

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА МАЛОПОТУЖНОГО ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА З ГІБРИДНИМ ІНВЕРТОРОМ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: старший викладач, к.т.н.
_____ Степан ПОПОВ

Виконав здобувач першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти очної форми навчання
освітньо-професійної програми
«Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Андрій НЕМІЧЕВ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ Андрій НЕМІЧЕВ

ОДЕСА – 2026

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Андрій НЕМІЧЕВ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Вітроенергетична установка малопотужного фермерського господарства з гібридним інвертором»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету
№ 124 від « 27 » 09 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 17.06.2026.

3. Об'єкт дослідження: процес автономного електрозабезпечення технологічних споживачів малопотужного фермерського господарства за рахунок використання вітрової енергії.

4. Предмет дослідження: конструктивно-аеродинамічні параметри вітроколеса, енергетичні характеристики установки та алгоритми функціонування гібридної системи електроживлення.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Проаналізувати сучасний стан, технологічні тренди та перспективи використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності для автономного енергозабезпечення підприємств агропромислового комплексу. Обґрунтувати аеродинамічні та кінематичні параметри вітроколеса (швидкохідність, коефіцієнт використання енергії вітру, профіль та кількість

лопатею) для забезпечення максимальної генерації при розрахункових швидкостях вітру. Розробити алгоритмічні моделі функціонування гібридної системи електроживлення, що забезпечують оптимальне узгодження роботи вітрогенератора, системи акумулювання енергії (АКБ) та зовнішньої електромережі через гібридний інвертор.

5.2 Конструкторсько – технологічний розділ:

Розробити принципову електричну схему комутації елементів мікромережі, яка забезпечує інтеграцію вітрогенератора, гібридного інвертора, системи накопичення енергії та внутрішньої розподільчої мережі фермерського господарства. Сформулювати конструктивно-технологічні вимоги щодо монтажу щогли та просторового розміщення вітроустановки на території господарства з урахуванням рельєфу місцевості, аеродинамічного затінення та мінімізації зон турбулентності.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1 До теоретико-методичного розділу:

Графік (Діаграма): Роза вітрів та гістограма розподілу швидкостей вітру для обраного регіону експлуатації.

Таблиця: Розрахунковий добовий графік електричного навантаження технологічних споживачів фермерського господарства.

Схема: Фізична модель взаємодії вітрового потоку з аеродинамічним профілем лопаті (вектори швидкостей та розподіл аеродинамічних сил).

6.2 До конструкторсько – технологічного розділу:

Креслення: Загальний вигляд вітроенергетичної установки (складальне креслення щогли, гондоли та вітроколеса). Схема: Функціональна принципова електрична схема гібридної мікромережі (ВЕУ + масив сонячних панелей + гібридний інвертор + акумуляторний парк). Таблиця: Зведена таблиця техніко-економічних та екологічних показників проєкту (порівняння собівартості генерації з мережевими тарифами). Плакат: Заходи безпеки, зони ризику при висотних монтажних роботах та схема контуру блискавкозахисту і заземлення.

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

Тип навантаження: змішане (освітлення, вентиляційні системи, водяні насоси, системи автоматики). Категорія надійності електропостачання: II (допускаються короткочасні перерви на час автоматичного перемикавання на резерв). Встановлена електрична потужність струмоприймачів: 10 кВт. Середньодобове споживання електроенергії: 40–50 кВт·год. Параметри локальної мережі: трифазна змінного струму, напруга 380/220 В, частота 50 Гц.

Середньорічна швидкість вітру на висоті флюгера (10 м): 5,5...6,0 м/с. Розрахункова (номінальна) швидкість вітру для ВЕУ: 9,0 м/с (швидкість, при якій генератор видає заявлену потужність). Стартова швидкість вітру (Cut-in speed): 2,5 м/с. Максимальна експлуатаційна (буревійна) швидкість вітру (Cut-out speed): 25,0 м/с (спрацювання системи аеродинамічного гальмування).

Екстремальна швидкість вітру для розрахунку на міцність: 35,0 м/с.

Тип вітроколеса: крильчасте, горизонтально-осьове (HAWT), трилопатеве.

Номінальна електрична потужність ВЕУ: 5,0 кВт.

Тип електричної машини: синхронний багатополосний генератор на постійних магнітах (PMG) з прямим приводом (Direct Drive, без мультиплікатора).

Орієнтація на вітер: автоматична (за допомогою хвостового оперення з механізмом складання ротора при урагані).

Висота несучої щогли: 15 м (для виходу із зони приземної турбулентності).

Тип інвертора: мережевий гібридний інвертор потужністю 10 кВт (з підтримкою контролерів заряду від ВЕУ та сумісністю із сонячними панелями).

Існуюча резервна генерація: передбачити можливість інтеграції з масивом сонячних фотоелектричних модулів (ФЕМ) загальною потужністю до 5 кВт.

Акумуляторний парк: тип хімії батарей — літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄); номінальна напруга збірки — 48 В; ємність АКБ розраховується з умови забезпечення автономної роботи критичного навантаження ферми (насоси, вентиляція) протягом мінімум 12 годин за умови повної відсутності вітру та сонця.

9. Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану — графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	

7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Андрій НЕМІЧЕВ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 74 сторінок, 5 розділів, 26 рисунків, 18 таблиць, 23 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: процес автономного електрозабезпечення технологічних споживачів малопотужного фермерського господарства за рахунок використання вітрової енергії.

Мета роботи: підвищення рівня енергетичної автономності та зниження операційних витрат фермерського господарства шляхом розробки та теоретичного обґрунтування параметрів вітроенергетичної установки з гібридною інверторною системою керування.

Методи дослідження: методи класичної аеродинаміки (для розрахунку параметрів вітроколеса); методи теоретичної електротехніки (для розрахунку та побудови схем локальної мікромережі); математичне моделювання добового енергетичного балансу; методи інженерного конструювання; техніко-економічний аналіз.

Отримані результати: Обґрунтовано вибір та кінематичну схему горизонтально-осьової вітроенергетичної установки (ВЕУ) номінальною потужністю 5 кВт. Виконано аеродинамічний розрахунок трилопатевого вітроколеса, оптимізованого для роботи при швидкості вітру 9 м/с, та конструкційний розрахунок на міцність несучої щогли. Розроблено принципову електричну схему системи живлення, розраховано ємність акумуляторного парку для покриття критичного добового навантаження ферми (40–50 кВт·год).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ВІТРОКОЛЕСО, ГІБРИДНИЙ ІНВЕРТОР, АВТОНОМНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, МІКРОМЕРЕЖА (MICROGRID), АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

					14.17 - КР.016.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Немічев А.В.				РЕФЕРАТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.							6	1
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ.....	12
1.1 Аналіз енергетичних потреб малопотужного фермерського господарства.....	12
1.2 Огляд сучасних конструкцій вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності (горизонтально- та вертикально-осьові).....	14
1.3 Оцінка вітрового потенціалу південних регіонів України (на прикладі прибережних та степових зон Одещини).....	17
1.4 Обґрунтування доцільності використання гібридних інверторів для інтеграції ВЕУ з існуючими сонячними електростанціями.....	21
Висновок.....	25
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ.....	26
2.1 Аеродинамічний розрахунок вітроколеса: визначення коефіцієнта використання енергії вітру та вибір профілю лопаті.....	26
2.2 Математична модель енергетичного балансу фермерського господарства.....	28
2.3 Алгоритми узгодження роботи ВЕУ, акумуляторних батарей та зовнішньої мережі через гібридний інвертор.....	29
Висновки.....	30
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕУ.....	

48

					48									
					14.17 - КР.016.0.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ									
Розроб.		Нмічев А.В.												
Перевір.		Дядюра К. О.												
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												
					Літ.		Аркуш		Аркушів					
							7		2					

3.1 Розрахунок на міцність лопатей та головного вала вітроколеса.....	33
3.2 Вибір електрогенератора (на постійних магнітах) та системи автоматичної орієнтації на вітер.....	38
3.3 Розрахунок ємності акумуляторного парку (LiFePO ₄) для забезпечення добової автономності.....	41
3.4 Розробка принципової електричної схеми гібридної системи живлення ферми.....	43
Висновки.....	46
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	48
4.1 Аналіз небезпечних факторів під час висотних монтажних робіт та експлуатації ВЕУ.....	48
4.2 Розрахунок контуру заземлення та системи блискавкозахисту щогли генератора.....	50
4.3 Заходи пожежної безпеки під час експлуатації гібридного інвертора та літєвих акумуляторних станцій.....	53
4.4 Перша допомога при нещасних випадках.....	54
4.5 Екологічні аспекти та утилізація.....	55
Висновки	56
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ ВЕУ.....	58
5.1 Капітальні інвестиції на проєктування, закупівлю обладнання та монтажні роботи.....	58
5.2 Експлуатаційні витрати (ОРЕХ).....	61
5.3 Розрахунок річної генерації електроенергії	62
5.4 Розрахунок собівартості згенерованої електроенергії.....	63
Висновок.....	70
ВИСНОВОК.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний агропромисловий комплекс України функціонує в умовах безпрецедентних енергетичних викликів. Забезпечення стабільного та економічно вигідного електропостачання є критичною умовою збереження рентабельності малих фермерських господарств (птахоферм, тепличних комплексів, систем крапельного зрошення). Постійне зростання тарифів на електроенергію для комерційних споживачів, а також ризики нестабільності об'єднаної енергосистеми (віялові або аварійні відключення) змушують аграріїв шукати альтернативні, децентралізовані джерела живлення.

Традиційним рішенням на сьогодні є впровадження сонячних електростанцій. Проте їх суттєвим недоліком є яскраво виражена добова та сезонна нерівномірність генерації (відсутність енергії вночі та різке падіння генерації в осінньо-зимовий період). Водночас, для південних та степових регіонів України характерний високий вітровий потенціал, пік якого часто припадає саме на періоди низької сонячної інсоляції. З огляду на це, встановлення вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності дозволяє ефективно компенсувати ці недоліки.

