання потенціалів; попереджувальні знаки

Термічний опік від нагрітих поверхонь обладнання (до 60 °C)	Термічні опіки шкіри I–II ступеня	Попереджувальні написи; використання ЗІЗ (рукавиці); недопущення контакту з корпусами обладнання під час роботи
Пожежна небезпека при короткому замиканні або пошкодженні АКБ	Займання приміщення, отруєння продуктами горіння	Вентиляція (≥ 3 об/год); димові сповіщувачі; вогнегасник ОУ-5; відстань від горючих матеріалів $\geq 1,5$ м; BMS-контроль
Падіння з висоти при обслуговуванні фотоелектричних модулів (4–8 м)	Травми, переломи, летальний результат	Страховальні системи (пояси, стропи, анкерні лінії); робота ≥ 2 осіб; заборона робіт при вітрі > 10 м/с
Несприятливі метеорологічні умови (гроза, вітер, зледеніння)	Падіння з висоти, обмороження, ураження блискавкою	Заборона робіт під час грози, зледеніння, сильного вітру; контроль метеопрогнозу

Як видно з таблиці 4.7, найбільш критичними є ризики ураження електричним струмом постійної та змінної напруги, пожежна небезпека при пошкодженні акумуляторного банку та падіння з висоти під час обслуговування фотоелектричних модулів на покрівлі. Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок», усі роботи з монтажу, налагодження та обслуговування фотоелектричної системи повинні виконуватися лише персоналом, який пройшов спеціальне навчання та має відповідну групу з електробезпеки не нижче III для робіт на електроустановках напругою до 1000 В.

Електробезпека. Найбільшу небезпеку при експлуатації фотоелектричної системи становлять кола постійного струму, оскільки напруга на стрінгах сонячних панелей досягає 600 В DC, а генерація електроенергії відбувається за наявності будь-якого освітлення, тобто навіть після відключення інвертора окремі ділянки системи можуть залишатися під напругою. Саме тому виконання будь-яких робіт на стороні постійного струму допускається лише після відключення інверторів, роз'єднання стрінгових кіл та вжиття заходів, що унеможливають випадкову появу напруги на струмовідних частинах. Особливістю фотоелектричних систем є те, що повне знеструмлення фотоелектричних модулів можливе тільки за умови припинення їх освітлення, тому під час технічного обслуговування необхідно

використовувати спеціальні ізолювальні засоби та дотримуватися підвищених вимог безпеки.

Безпечна експлуатація системи забезпечується також правильним виконанням захисного заземлення та застосуванням засобів електрозахисту на стороні змінного струму. У проєкті передбачено заземлення металоконструкцій фотоелектричного масиву, рам сонячних панелей, корпусів інверторів та іншого електрообладнання мідним проводом ПВЗ 1×6 мм², а опір заземлювального контуру прийнято не більше 4 Ом відповідно до вимог ДСТУ ІЕС 60364. Захист від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції забезпечується встановленням пристрою захисного відключення з диференціальним струмом 30 мА, автоматичних вимикачів із тепловими та електромагнітними розчеплювачами, а також системою зрівнювання потенціалів і належним маркуванням усіх небезпечних зон.

Важливе значення має правильне маркування кіл та обладнання, оскільки на щитах, кабельних лініях і захисних пристроях повинні бути нанесені попереджувальні написи про наявність напруги, а також схеми підключення і відключення системи в аварійних умовах. Згідно з вимогами ПУЕ-2017 та НПАОП 40.1-1.21-98, на всіх щитах і кабелях повинні бути нанесені попереджувальні написи: «Обережно! Електрична напруга 600 В DC» для постійного струму та «Небезпечно! Висока напруга 380 В» для змінного струму. DC-кола маркуються червоним (+) та синім (–) кольорами, AC-кола — відповідно до стандартної кольорової схеми: L1 — жовтий, L2 — зелений, L3 — червоний, N — синій, PE — жовто-зелений.

Пожежна безпека акумуляторних батарей. Окрему увагу необхідно приділити пожежній безпеці акумуляторного банку, оскільки навіть за використання LiFePO₄ акумуляторів, які характеризуються значно вищою термічною стабільністю порівняно з іншими літійовими технологіями, не можна виключати ризик локального перегріву, короткого замикання або пошкодження силових з'єднань. У роботі зазначено, що температура термічного розгону для акумуляторів цього типу перевищує 300 °С, що підтверджує їх підвищену

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатаційну безпечність, проте не скасовує необхідності виконання пожежно-профілактичних заходів.

Приміщення, в якому розміщується акумуляторний банк, повинно бути обладнане системою вентиляції з кратністю повітрообміну не менше 3 об'ємів за годину, автономними димовими сповіщувачами та вуглекислотним вогнегасником типу ОУ-5, а відстань від акумуляторних модулів до горючих матеріалів має становити не менше 1,5 м. Температурний режим у приміщенні акумуляторів доцільно підтримувати в межах від +5 до +35 °С, що сприяє як безпечній роботі, так і збереженню ресурсу батарей. Контроль стану акумуляторного банку здійснюється системою BMS, яка відстежує температуру модулів і автоматично обмежує або припиняє заряд чи розряд у разі перевищення допустимих значень.

Зменшенню пожежних ризиків сприяє також правильний вибір кабельної продукції та захисної апаратури. У системі застосовано кабелі типу ВВГнг(А)-LS, що мають негорючу ізоляцію і характеризуються зниженим димо- та газовиділенням, а для захисту від імпульсних перенапруг передбачено використання відповідних пристроїв для DC- та AC-кіл. Такі технічні рішення дозволяють зменшити ймовірність займання електропроводки при коротких замиканнях, перевантаженнях або атмосферних впливах, зокрема під час грозових перенапруг.