Ключовим інженерним рішенням у цьому контексті є застосування гібридного інвертора, який виступає ядром локальної мікромережі (Microgrid). Він дозволяє органічно об'єднати вітрогенератор, існуючі масиви сонячних панелей, систему накопичення енергії (акумуляторні батареї) та загальну мережу. Така архітектура здатна автоматично балансувати навантаження, максимізувати рівень власного споживання та гарантувати безперебійну роботу критичного обладнання ферми.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Немічев А.В.			ВСТУП		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.						9	3
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							

Отже, розробка та обґрунтування параметрів вітроенергетичної установки, інтегрованої в гібридну систему електроживлення малого фермерського господарства, є своєчасним, економічно доцільним та надзвичайно актуальним науково-прикладним завданням для сучасної агроінженерії.

Мета дослідження полягає у підвищенні рівня енергетичної автономності та зниженні операційних витрат фермерського господарства шляхом розробки та теоретичного обґрунтування параметрів вітроенергетичної установки з гібридною інверторною системою керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан, технологічні тренди та перспективи використання вітроенергетичних установок малої потужності для автономного енергозабезпечення підприємств АПК.

2. Оцінити вітровий потенціал регіону експлуатації та розробити математичну модель добового енергетичного балансу фермерського господарства.

3. Обґрунтувати аеродинамічні та кінематичні параметри вітроколеса для забезпечення максимальної генерації при розрахункових швидкостях вітру.

4. Розробити алгоритмічні моделі функціонування гібридної мікромережі, що забезпечують оптимальне узгодження роботи вітрогенератора, акумуляторних батарей та зовнішньої мережі через гібридний інвертор.

5. Здійснити інженерний розрахунок на міцність основних несучих елементів конструкції ВЕУ та виконати підбір електротехнічної компонентної бази (генератора, інвертора, АКБ).

6. Виконати техніко-економічне обґрунтування проєкту та сформулювати заходи з охорони праці й безпеки експлуатації установки.

Об'єкт дослідження – процес автономного електрозабезпечення технологічних споживачів малопотужного фермерського господарства за рахунок використання вітрової енергії.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Предмет дослідження – конструктивно-аеродинамічні параметри вітроколеса, енергетичні характеристики установки та алгоритми функціонування гібридної системи електроживлення.

Методи дослідження. Теоретичну і методологічну основу роботи становлять фундаментальні закони аеродинаміки, теоретичної механіки та електротехніки. Для обґрунтування параметрів вітроколеса застосовано імпульсну теорію ідеального вітроколеса та теорію елементарного струменя. Оцінку вітрового потенціалу та розрахунок енергетичних балансів виконано з використанням методів математичного та статистичного моделювання. Проєктування та розрахунок конструктивних елементів на міцність здійснено аналітичними методами опору матеріалів із залученням систем автоматизованого проєктування (CAD). Оцінка доцільності впровадження установки базується на методах техніко-економічного аналізу інвестиційних проєктів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена комплексна інженерна модель автономної системи живлення, алгоритми роботи гібридного інвертора та розраховані параметри вітроколеса можуть бути використані як типові (базові) проєктні рішення для електрифікації віддалених та енергозалежних малих фермерських господарств. Результати розрахунків та принципові схеми придатні для безпосереднього використання під час монтажу гібридних енергетичних систем в агропромисловому секторі.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

1.1 Аналіз енергетичних потреб малопотужного фермерського господарства

Сучасне аграрне виробництво характеризується високим рівнем енергоємності. Перехід від традиційних екстенсивних методів господарювання до інтенсивних технологій (контрольований мікроклімат, автоматизоване крапельне зрошення, механізація процесів життєзабезпечення тварин) робить електроенергію базовим ресурсом, від якого залежить життєздатність усього підприємства [1, 2].

Для умов південних регіонів, зокрема степової та прибережної зон Одещини, типовим представником малого агробізнесу є тепличні комплекси, птахоферми або господарства з вирощування плодово-ягідних культур на крапельному зрошенні. Особливістю таких об'єктів є жорсткі вимоги до безперервності електропостачання (II категорія надійності). Навіть короткочасне знеструмлення вентиляційних систем у пташнику або зупинка циркуляційних насосів у системі гідропоніки може призвести до незворотних втрат біомаси.

Основними споживачами електричної енергії малопотужного фермерського господарства (із загальною встановленою потужністю струмоприймачів до 10 кВт) є [2, 3]:

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Немічев А.В.			РОЗДІЛ 1				Літ.		Аркуш	Аркушів		
Перевір.		Дядюра К. О.									12	12		
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

1. Системи водопостачання та зрошення (30–40% енергобалансу): Свердловинні та поверхневі насоси. Характеризуються високими пусковими струмами та необхідністю тривалої роботи в період вегетації.

2. Системи мікроклімату (20–30%): Припливно-витяжна вентиляція, системи туманоутворення (охолодження) та циркуляційні вентилятори. Працюють цілодобово зі змінною інтенсивністю залежно від температури навколишнього середовища.

3. Освітлювальне обладнання (15–20%): Штучне досвічування (фітолампи) для збільшення тривалості світлового дня в осінньо-зимовий період або чергове освітлення території.

4. Допоміжне та керуюче обладнання (10–15%): Контролери мікроклімату, системи безпеки, автоматика запірної арматури, холодильні камери короткострокового зберігання продукції.

Для коректного розрахунку параметрів гібридної мікромережі необхідно сформувати добовий графік електричного навантаження (таблиця 1.1). Він демонструє нерівномірність споживання протягом доби.

Таблиця 1.1 – Орієнтовний розрахунковий добовий графік споживання малопотужної ферми (загальне добове споживання 45 кВт·год)

Період доби	Характер роботи обладнання	Середня активна потужність, кВт	Споживання за період, кВт·год
00:00 – 06:00	Базова вентиляція, чергове освітлення, автоматика	1,0	6,0
06:00 – 10:00	Ранковий пік (включення насосів, активна вентиляція)	3,5	14,0
10:00 – 18:00	Робочий режим (підтримка мікроклімату, періодичний полив)	1,5	12,0
18:00 – 22:00	Вечірній пік (досвічування, заповнення резервуарів водою)	2,5	10,0
22:00 – 24:00	Перехід у нічний режим	1,5	3,0
Всього за добу:			45,0 кВт·год

Аналіз графіка показує наявність ранкових та вечірніх піків. Використання виключно сонячних електростанцій (СЕС) не здатне повністю покрити цей графік без масивного акумуляторного парку, оскільки піки навантаження збігаються з періодами мінімальної сонячної інсоляції. Це обґрунтовує необхідність інтеграції вітроенергетичної установки (ВЕУ), яка часто має максимальну продуктивність саме у вечірні та нічні години, згладжуючи загальний енергетичний баланс [4].

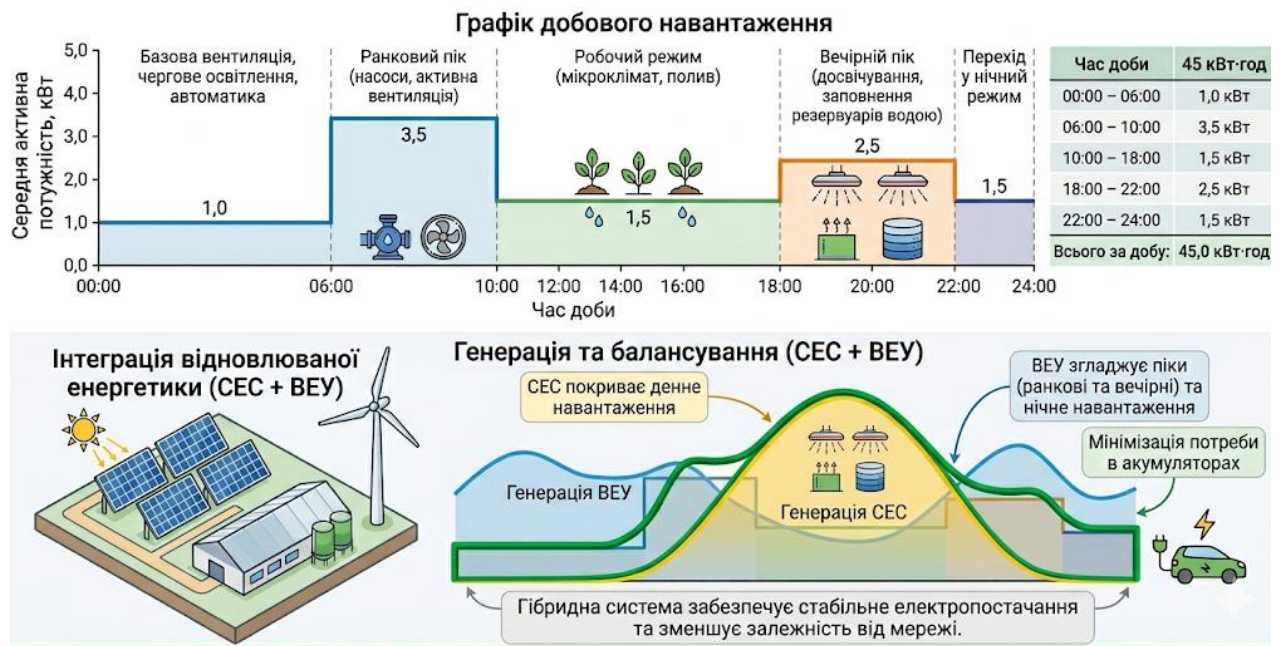


Рисунок 1.1 – Оптимізація енергопостачання малопотужної ферми

1.2 Огляд сучасних конструкцій вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності

Вибір оптимальної архітектури вітрогенератора є визначальним етапом проєктування автономної системи електропостачання. Всі сучасні ВЕУ класифікуються за орієнтацією осі обертання ротора на дві великі групи: горизонтально-осьові (HAWT - Horizontal-Axis Wind Turbines) та вертикально-осьові (VAWT - Vertical-Axis Wind Turbines) [5].

Вертикально-осьові вітроенергетичні установки (VAWT) (рисунок 1.2).

До цієї категорії належать ротори Савоніуса (працюють за рахунок сили аеродинамічного опору) та ротори Дар'є (працюють за рахунок аеродинамічної підйомної сили) [6].

Переваги: Незалежність від напрямку вітру (не потребують механізму орієнтації на вітер); низький рівень шуму; можливість розміщення генератора та редуктора безпосередньо біля землі, що суттєво полегшує технічне обслуговування.

Недоліки: Низький коефіцієнт використання енергії вітру (для ротора Савоніуса він не перевищує 0,15–0,20); складність самозапуску (ротори Дар'є часто потребують початкового розкручування від електродвигуна); високе навантаження на підшипникові вузли через пульсації крутного моменту.

Через низьку аеродинамічну ефективність використання VAWT для забезпечення стабільного живлення фермерського господарства потужністю 5 кВт є економічно недоцільним (потребуватиме ротора величезних габаритів).

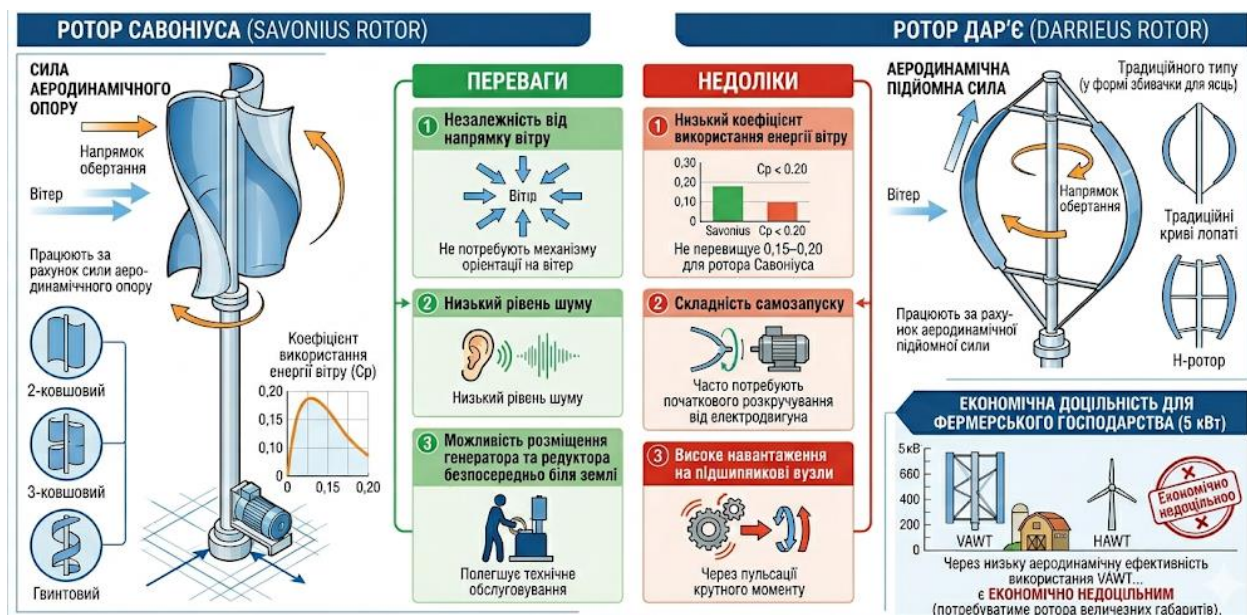


Рисунок 1.2 – Вертикально-осьові вітроенергетичні установки

Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки (HAWT) (рисунок 1.3).

Це класична крильчата конструкція (найчастіше трилопатева), вісь обертання якої паралельна до напрямку вітрового потоку. Відповідно до

вихідних даних кваліфікаційної роботи, для проєкту обрано саме цей тип конструкції [7].

Переваги: Найвищий серед усіх установок коефіцієнт використання енергії вітру (досягає 0,40–0,45); висока швидкохідність, що дозволяє використовувати багатополюсні генератори на постійних магнітах (PMG) з прямим приводом без застосування мультиплікаторів; менша матеріаломісткість на 1 кВт встановленої потужності порівняно з VAWT [8].

Недоліки: Необхідність винесення важкої гондоли з генератором на високу щоглу (15 м); обов'язкова наявність системи орієнтації на вітер (для установок до 10 кВт це реалізується за допомогою пасивного хвостового оперення); необхідність системи струмознімання (контактних кілець) для передачі енергії від поворотної гондоли до нерухомої щогли [9].

Для забезпечення потужності 5 кВт при розрахунковій швидкості вітру 9 м/с оптимальним рішенням є трилопатевий ротор. Збільшення кількості лопатей (наприклад, до 5 або 6) збільшує стартовий крутний момент, але знижує загальну швидкохідність і аеродинамічну ефективність установки на робочих режимах, водночас суттєво підвищуючи вартість виготовлення вітроколеса.



Рисунок 1.3 – Горизонтально-осьові вітроенергетичні установки (HAWT)

1.3 Оцінка вітрового потенціалу південних регіонів України (на прикладі Одещини)

Ефективність функціонування будь-якої вітроенергетичної установки (ВЕУ) визначається не лише її аеродинамічною досконалістю, а насамперед наявністю достатнього та стабільного вітрового ресурсу в місці експлуатації. Вітер є стохастичним (випадковим) метеорологічним явищем, тому для техніко-економічного обґрунтування доцільності встановлення ВЕУ необхідно провести статистичний аналіз вітрового клімату регіону [8,9].

Загальна характеристика вітрового клімату регіону.

Згідно з даними вітроенергетичних кадастрів та метеорологічних спостережень, територія України має суттєву територіальну нерівномірність розподілу вітрових ресурсів. Найбільш перспективними для розвитку малої та великої вітроенергетики є узбережжя Чорного та Азовського морів, Карпатський регіон, а також степові зони півдня України (зокрема, Одеська, Миколаївська та Херсонська області) [10].

Для відкритої степової місцевості Одещини характерна відсутність значних природних перешкод (лісових масивів, гірських хребтів), що сприяє формуванню стабільних ламінарних повітряних потоків. Середньорічна швидкість вітру на стандартній висоті метеорологічного флюгера (10 метрів над поверхнею землі) у цьому регіоні становить 5,5–6,0 м/с.

Важливим інструментом для позиціонування ВЕУ на місцевості (щоб уникнути аеродинамічного затінення від будівель ферми) є аналіз панівних напрямків вітру (рисунок 1.4).

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

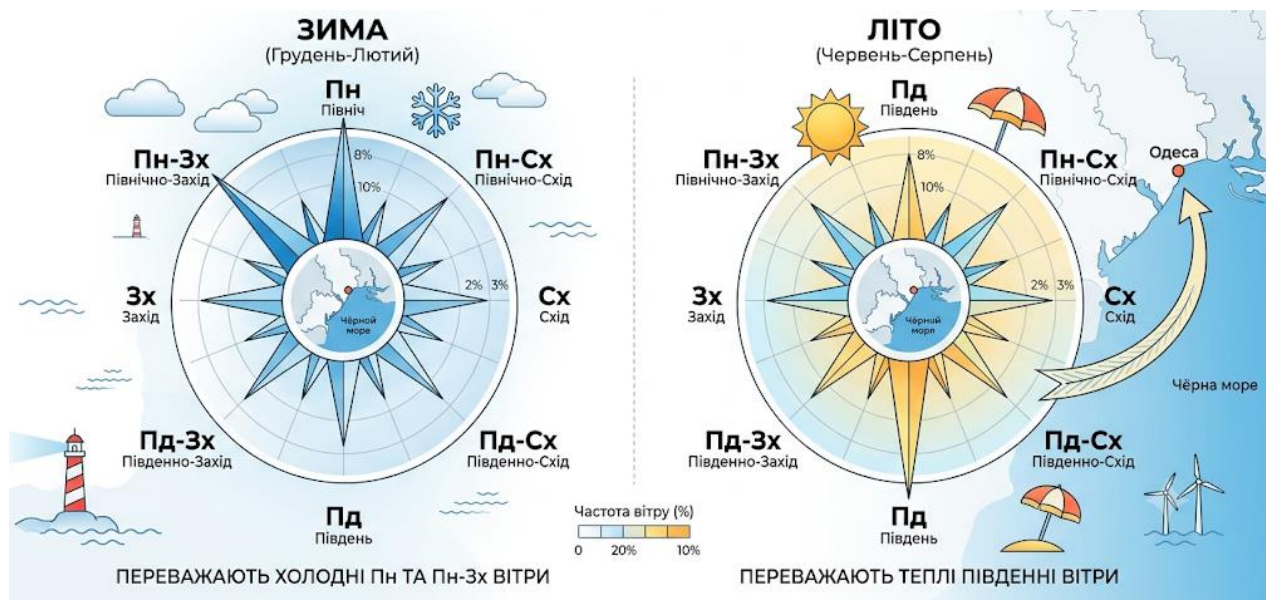


Рисунок 1.4 – Багаторічна роза вітрів для Одеського регіону

Математичні моделі профілю вітру та розподілу швидкостей.

Для точних розрахунків генерації значення середньорічної швидкості вітру є недостатнім. По-перше, швидкість вітру зростає з висотою. Оскільки ротор проєктованої ВЕУ планується розмістити на висоті 15 м, необхідно виконати перерахунок швидкості з метеорологічної висоти (10 м) на висоту осі вітроколеса. Для цього використовується емпіричний степеневий закон:

$$v_h = v_{10} \cdot \left(\frac{h}{h_{10}} \right)^\alpha \quad (1.1)$$

де v_h – розрахункова швидкість вітру на висоті щогли h (15 м); v_{10} – базова швидкість вітру на висоті h_{10} (10 м), яку приймаємо за 5,5 м/с; α – коефіцієнт зсуву вітру (експонента Хеллмана), що залежить від шорсткості підстилаючої поверхні. Для відкритої сільськогосподарської місцевості з низькою рослинністю $\alpha \approx 0,143$ (закон 1/7).

Виконуючи перерахунок, отримуємо:

$$v_{15} = 5,5 \cdot \left(\frac{15}{10} \right)^{0,143} = 5,5 \cdot 1,059 \approx 5,82 \text{ м/с.}$$

По-друге, необхідно враховувати частоту повторюваності кожної градації швидкості вітру протягом року. У вітроенергетиці цей розподіл традиційно описується функцією щільності ймовірностей Вейбулла:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}, \quad (1.2)$$

Де v – швидкість вітру, м/с; k – параметр форми (безрозмірна величина, що характеризує ступінь розкиду швидкостей; для степових районів України $k \approx 1,8 \dots 2,1$); c – параметр масштабу (м/с), який тісно пов'язаний із середньою швидкістю вітру [11].