Безпека робіт на висоті. Суттєву небезпеку при реалізації проєкту становлять роботи на висоті, оскільки монтаж та обслуговування сонячних панелей виконуються на покрівлі будівлі на висоті приблизно 4–8 м. За таких умов необхідно застосовувати сертифіковані страхувальні системи, включаючи запобіжні пояси, стропи, карабіни та анкерні лінії, а самі роботи мають виконуватися щонайменше двома працівниками. Проведення монтажних або сервісних операцій на покрівлі забороняється у разі сильного вітру (швидкість понад 10 м/с), грози, зледеніння чи інших несприятливих погодних явищ, які можуть спричинити втрату рівноваги працівником або пошкодження обладнання. Працівники, залучені до таких робіт, повинні пройти відповідне навчання,

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інструктаж та медичний огляд у межах вимог до робіт підвищеної небезпеки, що логічно впливає із загальної системи охорони праці, описаної в роботі.

Дії персоналу в надзвичайних ситуаціях. Важливою складовою безпечної експлуатації є готовність до дій у надзвичайних ситуаціях, які можуть бути пов'язані з пожежею, ураженням електричним струмом, пошкодженням обладнання внаслідок блискавки, сильного вітру або інших небезпечних явищ. У роботі передбачено наявність аварійного відключення системи через головний розподільчий щит, що дає змогу оперативно знеструмити основні ділянки електроустановки.

У разі виникнення пожежі в акумуляторному приміщенні першочерговими діями є відключення відповідної ділянки системи через головний розподільчий щит, евакуація персоналу з небезпечної зони та виклик підрозділів ДСНС за телефоном 101. До прибуття рятувальників необхідно використати вуглекислотний вогнегасник ОУ-5 для локалізації вогнища займання, дотримуючись безпечної відстані від електрообладнання під напругою. Застосування водних або піноутворюючих засобів для гасіння електрообладнання під напругою категорично заборонено.

У разі ураження людини електричним струмом необхідно негайно усунути дію струму шляхом безпечного відключення джерела живлення через відповідні автоматичні вимикачі або шляхом відділення потерпілого від струмовідних частин за допомогою діелектричних засобів захисту. Після звільнення потерпілого від дії струму необхідно викликати екстрену медичну допомогу за телефоном 103 та надати домедичну допомогу, включаючи штучне дихання та непрямий масаж серця при відсутності пульсу та дихання.

При стихійних лихах, зокрема грозі, ураганному вітрі або підтопленні, система має бути переведена у безпечний стан шляхом відключення інверторів та роз'єднання стрінгових кіл із подальшим оглядом панелей, кабелів, інверторів і заземлювального пристрою перед повторним увімкненням. Перевірка цілісності ізоляції кабелів та параметрів заземлення після значних атмосферних впливів є

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обов'язковою для запобігання аварійним ситуаціям при відновленні роботи системи.

Організаційні заходи з охорони праці. Організаційні заходи з охорони праці при експлуатації системи ФЕС+АКБ не менш важливі, ніж технічні. Власник господарства повинен забезпечити проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажів, організувати навчання персоналу безпечним методам роботи, а також забезпечити працівників необхідними засобами індивідуального захисту, зокрема діелектричними рукавицями, захисними окулярами, касками та засобами захисту від падіння з висоти. Крім того, обов'язковим є ведення журналу технічного обслуговування системи із фіксацією всіх перевірок, ремонтів, аварійних ситуацій та профілактичних заходів, а також періодичний контроль стану ізоляції кабелів, контуру заземлення і справності захисної апаратури.

Для підтримання належного рівня безпеки під час тривалої експлуатації системи необхідно виконувати регламентне технічне обслуговування, яке охоплює регулярний візуальний контроль стану фотоелектричних модулів, кабельних з'єднань, кріплень і захисних пристроїв, очищення поверхні панелей від пилу та забруднень, перевірку параметрів акумуляторних модулів, а також вимірювання опору ізоляції та параметрів заземлення. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити електробезпеку й пожежну безпеку, а й підтримувати стабільну ефективність роботи всієї системи резервного електроживлення.

Отже, дотримання передбачених у проєкті технічних та організаційних заходів з охорони праці дає змогу мінімізувати ризики при експлуатації системи резервного електроживлення фермерського господарства з використанням сонячних панелей і акумуляторів. Запропоновані рішення враховують специфіку фотоелектричних систем, особливості використання LiFePO₄ акумуляторів, умов сільськогосподарського об'єкта та вимоги до роботи в аварійних режимах, що забезпечує належний рівень безпеки персоналу та надійності функціонування системи в цілому.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3. Вплив системи на навколишнє природне середовище та екологічна ефективність

Оцінка впливу проєктованої системи резервного електроживлення на навколишнє природне середовище є важливою складовою обґрунтування доцільності її впровадження. Порівняння екологічних показників виконано для двох основних варіантів: гібридної системи ФЕС+АКБ та традиційного дизельного генератора.

Основним екологічним показником є викиди діоксиду вуглецю (CO_2) та інших парникових газів. Для системи ФЕС+АКБ прямі викиди при генерації електроенергії відсутні, оскільки перетворення сонячної енергії в електричну відбувається без спалювання палива. Водночас для об'єктивної оцінки необхідно враховувати непрямі викиди, пов'язані із заміщенням електроенергії з централізованої мережі, де частка вугільної та газової генерації є суттєвою.

Середній показник питомих викидів CO_2 для об'єднаної енергосистеми України становить близько 0,450 кг CO_2 на 1 кВт·год виробленої електроенергії. Враховуючи очікувану річну генерацію фотоелектричної станції 17 200 кВт·год, зменшення викидів вуглекислого газу за рахунок заміщення мережевої електроенергії визначається за формулою:

$$\Delta M_{\text{CO}_2} = W_{\text{ФЕС}} \times e_{\text{CO}_2}, \quad (4.7)$$

де $W_{\text{ФЕС}}$ — річна генерація фотоелектричної станції, кВт·год/рік;
 e_{CO_2} — питомі викиди CO_2 для мережевої генерації, кг CO_2 /кВт·год.

$$\Delta M_{\text{CO}_2} = 17\,200 \times 0,450 = 7\,740 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{рік} = 7,74 \text{ т } \text{CO}_2/\text{рік}. \quad (4.8)$$

За проєктний термін служби системи 25 років (гарантований термін експлуатації сонячних панелей) загальне зменшення викидів становить:

$$\Delta M_{\text{CO}_2}^{25} = 7,74 \times 25 = 193,5 \text{ т } \text{CO}_2. \quad (4.9)$$

Крім заміщення мережевої електроенергії, впровадження системи ФЕС+АКБ дозволяє відмовитися від використання дизельного генератора для резервного електроживлення. Розрахунок викидів CO_2 при роботі дизельного генератора

базується на середньорічній потребі в резервному електроживленні та питомій витраті палива.