Графік функції Вейбулла демонструє, що найбільшу кількість годин у році дують вітри зі швидкістю 4–7 м/с. Саме на цей діапазон і повинна бути оптимізована аеродинаміка лопатей нашої малопотужної ВЕУ (рисунк 1.5).

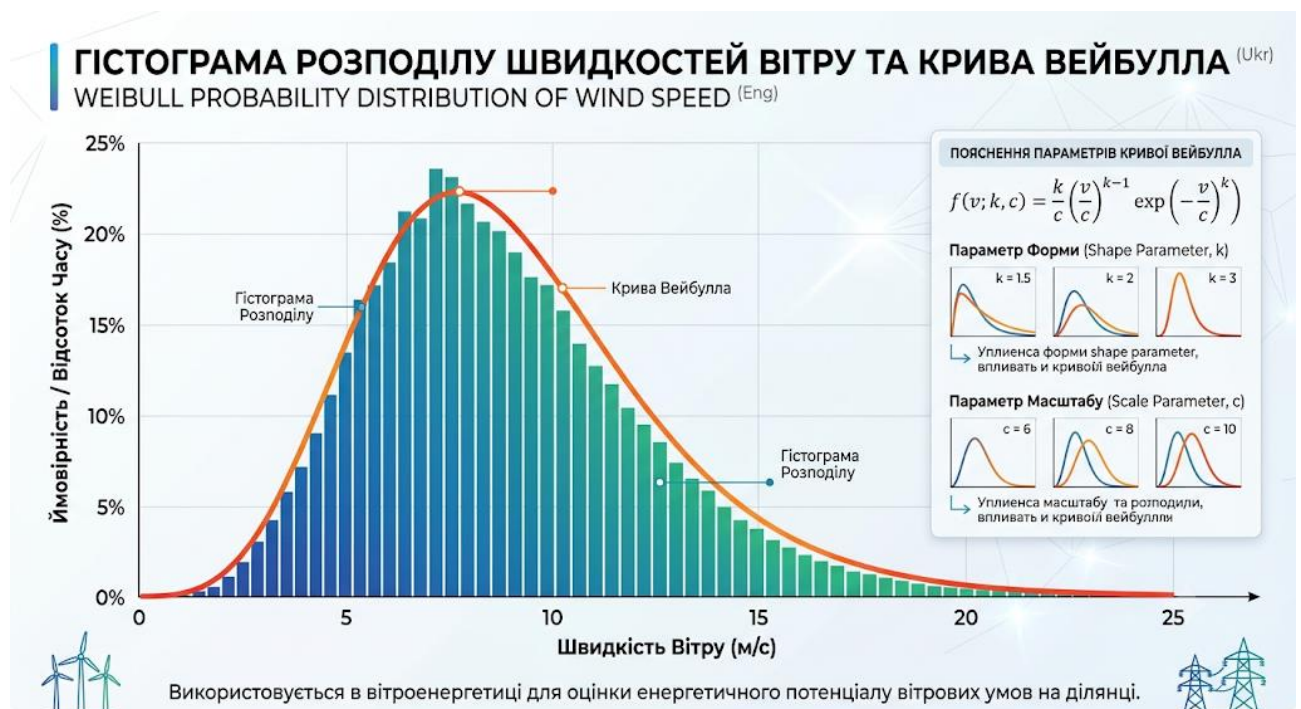


Рисунок 1.5 – Гістограма розподілу швидкостей вітру та крива Вейбулла. (Тут слід розмістити графік, де по осі X — швидкість вітру від 0 до 25 м/с, а по осі Y — кількість годин у році або відсоток часу).

Енергетичний потенціал вітрового потоку.

Питома потужність вітрового потоку (густина потужності вітру, W) — це кінетична енергія повітряних мас, що проходять через одиницю площі (1 м^2) за одну секунду. Ця величина є ключовим індикатором перспективності регіону і розраховується за формулою:

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3, \quad (1.3)$$

Де ρ – густина повітря (за стандартних атмосферних умов $T = 15^\circ\text{C}$ та нормального тиску вона становить $1,225 \text{ кг/м}^3$); v – швидкість вітру, м/с.

Кубічна залежність питомої потужності від швидкості вітру (v^3) є фундаментальним законом вітроенергетики. Вона означає, що при збільшенні швидкості вітру лише у 2 рази (наприклад, з 4 м/с до 8 м/с) енергія потоку зростає у 8 разів.

Оскільки швидкість вітру постійно коливається, середня потужність вітрового потоку *не дорівнює* потужності, розрахованій за середньою швидкістю вітру. Розрахункова питома енергетична потужність вітру для Одеського регіону на висоті 15–20 метрів становить близько $200 \dots 250 \text{ Вт/м}^2$. Згідно з міжнародною класифікацією (Pacific Northwest Laboratory, PNL), такі показники належать до 3-го класу вітрового потенціалу (Fair/Good), що є цілком достатнім та економічно рентабельним для впровадження ВЕУ малої потужності.

Проведений аналіз доводить, що кліматичні умови степової зони Півдня України мають достатній енергетичний потенціал для автономного електропостачання фермерських господарств. Перерахунок швидкості на висоту осі вітроколеса (15 м) підтвердив середню швидкість вітру на рівні 5,8 м/с, що гарантує стабільну роботу ВЕУ. Урахування кубічної залежності енергії від швидкості потоку та законів розподілу Вейбулла створює необхідну теоретичну базу для вибору площі змітання вітроколеса та визначення номінальної потужності генератора в наступних розділах роботи [12].

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Обґрунтування доцільності використання гібридних інверторів для інтеграції ВЕУ з існуючими сонячними електростанціями

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у сільському господарстві стикається з фундаментальною проблемою — нестабільністю генерації. Вітер і сонячне випромінювання є стохастичними величинами, які не підпорядковуються графіку роботи технологічного обладнання ферми.

Історично для вирішення цієї проблеми використовувалися два типи інверторного обладнання (рисунок 1.6) [13]:

1. Мережеві (On-Grid) інвертори: Найбільш економічно вигідні, дозволяють продавати надлишки за "зеленим" тарифом. Однак вони мають критичний недолік — за правилами електробезпеки вони миттєво вимикаються у разі зникнення напруги в зовнішній мережі (Anti-Islanding protection). Це робить їх марними для ферми під час віялових або аварійних відключень.

2. Автономні (Off-Grid) інвертори: Працюють незалежно від мережі, накопичуючи енергію в акумуляторах. Проте вони не здатні "підмішувати" енергію з мережі до навантаження (якщо потужності від ВДЕ не вистачає) і не можуть продавати надлишки, що збільшує термін окупності проєкту [14].

Для сучасного фермерського господарства II категорії надійності обидва ці підходи є недостатніми. Оптимальним інженерним рішенням є застосування гібридного інвертора, який об'єднує функціонал обох попередніх типів і виступає ядром інтелектуальної локальної мікромережі (Microgrid) [15].



Рисунок 1.6 – Порівняння гібридних інверторів для інтеграції ВЕУ з існуючими сонячними електростанціями

Концепція мікромережі (Microgrid) та синергія вітру і сонця

Малопотужна ферма, оснащена сонячною електростанцією (СЕС) та вітроенергетичною установкою (ВЕУ), утворює гетерогенну генеруючу систему. Ці два джерела мають ідеально комплементарний (взаємодоповнюючий) характер [15]:

Добова комплементарність: Сонячна генерація досягає піку вдень і падає до нуля вночі. Натомість, через добові зміни температурних градієнтів, у степових регіонах найвищі швидкості вітру часто фіксуються у вечірні та нічні години [16].

Сезонна комплементарність: В осінньо-зимовий період сонячна інсоляція падає у 3–4 рази через похмурість та короткий світловий день. Одночасно з цим зимові місяці є найбільш вітряними в році.

Гібридний інвертор дозволяє фізично об'єднати ці джерела на спільній шині постійного струму (DC Bus) та синхронізувати їхню роботу з акумуляторною батареєю (АКБ).

Математично миттєвий баланс потужностей такої гібридної системи в будь-який момент часу t описується рівнянням:

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) \pm P_{\text{BAT}}(t) \pm P_{\text{GRID}}(t), \quad (1.4)$$

де: $P_{\text{load}}(t)$ – активна потужність, яку споживає ферма; $P_{\text{WT}}(t)$ – потужність генерації вітроустановки; $P_{\text{PV}}(t)$ – потужність генерації сонячних панелей; $P_{\text{BAT}}(t)$ – потужність акумуляторної батареї: знак «+» відповідає розряду (віддача енергії в систему), знак «-» – заряду (споживання енергії з системи); $P_{\text{GRID}}(t)$ – потужність зовнішньої мережі: знак «+» означає споживання енергії з мережі, знак «-» – експорт енергії в мережу.

Алгоритми управління потоками енергії

Головна перевага гібридного інвертора полягає у наявності інтелектуального мікропроцесорного управління, яке автоматично пріоритезує джерела живлення залежно від поточного стану системи. У пам'ять інвертора закладаються специфічні алгоритми роботи [17, 18]:

1. Режим максимального власного споживання (Self-Consumption): Пріоритетом є забезпечення навантаження ферми (насосів, вентиляції) безкоштовною енергією від ВДЕ (P_{WT} та P_{PV}). Якщо генерація перевищує споживання, інвертор спрямовує надлишок на зарядку АКБ. Тільки після повного заряду батарей інвертор віддає зайву енергію в зовнішню мережу.

2. Режим зрізання піків (Peak Shaving): Під час ранкових або вечірніх піків споживання (коли вмикаються потужні насоси), інвертор бере базову потужність із загальної мережі, а "пікову" надбавку підмішує від вітрогенератора та акумуляторів. Це дозволяє фермі не перевищувати дозовану договірну потужність електромережі (наприклад, ліміт у 10 кВт) та уникати штрафів [19].

3. Режим острова (Islanding Mode): У разі аварії на зовнішній ЛЕП, гібридний інвертор за лічені мілісекунди (<20 мс) фізично відсікає ферму від загальної мережі за допомогою внутрішніх контакторів і переходить у режим автономного формування синусоїди напруги 220 В від акумуляторів та

вітрогенератора.

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ		Аркуш
							23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Особливості інтеграції ВЕУ з гібридним інвертором.

На відміну від сонячних панелей, які видають відносно стабільний постійний струм і легко узгоджуються з вбудованими MPPT-трекерами інвертора, вітрогенератор генерує нестабільний трифазний змінний струм дикої частоти. Його напруга та частота миттєво змінюються від кожного пориву вітру.

Крім того, ВЕУ має значну механічну інерцію. Тому гібридний інвертор (або зовнішній контролер вітрогенератора, підключений до інвертора) повинен мати специфічну криву відстеження точки максимальної потужності (Wind MPPT curve) та вбудовану систему захисту. При повному заряді акумуляторів та відсутності споживання, вітрогенератор не можна просто відімкнути від навантаження (як сонячну панель), інакше він розкрутиться до руйнівних швидкостей ("підє в рознос"). Надлишкова енергія повинна примусово скидатися на баластне навантаження (Dump Load) — наприклад, на ТЕНи для нагрівання води для технологічних потреб ферми.

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Проведений аналіз стану та перспектив використання вітроенергетичних установок в агропромисловому комплексі дозволяє сформулювати такі висновки:

1. Малопотужні фермерські господарства (птахоферми, тепличні комплекси) відносяться до споживачів II категорії надійності. Побудований добовий графік електричного навантаження демонструє чітко виражені ранкові та вечірні піки споживання на рівні 3,5–4,0 кВт.

2. Аналіз вітрового клімату прибережних та степових зон Одещини підтвердив високий енергетичний потенціал регіону (розрахункова швидкість на висоті 15 м становить понад 5,8 м/с). Кубічна залежність потужності від швидкості вітру робить економічно обґрунтованим впровадження ВЕУ горизонтально-осьового типу для перекриття пікових потреб господарства.

3. Доведено, що класичні мережеві або автономні архітектури електроживлення не задовольняють вимогам сучасного агробізнесу. Найбільш ефективним технічним рішенням є створення мікромережі на базі гібридного інвертора, який забезпечує синергетичне об'єднання вітрогенератора, резервних сонячних масивів та акумуляторного парку. Це гарантує максимізацію використання власної енергії, можливість резервного живлення критичних систем ферми при відключеннях мережі та автоматичне балансування нерівномірних навантажень.

4. Отримані дані вітрового потенціалу та проаналізовані схеми мікромереж виступають вихідними теоретичними даними для другого розділу, де буде виконано безпосередній аеродинамічний розрахунок вітроколеса та енергетичних балансів системи.

					14.17 - КР. 016.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ

У цьому розділі виконується математичний розрахунок ключових параметрів проєктуємої вітроенергетичної установки (ВЕУ) номінальною потужністю 5 кВт. На основі законів аеродинаміки визначаються габарити вітроколеса, а за допомогою рівнянь енергетичного балансу формується теоретична модель функціонування гібридної системи електроживлення фермерського господарства.

2.1 Аеродинамічний розрахунок вітроколеса: визначення коефіцієнта використання енергії вітру та вибір профілю лопаті

Процес перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертання вала вітроколеса описується класичною теорією ідеального ротора (теорія М.Є. Жуковського та А. Беца) [20].

Електрична потужність ВЕУ, яка видається в локальну мережу, визначається базовим рівнянням:

$$P_{\text{ел}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta_m \eta_g, \quad (2.1)$$

де: ρ – густина повітря (приймається $1,225 \text{ кг/м}^3$ за нормальних умов); A – омітальна площа вітроколеса; v – розрахункова швидкість вітру (згідно з вихідними даними $v = 9 \text{ м/с}$); C_p – аеродинамічний коефіцієнт використання енергії вітру; η_m – механічний ККД трансмісії (для системи з прямим приводом

					14.17 - КР. 016.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2			
Розроб.								
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						26	17	

Direct Drive $\eta_m \approx 0,95$); η_g – ККД електричного генератора (приймається $\eta_g \approx 0,90$).

Згідно із законом Беца, теоретично максимальне значення C_p не може перевищувати 0,593. Для сучасних трилопатевих горизонтально-осьових роторів малої потужності реальне значення коефіцієнта становить $C_p \approx 0,35$.

Знайдемо необхідну омітальну площу A для забезпечення електричної потужності $P_{\text{ел}} = 5000$ Вт:

$$\begin{aligned} A &= \frac{2P_{\text{ел}}}{\rho v^3 C_p \eta_m \eta_g} = \frac{2 \cdot 5000}{1,225 \cdot 9^3 \cdot 0,35 \cdot 0,95 \cdot 0,90} \\ &= \frac{10000}{1,225 \cdot 729 \cdot 0,29925} = 0,29925 = 0,35 \cdot 0,95 \cdot 0,90, 1,225 \cdot 729 \\ &= 893,025, 893,025 \cdot 0,29925 \approx 267,23 \\ A &= \frac{10000}{267,23} \approx 37,4 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Знаючи омітальну площу, розрахуємо необхідний діаметр вітроколеса D :

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 37,4}{3,1416}} \approx \sqrt{47,6} \approx 6,90 \text{ м.}$$

Для забезпечення уніфікації деталей та підвищення жорсткості конструкції приймаємо робочий діаметр вітроколеса $D = 7,0$ м. Радіус лопаті складе $R = 3,5$ м.

Наступним кроком є визначення швидкохідності вітроколеса (Z або λ), яка є відношенням лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості набігаючого вітрового потоку:

$$Z = \frac{\omega R}{v}, \quad (2.2)$$

Де ω – кутова швидкість обертання ротора.

Для трилопатевих генераторів, що працюють паралельно з мережевими інверторами, оптимальна швидкохідність лежить у межах $Z = 5 \dots 7$. Приймаємо розрахункове значення $Z = 6$.

					14.17 - КР. 016.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Тоді номінальна кутова швидкість обертання вала генератора при швидкості вітру 9 м/с складе:

$$\omega = \frac{Zv}{R} = \frac{6 \cdot 9}{3,5} \approx 15,43 \text{ рад/с.}$$

У перерахунку на частоту обертання (оберти за хвилину):

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 15,43}{3,1416} \approx 147 \text{ об/хв.}$$

Отримана частота обертання (147 об/хв) є достатньо низькою, що підтверджує правильність вибору тихохідного багатополюсного генератора на постійних магнітах (PMG) та дозволяє відмовитися від використання мультиплікатора, що підвищує загальну надійність системи.

2.2 Математична модель енергетичного балансу фермерського господарства

Для стабільного функціонування гібридної системи необхідно, щоб сумарна добова генерація перевищувала або дорівнювала добовому споживанню з урахуванням втрат у перетворювачах та акумуляторах. Математична модель добового балансу мікромережі має вигляд [21]:

$$E_{\text{load}} \leq (E_{\text{wt}} + E_{\text{pv}}) \cdot \eta_{\text{inv}} \pm \Delta E_{\text{bat}}, \quad (2.3)$$

Де E_{load} – добове споживання ферми (згідно з таблицею 1.1 становить 45 кВт·год); E_{wt} – добова генерація вітроустановки; E_{pv} – добова генерація сонячних панелей (резервних 5 кВт); η_{inv} – ККД гібридного інвертора (0,95); ΔE_{bat} – зміна запасу енергії в акумуляторному парку (додатна – розряд, від'ємна – заряд).

Оцінимо середньодобову генерацію ВЕУ (E_{wt}). Оскільки вітер є непостійним, у вітроенергетиці використовується коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП, або Capacity Factor C_f). Для степових зон Одещини для малих ВЕУ $C_f \approx 0,20 \dots 0,25$:

$$E_{\text{wt}} = P_{\text{ном}} \cdot 24 \cdot C_f = 5 \cdot 24 \cdot 0,20 = 24 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

					14.17 - КР. 016.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Добова генерація сонячної станції потужністю 5 кВт (E_{pv}) у весняно-осінній період із середнім еквівалентом 4 сонячних годин на добу (h_{sun}) [22]:

$$E_{pv} = P_{pv} \cdot h_{sun} \cdot \eta_{sys} = 5 \cdot 4 \cdot 0,8 = 16 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Сумарна добова генерація гібридної системи становить $24 + 16 = 40$ кВт·год, що з урахуванням ККД інвертора покриває майже 85% добової потреби ферми автономно. Дефіцит (близько 5–7 кВт·год) перекривається за рахунок споживання із загальної мережі в періоди нічного пільгового тарифу, що здійснюється інвертором автоматично.

2.3 Алгоритми узгодження роботи ВЕУ, акумуляторних батарей та зовнішньої мережі через гібридний інвертор

Управління потоками енергії (Power Flow Management) є основним завданням контролера гібридного інвертора. Робота системи описується логічним автоматом станів, що базується на оцінці рівня заряду батарей SOC (State of Charge) (рисунок 2.1).

Для літій-залізо-фосфатних акумуляторів ($LiFePO_4$) задаються експлуатаційні межі:

$$SOC_{min} = 0,20(20\%), SOC_{max} = 0,95(95\%).$$

Поточна потужність генерації:

$$P_{gen}(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t). \quad (2.4)$$

Поточна потужність споживання ферми – $P_{load}(t)$.

Нев'язка потужності в момент часу t :

$$\Delta P(t) = P_{gen}(t) - P_{load}(t). \quad (2.5)$$

Динаміка заряду акумуляторної батареї.

Зміна енергії в АКБ описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dE_{bat}}{dt} = \begin{cases} \eta_{ch} \cdot \Delta P(t), & \Delta P(t) > 0(\text{заряд}), \\ \frac{\Delta P(t)}{\eta_{dis}}, & \Delta P(t) < 0(\text{розряд}), \\ 0, & \Delta P(t) = 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

					14.17 - КР. 016.2.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де $\eta_{ch} \approx 0,95$ – ККД заряду, $\eta_{dis} \approx 0,95$ – ККД розряду.

Рівень заряду:

$$SOC(t) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{nom}}, \quad (2.7)$$

Де E_{nom} – номінальна ємність батареї (кВт·год).

Алгоритм керування (логіка станів).

Інвертор реалізує кусково-задану функцію визначення потужності, що віддається в навантаження $P_{out}(t)$, потужності заряду/розряду $P_{bat}(t)$ та потужності, що споживається з мережі $P_{grid}(t)$.