За даними власника фермерського господарства, середньорічна тривалість відключень централізованого електропостачання за 2022–2024 роки становила близько 300 годин. При роботі дизельного генератора потужністю 30 кВА з середнім навантаженням 15 кВт питома витрата дизельного палива становить близько 0,25 літрів на 1 кВт·год виробленої електроенергії.

Річна витрата дизельного палива при використанні генератора:

$$V_d = P_{\text{сер}} \times t_{\text{відкл}} \times q_{\text{п}}, \quad (4.10)$$

де $P_{\text{сер}}$ — середня потужність навантаження, кВт;
 $t_{\text{відкл}}$ — середньорічна тривалість відключень, год/рік;
 $q_{\text{п}}$ — питома витрата палива, л/(кВт·год).

$$V_d = 15 \times 300 \times 0,25 = 1\,125 \text{ л/рік}. \quad (4.11)$$

При спалюванні 1 літра дизельного палива виділяється близько 2,68 кг CO₂.
 Річні викиди CO₂ від роботи дизель-генератора:

$$M_{\text{CO}_2}^d = V_d \times e_d = 1\,125 \times 2,68 = 3\,015 \text{ кг CO}_2/\text{рік} = 3,02 \text{ т CO}_2/\text{рік}. \quad (4.12)$$

За 25 років експлуатації загальні викиди CO₂ від дизельного генератора становили б:

$$M_{\text{CO}_2}^{d,25} = 3,02 \times 25 = 75,5 \text{ т CO}_2. \quad (4.13)$$

Сумарне зменшення викидів CO₂ за рахунок заміщення мережевої електроенергії та відмови від використання дизельного генератора:

$$\Delta M_{\text{CO}_2}^{\text{заг}} = 193,5 + 75,5 = 269,0 \text{ т CO}_2 \text{ за 25 років}. \quad (4.14)$$

Окрім діоксиду вуглецю, при спалюванні дизельного палива утворюються оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x) та тверді частинки (PM — Particulate Matter). Порівняльна таблиця екологічних показників наведена у таблиці 4.8.

**Порівняння екологічних показників систем резервного
електроживлення за 25 років експлуатації**

Показник	ФЕС + АКБ	Дизель-генератор
Викиди CO ₂ при генерації, т	0	75,5
Зменшення викидів CO ₂ за рахунок заміщення мережевої генерації, т	193,5	0
Сумарне зменшення викидів CO ₂ , т	269,0	0
Викиди оксидів азоту (NO _x), кг	0	450
Викиди оксидів сірки (SO _x), кг	0	120
Викиди твердих частинок (PM), кг	0	85
Рівень шуму при роботі, дБ(А)	0 (безшумна робота)	75–85
Ризик розливу нафтопродуктів	Відсутній	Наявний

Як видно з таблиці 4.8, система ФЕС+АКБ має суттєві переваги перед альтернативою на базі дизельного генератора за всіма екологічними показниками. Окрім відсутності прямих викидів шкідливих речовин, фотоелектрична система працює безшумно, що особливо важливо для сільської місцевості та забезпечення комфортних умов утримання тварин.

Вплив на життєвий цикл компонентів системи потребує окремого розгляду з позицій екологічної безпеки. Сонячні панелі на основі монокристалічного кремнію та літій-залізо-фосфатні акумулятори є екологічно безпечними матеріалами, що не містять токсичних важких металів (свинець, кадмій, ртуть).

Питання утилізації та рециклінгу акумуляторів LiFePO₄ регулюється Директивою ЄС 2006/66/ЕС та Законом України «Про відходи». Відповідно до цих нормативних документів, відпрацьовані акумуляторні батареї повинні бути передані спеціалізованим підприємствам для переробки та повторного використання матеріалів. Сучасні технології рециклінгу дозволяють відновлювати до 95% маси LiFePO₄ акумуляторів, включаючи літій, залізо та фосфор, що значно знижує потребу у видобутку первинної сировини.

Сонячні панелі після закінчення терміну експлуатації (25–30 років) також підлягають переробці. Основні компоненти сонячних модулів — скло (до 75% маси), алюміній (до 10%), кремній (до 5%) та мідь (до 3%) — є нетоксичними та

повністю рецикуються. Згідно з Директивою ЄС 2012/19/EU (Waste Electrical and Electronic Equipment — WEEE), виробники сонячних панелей зобов'язані забезпечувати їх збір та переробку після закінчення терміну експлуатації.

Вплив на земельні ресурси є мінімальним. Загальна площа, необхідна для розміщення 40 сонячних панелей із дотриманням відстаней між рядами для уникнення затінення, становить близько 180 м². Ця площа може бути розміщена на покрівлі корівника (650 м²) або на наземній конструкції поблизу господарських будівель, що не потребує відчуження сільськогосподарських угідь. Акумуляторний банк із 40 модулів BYD Battery-Box Premium HVS 12.8 розміщується у спеціально обладнаному приміщенні площею близько 20 м².

Оцінка вуглецевого сліду виробництва компонентів фотоелектричної системи (Life Cycle Assessment — LCA) показує, що при виробництві монокристалічних кремнієвих сонячних панелей виділяється близько 20–40 г CO₂ на 1 кВт·год електроенергії, виробленої протягом терміну служби панелі. Для порівняння, питомі викиди CO₂ при виробництві електроенергії на вугільних теплових електростанціях становлять 900–1100 г CO₂/кВт·год. Таким чином, навіть з урахуванням енерговитрат на виробництво, монтаж та утилізацію компонентів, фотоелектрична система забезпечує зниження викидів парникових газів у 20–25 разів порівняно з вугільною генерацією.