Сценарій 1. Профіцит енергії ($\Delta P(t) > 0$)

$$\begin{aligned} P_{out}(t) &= P_{load}(t), \\ P_{bat}(t) &= \min \left(\Delta P(t), \frac{SOC_{max} - SOC(t)}{\Delta t} \cdot E_{nom} \cdot \eta_{ch} \right), \\ P_{dump}(t) &= \Delta P(t) - P_{bat}(t) \text{ якщо } SOC(t) \geq SOC_{max}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Якщо $SOC(t) \geq SOC_{max}$ і $\Delta P(t) > 0$, надлишок скидається на баластний резистор (Dump Load).

Сценарій 2. Дефіцит генерації ($\Delta P(t) < 0$) за наявності заряду АКБ ($SOC(t) > SOC_{min}$)

$$P_{out}(t) = P_{gen}(t) + P_{bat,dis}(t), \quad (2.9)$$

$$\text{Де } P_{bat,dis}(t) = \min \left(|\Delta P(t)|, \frac{SOC(t) - SOC_{min}}{\Delta t} \cdot E_{nom} \cdot \eta_{dis} \right).$$

Розряд триває, поки $SOC(t) > SOC_{min}$.

Сценарій 3. Дефіцит генерації та розряджені АКБ ($SOC(t) \leq SOC_{min}$)

$$\begin{aligned} P_{bat}(t) &= 0 \text{ (блокування розряду)}, \\ P_{grid}(t) &= P_{load}(t) - P_{gen}(t) \text{ (споживання з мережі)}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Якщо мережа відсутня ($P_{\text{grid,max}} = 0$), інвертор відключає не критичні навантаження, залишаючи лише пріоритетну групу $P_{\text{crit}}(t)$:

$$P_{\text{out}}(t) = \min(P_{\text{gen}}(t), P_{\text{crit}}(t)). \quad (2.11)$$

Узагальнене правило перемикавання

Миттєвий баланс потужностей у будь-який момент часу:

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{gen}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{grid}}(t) - P_{\text{dump}}(t), \quad (2.12)$$

Де $P_{\text{bat}}(t) \geq 0$ при заряді, $P_{\text{bat}}(t) \leq 0$ при розряді, $P_{\text{grid}}(t) \geq 0$, $P_{\text{dump}}(t) \geq 0$.

Усі перемикавання відбуваються автоматично з затримкою не більше 20 мс.



Рисунок 2.1 – Алгоритм узгодження роботи ВЕУ, акумуляторних батарей та зовнішньої мережі через гібридний інвертор

Створено базис для конструкторського розділу. Отримані теоретичні значення (діаметр вітроколеса, частота обертання, добовий дефіцит енергії) є вихідними даними для виконання інженерного розрахунку щогли на міцність, вибору моделі генератора та визначення ємності акумуляторного парку в наступному розділі роботи.

Висновки

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичне обґрунтування ключових аеродинамічних та енергетичних параметрів вітроенергетичної установки (ВЕУ) і гібридної мікромережі фермерського господарства. За результатами розрахунків зроблено такі висновки:

1. Обґрунтовано аеродинамічні параметри вітроколеса. Доведено, що для забезпечення номінальної електричної потужності 5 кВт при розрахунковій швидкості вітру 9 м/с необхідно застосувати горизонтально-осьовий трилопатевий ротор із діаметром 7,0 м (обмітальна площа 41,6 м²). Вибрана швидкохідність ($Z = 6$) забезпечує оптимальний тихохідний режим обертання (близько 147 об/хв). Це є технологічною перевагою, оскільки дозволяє відмовитися від надійнісно вразливого мультиплікатора та застосувати багатополісний генератор із прямим приводом (Direct Drive).

2. Сформовано математичну модель енергетичного балансу. Розрахунки підтвердили високу ефективність синергії вітрової та сонячної генерації. Встановлено, що спільна робота ВЕУ (із середньодобовим виробітком близько 24 кВт·год) та існуючої сонячної станції на 5 кВт (близько 16 кВт·год) здатна автономно перекривати понад 85% добової потреби фермерського господарства (яка становить 45 кВт·год). Залишковий дефіцит може бути автоматично компенсований гібридним інвертором із зовнішньої мережі в години дії пільгового нічного тарифу.

3. Розроблено алгоритми управління перетоками енергії. Визначено три базові логічні сценарії функціонування гібридного інвертора, які залежать від поточного балансу потужностей та рівня заряду акумуляторних батарей (SOC). Алгоритмічне забезпечення гарантує пріоритетне живлення навантажень ферми від відновлюваних джерел, безпечне скидання надлишкової енергії вітроколеса на баластне навантаження (ТЕНи) при 100% заряді АКБ та миттєвий перехід в автономний режим (Islanding Mode) у разі аварії на зовнішній ЛЕП.

					14.17 - КР. 016.2.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕУ

3.1 Розрахунок на міцність лопатей та головного вала вітроколеса

Конструкція вітроенергетичної установки (ВЕУ) працює у складних умовах динамічних знакозмінних навантажень. Від надійності механічної частини залежить безпека фермерського господарства, оскільки руйнування вітроколеса на швидкості може призвести до катастрофічних наслідків. Розрахунок ведеться для двох станів: номінального робочого режиму (швидкість вітру 9 м/с) та екстремального розрахункового режиму (ураганний порив 35 м/с при відмові системи гальмування) [23].

Вибір матеріалу та профілю лопаті.

Для ВЕУ потужністю 5 кВт із діаметром ротора $D = 7,0$ м (радіус лопаті $R = 3,5$ м) використання традиційного алюмінію або дерева є недоцільним через втому матеріалу та високу масу. Як основний конструкційний матеріал лопаті обрано епоксидний склопластик (Fiberglass), виготовлений методом вакуумного інфузійного формування.

Механічні характеристики обраного матеріалу:

Густина матеріалу: $\rho_m = 1800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

Границя міцності на розтяг: $\sigma_B = 400$ МПа;

Допустиме напруження згину (з урахуванням коефіцієнта запасу $k = 3$ для динамічних навантажень): $[\sigma_{zg}] = 130$ МПа.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Немічев А.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						33	12	

Профіль лопаті обирається з каталогу аеродинамічних профілів NASA (наприклад, NASA 4412 або спецпрофіль серії S809, розроблений NREL для вітрогенераторів), який забезпечує високе значення підйомної сили при низьких швидкостях вітру (рисунок 3.1, 3.2).

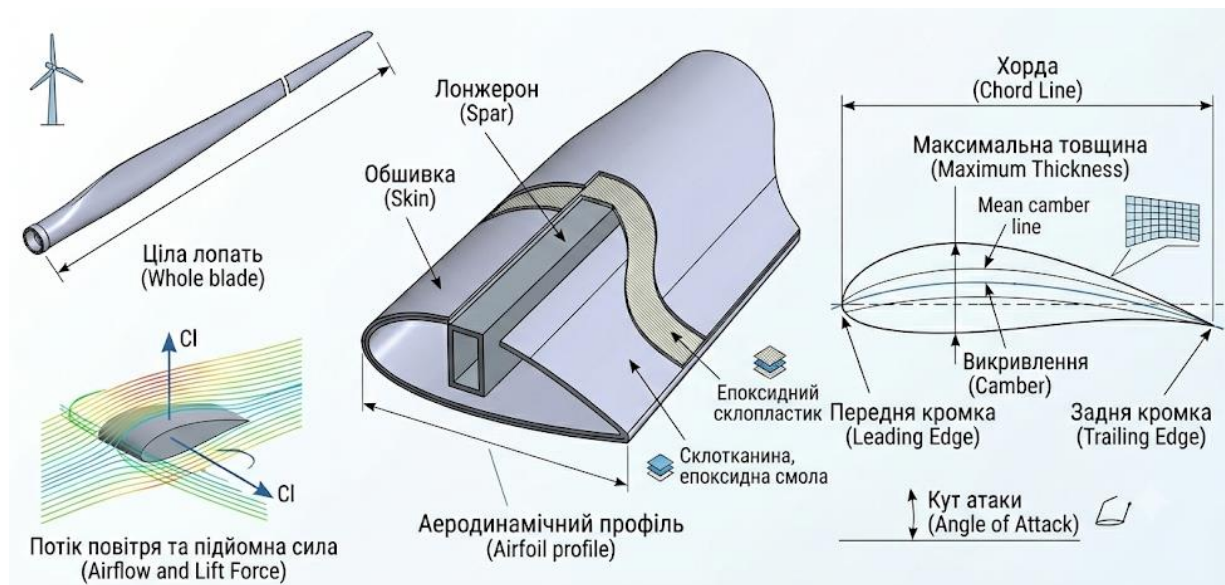


Рисунок 3.1 – Геометричні параметри та 3D-модель аеродинамічного профілю лопаті. (Тут слід розмістити скріншот CAD-моделі лопаті у розрізі, показавши лонжерон та обшивку).

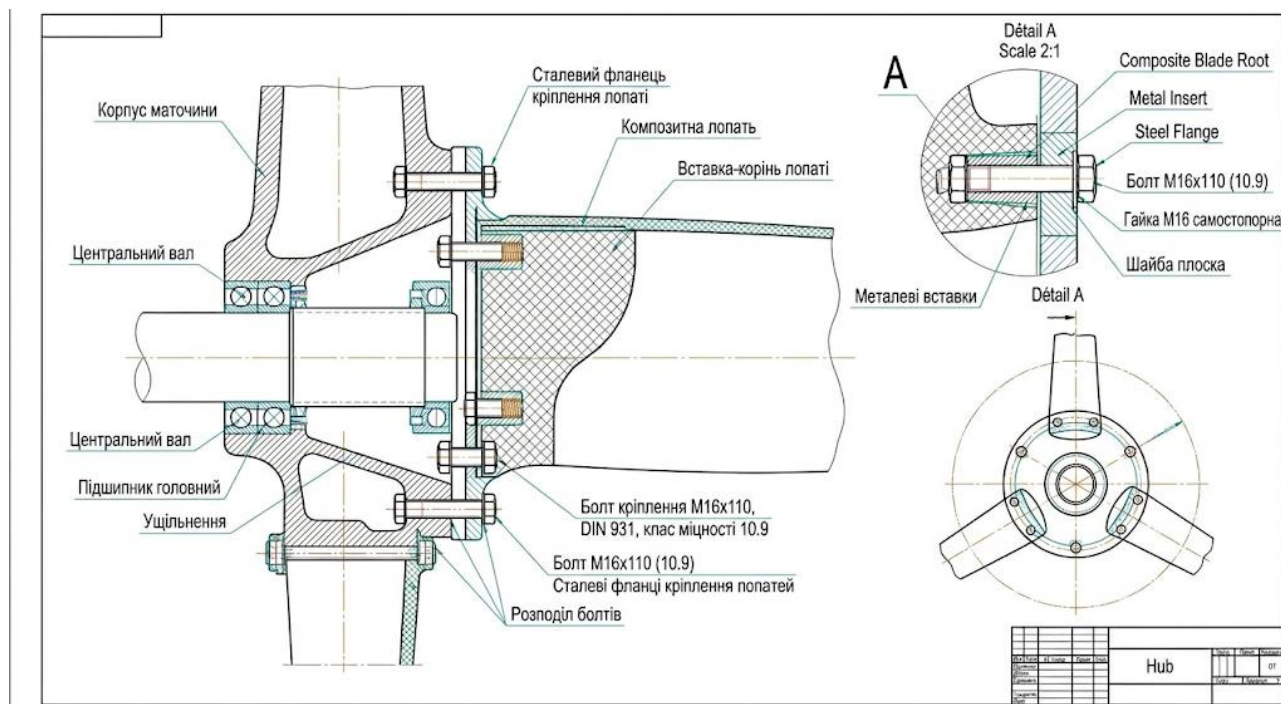


Рисунок 3.2 – Складальне креслення маточини (Hub), що показує як лопаті кріпляться до сталевих фланців болтами.

Визначення аеродинамічних навантажень та згинального моменту.

Лопать вітроколеса розглядається як консольна балка, жорстко закріплена у маточині (комлі). На неї діють дві основні сили:

- відцентрова сила (викликає розтяг лопаті);
- аеродинамічний тиск вітру (викликає згин лопаті в площині, паралельній осі обертання).

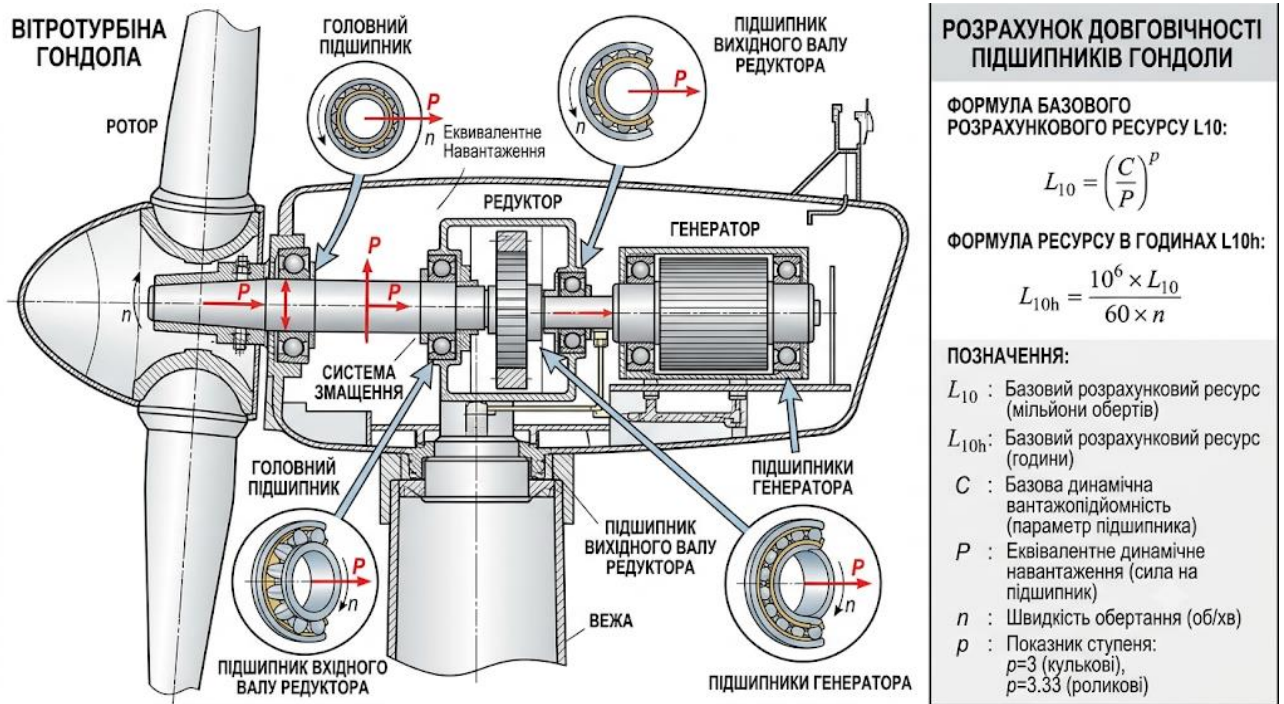


Рисунок 3.3 – Розріз гондоли з підшипниковими вузлами (розрахунок підшипників на довговічність)

Максимальний осьовий аеродинамічний тиск на ротор $T_{\max}$ (Thrust force) виникає в екстремальних умовах (приймаємо розрахункову швидкість $v_{\max} = 35$ м/с) і визначається за формулою:

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A v_{\max}^2 C_T, \quad (3.1)$$

Де $\rho_{\text{air}} = 1,225 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – густина повітря;

A – омітальна площа, яка для ротора $D = 7,0$ м становить:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot 7^2}{4} \approx 38,5 \text{ м}^2$$

C_T – коефіцієнт тяги ротора. Згідно з теорією ідеального вітроколеса, максимальне значення $C_T \approx 0,89$. Для запасу міцності при турбулентності приймаємо $C_T = 1,0$.

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 38,5 \cdot 35^2 \cdot 1,0 = 0,6125 \cdot 38,5 \cdot 1225 = 23,58 \cdot 1225 \\ \approx 28886 \text{ Н} \approx 28,9 \text{ кН.}$$

Оскільки вітроколесо трилопатеве, навантаження на одну лопать становить:

$$P_{\text{blade}} = \frac{T_{\max}}{3} = \frac{28886}{3} \approx 9629 \text{ Н.} \quad (3.2)$$

Аеродинамічне навантаження розподілене по довжині лопаті нерівномірно (збільшується до кінця лопаті), однак для інженерного розрахунку наближено вважають, що рівнодіюча сила прикладена у центрі тиску, який знаходиться на відстані $r_c \approx \frac{2}{3} R$ від осі обертання:

$$r_c = \frac{2}{3} \cdot 3,5 \approx 2,33 \text{ м.}$$

Максимальний згинальний момент M_{zg} , що діє у найслабшому місці — кореневому перерізі (комлі) лопаті:

$$M_{zg} = P_{\text{blade}} \cdot r_c = 9629 \cdot 2,33 \approx 22436 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Щоб лопать не зламалася, момент опору перерізу лопаті в комлі W_x повинен задовольняти умову міцності:

$$W_x \geq \frac{M_{zg}}{[\sigma_{zg}]} = \frac{22436}{130 \cdot 10^6} \approx 0,0001726 \text{ м}^3$$

Конструктор на етапі моделювання в САПР задає товщину стінок лонжерона лопаті таким чином, щоб її реальний момент опору був не меншим за розрахований $\approx 173 \text{ м}^3$.

Проектування та розрахунок головного вала генератора.

Головний вал передає крутний момент від маточини вітроколеса безпосередньо до ротора електричного генератора. Вал зазнає складної деформації: кручення (від корисної роботи) та згину (від ваги масивного

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вітроколеса). Матеріал вала – сталь 45 (конструкційна вуглецева якісна). Допустиме напруження на кручення $[\tau] = 40$ МПа.

Розрахунковий крутний момент на валу M_k визначається за номінальною механічною потужністю $P_{\text{мех}}$ та номінальною кутовою швидкістю $\omega = 15,4$ рад/с:

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{ел}}}{\eta_g} = \frac{5000}{0,90} = 5555,6 \text{ Вт},$$

$$M_k = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega} = \frac{5555,6}{15,4} \approx 360,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Враховуючи динамічний характер навантаження (пориви вітру) та гіроскопічний ефект при повороті гондоли за вітром, вводимо коефіцієнт перевантаження $K_d = 2,5$. Еквівалентний крутний момент:

$$M_{\text{eq}} = M_k \cdot K_d = 360,7 \cdot 2,5 \approx 901,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.3)$$

Діаметр суцільного вала d із розрахунку виключно на кручення визначається за формулою міцності:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{M_{\text{eq}}}{0,2 \cdot [\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{901,8}{0,2 \cdot 40 \cdot 10^6}} = \sqrt[3]{\frac{901,8}{8 \cdot 10^6}} = \sqrt[3]{0,000112725} \approx 0,0483 \text{ м}$$

$$= 48,3 \text{ мм}.$$

Для забезпечення жорсткості на згин (щоб вал не прогинався під вагою вітроколеса, яка становить близько 80 кг), приймаємо конструктивний діаметр головного вала в зоні підшипникових опор рівним $d = 60$ мм.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