Період енергетичної окупності (Energy Payback Time — EPBT) для монокристалічних кремнієвих панелей у кліматичних умовах Київської області становить 2,5–3,5 роки. Це означає, що протягом 2,5–3,5 років експлуатації фотоелектрична система виробляє таку кількість енергії, яка була витрачена на її виробництво, транспортування та монтаж. Після цього періоду система виробляє «чисту» екологічно безпечну електроенергію протягом ще 22–27 років.

Впровадження фотоелектричних систем у сільськогосподарському секторі сприяє виконанню міжнародних зобов'язань України у сфері кліматичної політики. Відповідно до Національно визначеного внеску (Nationally Determined Contribution — NDC) України до Паризької кліматичної угоди, країна зобов'язалася знизити викиди парникових газів на 65% від рівня 1990 року до 2030 року. Розвиток

розподіленої сонячної генерації, зокрема на фермерських господарствах, є одним із шляхів досягнення цієї мети.

У разі масштабування подібних проєктів на 1 000 фермерських господарств Київської області можна очікувати сумарного зменшення викидів CO₂ на рівні 7 740 т/рік за рахунок заміщення мережевої електроенергії. Це становить суттєвий внесок у декарбонізацію аграрного сектору регіону та підвищення його енергетичної незалежності.

Таким чином, впровадження системи резервного електроживлення ФЕС+АКБ на фермерському господарстві має значні екологічні переваги порівняно з традиційними альтернативами. Система забезпечує: нульові прямі викиди CO₂, NO_x, SO_x та твердих частинок при генерації електроенергії; зменшення викидів діоксиду вуглецю на 269,0 тонн за 25 років експлуатації; відсутність шумового забруднення та ризику розливу нафтопродуктів; високий рівень рециклінгу компонентів після закінчення терміну експлуатації (до 95% для акумуляторів та до 90% для сонячних панелей); енергетичну окупність протягом 2,5–3,5 років з подальшим виробництвом екологічно чистої електроенергії протягом 22–27 років.

4.4. Аналіз сценаріїв конфігурації системи за критерієм терміну окупності

Одним із ключових завдань техніко-економічного аналізу інвестиційних проєктів у сфері відновлюваної енергетики є порівняння альтернативних технічних рішень за критерієм економічної ефективності. У процесі проєктування гібридної системи електропостачання молочно-товарної ферми було розглянуто два класи альтернатив: по-перше, варіанти конфігурації інверторного вузла (один потужний інвертор проти двох інверторів різної потужності в АВР-схемі); по-друге, варіанти ємності акумуляторної системи, що безпосередньо визначають тривалість автономної роботи об'єкта при відключеннях централізованого електропостачання. Порівняльний аналіз усіх сценаріїв за критерієм терміну окупності дозволяє

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обґрунтувати остаточний вибір прийнятого технічного рішення та підтвердити його перевагу над альтернативами як за технічними, так і за економічними показниками.

Для порівняння було сформовано сім сценаріїв конфігурації системи, що охоплюють усі реально розглянуті альтернативи. Перша група (Сценарії 1–4) відображає варіанти конфігурації інверторного вузла при фіксованій ємності АКБ 122,9 кВт·год (автономія ~6 год). Друга група (Сценарії 5–7) відображає варіанти ємності АКБ при фіксованому прийнятому інверторі SUN-20K та потужності ФЕМ 18 кВт — з автономією 12, 24 та 48 годин відповідно.

Сценарій 1 («Базовий, без ФЕС+АКБ») — контрольний сценарій, що описує поточний стан електропостачання ферми виключно від централізованої мережі та резервного ДГ без будь-яких елементів власної генерації чи накопичення.

Сценарій 2 («ФЕС 18 кВт без АКБ») — встановлення фотоелектричного масиву потужністю 18 кВт з мережевим інвертором без системи накопичення енергії. Найпростіше та найдешевше рішення з відновлюваної енергетики, що не вирішує проблему надійності при відключеннях.

Сценарій 3 («8K+16K, АВР-схема, АКБ 122,9 кВт·год») — конфігурація з двома інверторами різних серій (Deye SUN-8K-SG04LP3-EU та Deye SUN-16K-SG05LP3-EU-SM2), підключеними через АВР до двох незалежних секцій навантаження. Технічне рішення, відхилене через неможливість паралельної роботи інверторів різних серій та підвищену складність схеми.

Сценарій 4 («SUN-20K + ФЕС 18 кВт + АКБ 122,9 кВт·год, автономія ~6 год») — прийняте проєктне рішення, детально описане у підрозділі 4.1.

Сценарій 5 («SUN-20K + ФЕС 18 кВт + АКБ 245,8 кВт·год, автономія ~12 год») — розширена конфігурація з подвоєною ємністю АКБ (24 модулі LiFePO₄ 51,2 В / 200 Аг), що забезпечує автономну роботу критичного навантаження 15 кВт протягом 12 годин. Необхідна ємність:

$$E_{\text{АКБ 12год}} = P_{\text{крит}} \times t_{\text{авт}} \div DoD = 15 \times 12 \div 0,80 = 225 \text{ кВт·год} \rightarrow 22 \text{ модулі}$$
$$\rightarrow E_{\text{факт}} = 225,3 \text{ кВт·год}$$

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийнято 24 модулі для збереження кратності та резерву: $E_{\text{АКБ}} = 24 \times 10,24 = 245,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Сценарій 6 («SUN-20K + ФЕС 18 кВт + АКБ 491,5 кВт·год, автономія ~24 год») — конфігурація з ємністю АКБ, достатньою для добової автономної роботи критичного навантаження. Необхідна ємність:

$$E_{\text{АКБ } 24\text{год}} = 15 \times 24 \div 0,80 = 450 \text{ кВт} \cdot \text{год} \rightarrow 44 \text{ модулі} \rightarrow E_{\text{факт}} = 44 \times 10,24 = 450,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Прийнято 48 модулів з урахуванням кратності підключення та необхідності двох паралельних рядів: $E_{\text{АКБ}} = 48 \times 10,24 = 491,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Сценарій 7 («SUN-20K + ФЕС 18 кВт + АКБ 983,0 кВт·год, автономія ~48 год») — максимальна конфігурація з дводобовою автономією, що забезпечує повну незалежність від мережі та ДГ протягом двох діб поспіль. Необхідна ємність:

$$E_{\text{АКБ } 48\text{год}} = 15 \times 48 \div 0,80 = 900 \text{ кВт} \cdot \text{год} \rightarrow 88 \text{ модулів} \rightarrow E_{\text{факт}} = 88 \times 10,24 = 901,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Прийнято 96 модулів: $E_{\text{АКБ}} = 96 \times 10,24 = 983,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Вихідні параметри та CAPEX для кожного сценарію наведено у таблиці 4.9.

У таблиці 4.9 наведено порівняльну характеристику семи сценаріїв конфігурації системи за основними технічними та вартісними параметрами. Для кожного сценарію зазначено склад інверторного вузла, потужність ФЕМ, ємність АКБ, тривалість автономії та розрахований CAPEX. Вартість АКБ для кожного сценарію розраховується як добуток кількості модулів на одиничну вартість 65 000 грн/шт; решта складових CAPEX (інвертор, ФЕМ, захист, кабелі, монтаж, проект) залишаються незмінними для Сценаріїв 4–7 та становлять 780 041 грн.

Таблиця 4.9.

Порівняльна характеристика сценаріїв конфігурації системи

Параметр	Сц.1	Сц.2	Сц.3	Сц.4	Сц.5	Сц.6	Сц.7
Інвертор	—	Мереж. 18кВт	8K+16K	SUN-20K	SUN-20K	SUN-20K	SUN-20K
ФЕМ, кВт	—	18	18	18	18	18	18
АКБ, кВт·год	—	—	122,9	122,9	245,8	491,5	983,0
К-сть модулів АКБ	—	—	12	12	24	48	96
Автономія, год	—	—	~6	~6	~12	~24	~48
CAPEX АКБ, грн	—	—	780 000	780 000	1 560 000	3 120 000	6 240 000
CAPEX заг., грн	0	485 200	1 623 500	1 560 041	2 340 041	3 900 041	7 020 041

Аналіз даних таблиці 4.9 демонструє лінійне зростання CAPEX при збільшенні ємності АКБ: кожне подвоєння автономії (6→12→24→48 год) спричиняє зростання загального CAPEX на 780 000 грн (вартість 12 додаткових модулів АКБ). При цьому CAPEX Сценарію 7 (7 020 041 грн) майже у 4,5 рази перевищує CAPEX прийнятого Сценарію 4, що вимагає ретельного аналізу додаткового економічного ефекту від розширеної автономії.

Для коректного порівняння сценаріїв за критерієм терміну окупності виконано розрахунок річної економії для кожного сценарію з урахуванням того, що збільшення ємності АКБ скорочує кількість годин роботи ДГ та зменшує збитки від виробничих простоїв. Розрахункові залежності мають такий вигляд. При автономії ~6 год (Сц. 4) система перекриває 60 відключень тривалістю до 6 год — скорочення роботи ДГ на 60%. При автономії ~12 год (Сц. 5) система перекриває додатково відключення тривалістю 6–12 год — скорочення роботи ДГ на 80%. При автономії ~24 год (Сц. 6) — скорочення на 93%. При автономії ~48 год (Сц. 7) — скорочення на 98%, що практично повністю виключає необхідність роботи ДГ. Результати розрахунків показників економічної ефективності за всіма сценаріями зведено у таблицю 4.10.

У таблиці 4.10 наведено розраховані показники економічної ефективності для семи сценаріїв: чистий річний грошовий потік (CF), простий (PP) та дисконтований (DPP, $r = 15\%$) терміни окупності, NPV за 10 та 25 років, IRR та індекс прибутковості PI. Базовий Сценарій 1 не має показників окупності, однак характеризується найвищими сукупними витратами протягом розрахункового горизонту. Для Сценаріїв 1–2 NPV розраховано як від'ємну величину — сукупні дисконтовані витрати, що забезпечує коректне порівняння з варіантами, що передбачають початкові інвестиції.

Таблиця 4.10

Показники економічної ефективності за сценаріями конфігурації

Показник	Сц.1	Сц.2	Сц.3	Сц.4 ✓	Сц.5	Сц.6	Сц.7
CAPEX, грн	0	485 200	1 544 041	1 482 041	2 184 041	3 588 041	6 396 041

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ		90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Скор. роботи ДГ, %	0	10	60	60	80	93	98
Економія від е/е, грн/рік	0	170 851	170 851	170 851	170 851	170 851	170 851
Економія від ДГ, грн/рік	0	33 840	203 040	203 040	270 720	315 012	331 632
Економія від простоїв, грн/рік	0	14 400	144 000	144 000	192 000	223 200	235 200
Зелений тариф, грн/рік	0	3 133	3 133	3 133	3 133	3 133	3 133
Загальна економія, грн/рік	0	222 224	521 024	521 024	636 704	712 196	740 816
ОРЕХ, грн/рік	338 400	312 000	25 281	25 281	28 100	33 800	43 200
CF чистий, грн/рік	—	-89 776	495 743	495 743	608 604	678 396	697 616
PP, роки	—	—	3,1	3,0	3,6	5,3	9,2
DPP (r=15%), роки	—	—	4,0	3,7	4,5	6,9	13,8
NPV ₁₀ , грн	-15 097 680	-10 840 200	+1 921 400	+1 987 100	+2 041 300	+921 800	-1 987 400
NPV ₂₅ , грн	-37 744 200	-27 318 400	+6 125 200	+6 925 200	+8 041 600	+4 621 300	-1 214 700
IRR, %	—	—	37,2	43,8	32,6	19,4	10,2
PI	—	—	4,97	5,67	4,68	2,29	0,81

Аналіз даних таблиці 4.10 дозволяє сформулювати розгорнуті висновки щодо порівняльної ефективності всіх розглянутих сценаріїв. Передусім слід зазначити принципову закономірність: збільшення ємності АКБ понад рівень, прийнятий у Сценарії 4, не є лінійно вигідним через насичувальний характер приросту економії. Приріст річної економії при переході від автономії 6 до 12 годин (Сц. 4→Сц. 5) складає 115 680 грн/рік при збільшенні CAPEX на 702 000 грн. При переході від 12 до 24 годин (Сц. 5→Сц. 6) приріст економії скорочується до 75 492 грн/рік при тому ж прирості CAPEX 1 404 000 грн. При переході від 24 до 48 годин (Сц. 6→Сц. 7) приріст економії складає лише 28 620 грн/рік при прирості CAPEX 2 808 000 грн — очевидна економічна недоцільність. Цей дисбаланс між приростом економії та приростом CAPEX зумовлений тим, що при автономії 6 год вже перебивається більшість типових відключень (тривалістю до 6 год), при 24 год — практично всі, а подальше збільшення ємності дає мінімальний додатковий ефект при різкому зростанні капітальних витрат.

Прийнятий Сценарій 4 демонструє найкращі показники серед усіх повнофункціональних варіантів (з АКБ): $PP = 3,0$ року, $DPP = 3,7$ року, $IRR = 43,8\%$, $PI = 5,67$, $NPV_{25} = +6\,925\,200$ грн. Сценарій 5 (автономія 12 год) є прийнятним резервним рішенням ($DPP = 4,5$ р. не перевищує 7-річний ліміт), однак поступається прийнятому варіанту за всіма інвестиційними показниками. Сценарій 6 (автономія 24 год) знаходиться на межі прийнятності ($DPP = 6,9$ р. ≈ 7 р.), що робить його ризикованим при можливих відхиленнях фактичних параметрів від розрахункових. Сценарій 7 (автономія 48 год) є економічно недоцільним: $PI = 0,81 < 1$, NPV_{25} від'ємний, $DPP = 13,8$ р. — більше половини розрахункового горизонту.

Висновки до розділу 4

Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи ФЕС+АКБ для молочно-товарної ферми підтвердило високу економічну ефективність проєкту. Загальні поточні витрати на електропостачання у базовому сценарії (без ФЕС+АКБ) становлять 1 509 768 грн/рік, з яких 1 171 368 грн/рік - оплата мережевої електроенергії за тарифом 10,44 грн/кВт·год (малі непобутові споживачі, 2 клас напруги, НН, червень 2026) та 338 400 грн/рік — витрати на резервний дизельний генератор. Впровадження системи забезпечує загальну річну економію 521 024 грн/рік, що формується трьома рівнозначними складовими: скороченням витрат на резервний ДГ (39,0%), заміщенням мережевої електроенергії власною генерацією ФЕС 18 кВт (32,8%) та уникненням збитків від виробничих простоїв при відключеннях (27,6%). Капітальні витрати на реалізацію проєкту (CAPEX) становлять 1 482 041 грн, з яких домінуючою статтею є акумуляторна система Felicity FLA48200 - 702 000 грн (47,4%). Чистий річний грошовий потік складає 495 743 грн/рік при річних операційних витратах OPEX = 25 281 грн/рік, що відповідає простому терміну окупності $PP = 3,0$ року та дисконтованому $DPP = 3,7$ року ($r = 15\%$). Чиста приведена вартість за 25-річний розрахунковий горизонт становить $NPV_{25} = +6\,925\,200$ грн, внутрішня норма прибутковості $IRR = 43,8\%$, індекс

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прибутковості $PI = 5,67$, що свідчить про беззаперечну інвестиційну привабливість проєкту.

Аналіз операційних витрат та структури економії підтвердив, що річний рівень OPEX (25 281 грн/рік) є незначним — лише 1,71% від CAPEX та 4,9% від річної економії, що є характерною перевагою систем на базі $LiFePO_4$ з вбудованим BMS та гібридних інверторів з дистанційним моніторингом. Найвагомішою статтею OPEX є технічне обслуговування (56,5%), що включає двократне на рік очищення ФЕМ та щорічний виїзд спеціаліста для діагностики системи. Встановлено, що ключовим чинником високої економічної ефективності проєкту є тариф для малих непобутових споживачів (10,44 грн/кВт·год), що більш ніж удвічі перевищує побутовий тариф (4,32 грн/кВт·год) та формує суттєво вищу базу для розрахунку економії від заміщення мережевої електроенергії порівняно з аналогічними системами для приватних домогосподарств. Прогнозоване зростання тарифу на 15% щорічно додатково прискорює повернення інвестицій у часі та забезпечує зростаючий грошовий потік протягом усього терміну служби обладнання.

Розрахунок показників ефективності на розрахунковому горизонті 25 років підтвердив стійкість економічної моделі проєкту до зовнішніх ризиків. Значення $IRR = 43,8\%$ більш ніж утричі перевищує ставку дисконтування $r = 15\%$ та типові ставки банківських депозитів у 2026 році, що робить проєкт привабливішим за альтернативні форми вкладення коштів. Індекс прибутковості $PI = 5,67$ означає, що на кожную вкладену гривню інвестор отримує 5,67 грн сукупного дисконтованого доходу протягом 25-річного терміну експлуатації. Додатковим ефектом впровадження системи є скорочення викидів CO_2 на 8,1 т/рік завдяки заміщенню мережевої електроенергії та скороченню роботи дизельного генератора, що відповідає цілям державної політики декарбонізації агропромислового комплексу України.

Порівняльний аналіз семи сценаріїв конфігурації системи за критерієм терміну окупності однозначно підтвердив оптимальність прийнятого проєктного рішення — інвертор Deye SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 з ФЕМ 18 кВт та

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аккумуляторною системою Felicity FLA48200 ($12 \times 51,2 \text{ В} / 200 \text{ Аг}$, 122,9 кВт·год, автономія ~12 год). Серед варіантів конфігурації інверторного вузла прийняте рішення (один інвертор SUN-20K) перевершує двохінверторну АВР-схему (Сц. 3) за всіма інвестиційними показниками при нижчому CAPEX та вищій технічній надійності. Серед варіантів ємності АКБ встановлено насичувальний характер залежності економічного ефекту від тривалості автономії: кожне подвоєння ємності АКБ збільшує CAPEX на 702 000 грн при спадному прирості річної економії — від 115 680 грн/рік (6→12 год) до 28 620 грн/рік (24→48 год), що призводить до прогресивного погіршення термінів окупності від $DPP = 3,7$ року (Сц. 4, автономія 12 год) до $DPP = 13,8$ року (Сц. 7, автономія 48 год). Сценарій з автономією 48 год є економічно недоцільним ($PI = 0,81 < 1$, $NPV_{25} < 0$), сценарій з автономією 24 год знаходиться на межі прийнятності ($DPP = 6,9 \text{ р.}$), тоді як прийнятий сценарій з автономією 6 год демонструє найкращий баланс між надійністю електропостачання та інвестиційною привабливістю у широкому діапазоні можливих конфігурацій системи.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання — розроблено систему резервного електропостачання молочно-товарної ферми на основі гібридної фотоелектричної станції та акумуляторної системи накопичення енергії. За результатами виконаної роботи сформульовано такі висновки.

Аналіз сучасного стану розвитку відновлюваної енергетики та систем резервного електропостачання агропромислових об'єктів засвідчив, що молочно-товарні ферми є одним із найбільш перспективних секторів для впровадження гібридних систем ФЕС+АКБ. Безперервний технологічний цикл виробництва молока, значне денне енергоспоживання (18,7 кВт розрахункової потужності), що збігається з піком сонячної генерації, та висока вразливість до перебоїв в електропостачанні формують унікальне поєднання чинників, що забезпечують максимальну економічну ефективність гібридних рішень саме для цього типу об'єктів. Встановлено, що технологія LiFePO₄ є оптимальною для систем накопичення енергії агропромислових підприємств завдяки поєднанню ресурсу 4 000–6 000 циклів, хімічної безпеки, широкого температурного діапазону роботи та сумісності з вбудованими BMS систем моніторингу.

За результатами обстеження об'єкта та аналізу графіків електричних навантажень молочно-товарної ферми встановлено, що загальна встановлена потужність споживачів становить 22,0 кВт при розрахунковій потужності 18,7 кВт ($k_{\text{од}} = 0,85$). Визначено перелік критичних споживачів — доїльне обладнання, молочний охолоджувач, насосна станція водопостачання, система вентиляції та автоматика — загальною потужністю 22,0 кВт. Встановлено, що пусковий струм насосу водопостачання (5,5 кВт) створює пікове навантаження до 26,6 кВт, що є визначальним критерієм для вибору потужності інверторного вузла. Річне споживання електроенергії фермою становить 112 200 кВт·год, а загальні витрати на електропостачання у базовому сценарії (мережа + резервний ДГ) — 1 509 768 грн/рік при тарифі для малих побутових споживачів 10,44 грн/кВт·год (2 клас напруги, НН, червень 2026).

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі розрахунку балансу потужностей, визначення необхідної ємності акумуляторної системи та аналізу технічних характеристик сучасного обладнання обрано оптимальну конфігурацію гібридної системи електропостачання. Як генеруючий елемент прийнято фотоелектричний масив потужністю 18 кВт у складі 36 монокристалічних модулів потужністю 500 Вт кожен, що забезпечує річну генерацію 17 226 кВт·год при системному ККД $\eta = 0,87$. Як інверторний вузол обрано гібридний трифазний інвертор Deye SUN-20K-SG05LP3-EU-SM2 потужністю 20 кВт на базі 48 В — перший у світі трифазний низьковольтний гібридний інвертор такої потужності, що забезпечує номінальне покриття розрахункового навантаження 18,7 кВт із запасом та пікову потужність 22 кВт для покриття пускових струмів електродвигунів. Акумуляторна система сформована з 12 модулів Felicity FLA48200 (51,2 В / 200 Аг) із загальною ємністю 122,9 кВт·год, що забезпечує автономну роботу критичного навантаження 15 кВт протягом ~6 годин при глибині розряду DoD = 0,80. Розроблено принципову електричну схему системи з дотриманням вимог ДСТУ ГОСТ 2.702:2013, ДСТУ ГОСТ 2.710:2004, ПУЕ 2017 та ІЕС 62109, що включає п'ять функціональних блоків: фотоелектричний масив, DC захист та комутацію, гібридний інвертор, акумуляторну систему та АС розподіл із захистом.

Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи ФЕС+АКБ підтвердило її високу інвестиційну привабливість. Загальна річна економія від впровадження становить 521 024 грн/рік та формується трьома рівнозначними складовими: скороченням витрат на резервний ДГ — 203 040 грн/рік (39,0%), заміщенням мережевої електроенергії — 170 851 грн/рік (32,8%) та уникненням збитків від виробничих простоїв — 144 000 грн/рік (27,6%). Капітальні витрати на реалізацію проєкту становлять 1 482 041 грн при річних операційних витратах ОРЕХ = 25 281 грн/рік. Простий термін окупності складає РР = 3,0 року, дисконтований ($r = 15\%$) — DPP = 3,7 року, що є суттєво кращим за середньогалузевий показник для проєктів відновлюваної енергетики (6–8 років). Чиста приведена вартість за 25-річний розрахунковий горизонт $NPV_{25} = +6\,925\,200$ грн, внутрішня норма прибутковості $IRR = 43,8\%$, індекс прибутковості $PI = 5,67$.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз семи сценаріїв конфігурації системи підтвердив оптимальність прийнятого рішення: збільшення ємності АКБ понад 122,9 кВт·год є економічно необґрунтованим через насичувальний характер приросту економії при лінійному зростанні CAPEX, а застосування двохінверторної АВР-схеми поступається одноінверторному рішенню за всіма інвестиційними показниками при вищій технічній складності. Додатковим ефектом впровадження є скорочення викидів CO₂ на 8,1 т/рік, що відповідає цілям державної політики декарбонізації агропромислового комплексу України.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEA-PVPS. *Snapshot of Global PV Markets 2024*. IEA Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T1-44:2024. URL: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/> (дата звернення: 19.05.2026).
2. International Energy Agency. *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. IEA, Paris, 2024. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf> (дата звернення: 19.05.2026).
3. Shvedchykova I., Trykhlieb A., Trykhlieb S., Demishonkova S., Pavlenko V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 132, No. 8. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.312346.
4. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, No. 11. P. 144–149. URL: http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=12766&lang=1 (дата звернення: 19.05.2026).
5. Pavlenko V., Volianyk O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources. *Технології та інженіринг*. 2024. № 5. С. 66–76.
6. Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення: 19.05.2026).
7. ДСТУ EN 50549-1:2022. Вимоги до генеруючих установок, що під'єднуються до мереж загального призначення низької напруги. Частина 1. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
8. Reliable Solar Energy Solutions for Agriculture: Hybrid PV-Battery Systems. *Revue des Énergies Renouvelables*. 2025. DOI: 10.54966/jreen.v28i1.1407. URL: <https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/1407> (дата звернення: 19.05.2026).

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Hybrid renewable energy for agriculture: Review of optimising algorithms and reliability analysis methods. *Smart Energy*. 2026. DOI: 10.1016/j.segy.2026.100153. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427126000513> (дата звернення: 19.05.2026).
10. Grid-Connected Photovoltaic System for Generating Energy to Dairy Farms: Case Study. *Journal of Engineering and Physical Thermophysics*. 2024. DOI: 10.3390/en17174208. URL: <https://www.lidsen.com/journals/jept/jept-06-03-016> (дата звернення: 19.05.2026).
11. JA Solar. *Technical Datasheet: JAM72S20 440–465/MR Series*. JA Solar Technology Co., Ltd., 2021. URL: <https://www.jasolar.com/uploadfile/2020/0619/20200619040220997.pdf> (дата звернення: 19.05.2026).
12. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. 5-те вид. Київ: Міненерго України, 2017. 617 с.
13. Павленко В.М., Воліяник О.Ю., Пономаренко І.І., Данильченко Д.М. Дослідження систем резервного електропостачання з відновлюваними джерелами. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 5. С. 66–76.
14. Felicity Solar. *FLA48100-EU LiFePO4 Battery User Manual & Datasheet*. Felicity Solar Co., Ltd., 2024. URL: <https://manuals.plus/ae/1005008652659720> (дата звернення: 19.05.2026).
15. Deye Inverter Technology Co., Ltd. *SUN-8K-SG04LP3-EU Hybrid Inverter Specification Sheet*. Ningbo: Deye, 2023. URL: <https://www.deyeinverter.com/product/hybrid-inverter-1/> (дата звернення: 19.05.2026).
16. Annual operating characteristics analysis of photovoltaic-energy storage microgrid based on retired LiFePO4 batteries. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 44, Part A. DOI: 10.1016/j.est.2021.103579. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X21014420> (дата звернення: 19.05.2026).

17. Technical and Cost Analysis of Inverter Selection for a Farmhouse Solar Energy System. [Academia.edu](https://www.academia.edu/126617544/Technical_And_Cost_Analysis_of_Inverter_Selection_for_a_Farmhouse_Solar_Energy_System). 2024. URL: https://www.academia.edu/126617544/Technical_And_Cost_Analysis_of_Inverter_Selection_for_a_Farmhouse_Solar_Energy_System (дата звернення: 19.05.2026).
18. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management. *International Conference on Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems*. 2025. P. 184–194.
19. Sizing of an Off-Grid Photovoltaic Power Supply System with Battery Storage. [Academia.edu](https://www.academia.edu/63919889/SIZING_OF_AN_OFF_GRID_PHOTOVOLT_AIC_POWER_SUPPLY_SYSTEM_WITH_BATTERY_STORAGE). 2021. URL: https://www.academia.edu/63919889/SIZING_OF_AN_OFF_GRID_PHOTOVOLT_AIC_POWER_SUPPLY_SYSTEM_WITH_BATTERY_STORAGE (дата звернення: 19.05.2026).
20. Impacts of different photovoltaic panel technologies on electrical grid CO₂ emissions. *Frontiers in Energy Research*. 2025. DOI: 10.3389/fenrg.2025.1519131. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2025.1519131/pdf> (дата звернення: 19.05.2026).
21. Economic efficiency of solar panel implementation in irrigated agriculture. *Економіка і суспільство*. 2025. Т. 12, № 2. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-74. URL: <https://economics-msu.com.ua/en/journals/tom-12-2-2025/yekonomichna-efektivnist-vprovadzhennya-sonyachnikh-paneley-v-zroshuvalno> (дата звернення: 19.05.2026).
22. Assessing the economics of prosumer provisions for residential rooftop PV in Ukraine. *Low Carbon Ukraine*. 2023. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Assessing-the-economics-of-prosumer-provisions-for-residential-rooftop-PV-4.pdf> (дата звернення: 19.05.2026).
23. Wang L. et al. Carbon emissions and reduction performance of photovoltaic systems in China using life cycle assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 200. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114507. URL:

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://iacweb.ethz.ch/doc/publications/WangLunche_etal_2024.pdf

(дата

звернення: 19.05.2026).

24. Energy management and demand side management in grid-tied nanogrid. *Scientific Reports*. 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-74509-y. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-74509-y> (дата звернення: 19.05.2026).

25. Dey B. et al. Microgrid system energy management with demand response program for clean and economical operation. *Applied Energy*. 2023. Vol. 334. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120717. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v334y2023ics0306261923000818.html> (дата звернення: 19.05.2026).

26. Energy Partnership Ukraine. *Ukraine Solar Energy Market Analysis*. 2024. URL: https://energypartnership-ukraine.org/fileadmin/ukraine/media_elements/EN_Ukraine_Solar_Energy_Market_Analysis_2_1.pdf (дата звернення: 19.05.2026).

27. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The Role of Smart Technologies in Improving the Reliability and Efficiency of Power Grids. *Збірник тез конференцій*. 2024. № 8. С. 91–92.

					02.03 – КР. 2606 "С" 2025.10.30 005 ПЗ	101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		