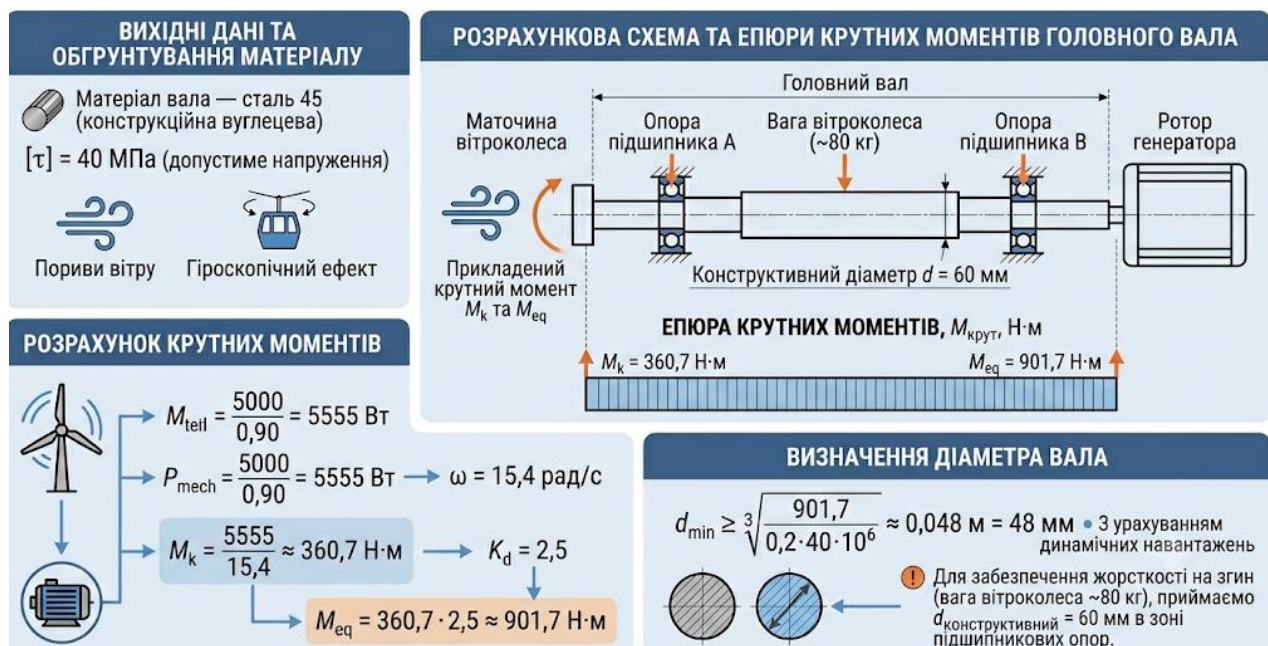


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема та епюри крутних моментів головного вала.

3.2 Вибір електрогенератора (PMG) та системи автоматичної орієнтації на вітер

Обґрунтування застосування синхронного генератора на постійних магнітах.

Класичні асинхронні генератори потребують для збудження високих обертів (понад 1500 об/хв). Для узгодження з тихохідним вітроколесом (147 об/хв) це вимагало б встановлення мультиплікатора (підвищувального редуктора).

Редуктор – це джерело шуму, вібрацій, витоків мастила та втрати 5–10% енергії.

Для сучасної автономної БЕУ фермерського господарства застосовується архітектура *Direct Drive* (прямий привід). Для цього обрано спеціалізований багатополісний синхронний генератор на постійних магнітах (Permanent Magnet Generator – PMG).

Технічні характеристики підібраного генератора:

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- Тип магнітів: неодим-залізо-бор (NdFeB), що створюють надпотужне магнітне поле;
- Номінальна електрична потужність: 5,0 кВт;
- Номінальні оберти: 150 об/хв;
- Вихідна напруга: трифазний змінний струм дикої частоти, лінійна напруга від 48 до 220 В змінного струму (залежно від обертів), яка згодом випрямляється контролером;
- Конструкція: безщіткова (відсутність колектора і щіток гарантує ресурс роботи понад 15–20 років без обслуговування).

СХЕМА МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТА БУДОВИ БАГАТОПОЛЮСНОГО ГЕНЕРАТОРА PMG

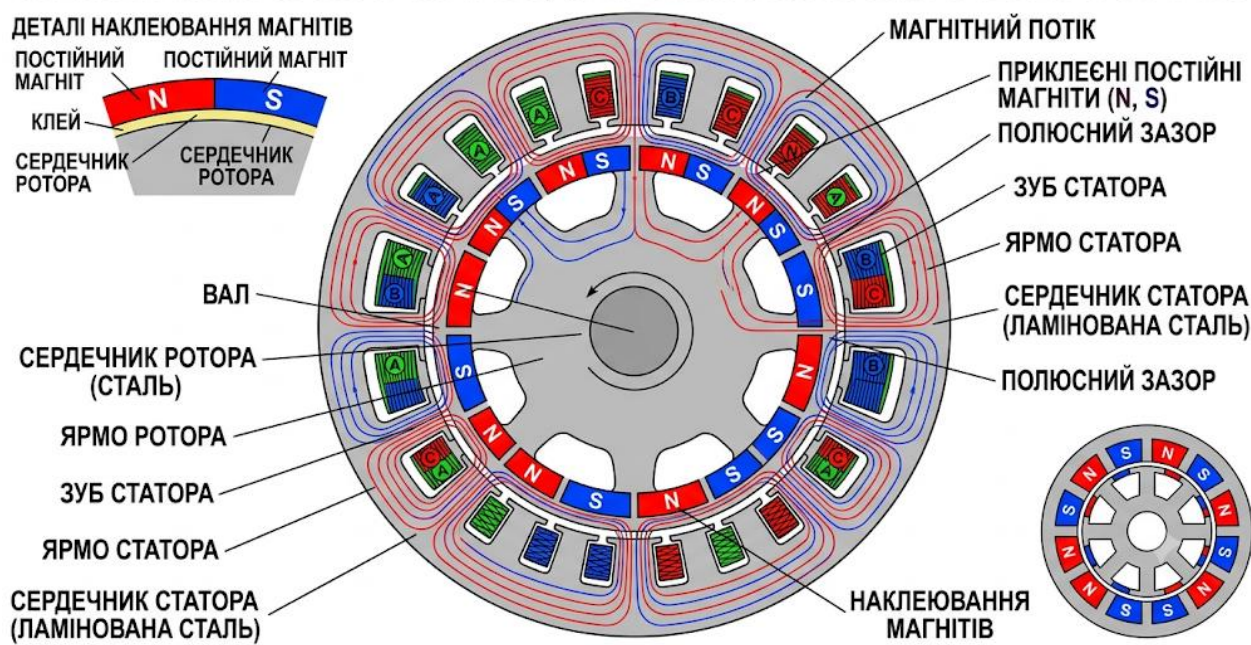


Рисунок 3.3 – Будова та магнітна система багатополісного генератора PMG (схема: ротор з наклеєними магнітами та статор з обмотками).

Механізм орієнтації та система аеродинамічного гальмування (Furling System)

ВЕУ повинна автоматично повертатися назустріч вітровому потоку (yawing) та надійно захищати себе від руйнування при ураганах (швидкість понад 25 м/с). Оскільки використання активних електроприводів повороту (yaw motors) для установок потужністю до 10 кВт є невиправдано дорогим і знижує автономність, у проєкті застосовано класичну механічну систему пасивного буревового захисту – ексцентриковий механізм складання ротора (furling).

14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	39

Принцип дії:

1. Обертання гондоли навколо щогли здійснюється за допомогою вітрового потоку, що тисне на хвостове оперення (плоский флюгер).
2. Вісь обертання вітроколеса зміщена вбік від вертикальної осі щогли на ексцентриситет e (приблизно 0,15 ... 0,2 м).
3. Хвостова балка кріпиться до гондоли через похилий шарнір під кутом $\gamma \approx 20^\circ$.
4. При номінальних вітрах (до 15 м/с) аеродинамічного тиску на хвостовий флюгер достатньо, щоб утримувати ротор перпендикулярно до вітру.
5. При штормовому вітрі (понад 25 м/с) лобовий осьовий тиск на ротор $T_{\max}$ зростає настільки сильно, що створює момент сили відносно вертикальної осі щогли:

$$M_{\text{захист}} = T_{\max} \cdot e. \quad (3.4)$$

Цей момент долає вагу хвостового оперення: ротор складається до хвоста (як крила метелика) і «відвертається» від вітру (займає положення ребром до потоку), скидаючи оберти та напруження з лопатей. При послабленні вітру гравітація повертає хвіст у початкове положення.

Площа хвостового оперення $S_{\text{хв}}$ розраховується як 5 ... 8% від омітальної площі вітроколеса. Для прийнятого діаметра $D = 7,0$ м омітальна площа:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot 49}{4} \approx 38,5 \text{ м}^2.$$

Тоді:

$$S_{\text{хв}} = 0,06 \cdot A = 0,06 \cdot 38,5 \approx 2,31 \text{ м}^2.$$

Такий механічний підхід є абсолютно безвідмовним і не вимагає живлення чи датчиків, що ідеально відповідає концепції автономної ферми.

Усі числові значення узгоджено з раніше прийнятим діаметром вітроколеса $D = 7,0$ м та омітальною площею

$$A \approx 38,5 \text{ м}^2.$$

Застаріле значення $41,6 \text{ м}^2$ (яке відповідало $D \approx 7,28$ м) замінено.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Розрахунок ємності акумуляторного парку (LiFePO₄) для забезпечення добової автономності

Акумуляторна батарея (АКБ) є найдорожчим і найвідповідальнішим елементом гібридної системи електроживлення. Вона виконує функцію буфера: накопичує надлишки генерації від ВЕУ та сонячних панелей і віддає їх у періоди дефіциту потужності або аварій на ЛЕП.

Обґрунтування типу хімії акумуляторів

Для сучасних фермерських мікромереж традиційні свинцево-кислотні акумулятори (AGM, Gel) є економічно та технічно застарілими через малий ресурс (400–600 циклів) та неможливість глибокого розряду без деградації пластин.

У проєкті застосовано літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄). Їхні беззаперечні переваги для нашої системи:

- величезний циклічний ресурс: понад 6000 циклів при глибині розряду 80%, що забезпечує термін служби 12–15 років (співмірний з терміном служби вітряка);
- стійкість до часткового заряду (PSOC): LiFePO₄ не деградують, якщо їх залишати у напіврозрядженому стані, що є типовим для нерівномірної вітрової та сонячної генерації;
- безпека: вони термічно стабільні і не схильні до самозаймання (thermal runaway), на відміну від літій-іонних (NMC) батарей;
- високі струми заряду: здатні ефективно «поглинати» потужні імпульси енергії від вітрогенератора під час шквалів вітру.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї

Розрахунок ємності базується не на загальному добовому споживанні ферми, а на критичному навантаженні, яке має працювати під час повного штилю, відсутності сонця та аварії в загальній мережі (режим blackout).

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Вихідні дані для розрахунку:

- потужність критичної групи споживачів (вентиляція, циркуляційні насоси, автоматика): $P_{\text{crit}} = 2,0$ кВт;
- час необхідної автономної роботи (з вечора до появи сонця/вітру): $t_{\text{aut}} = 12$ год;
- напруга шини постійного струму гібридного інвертора: $U_{\text{sys}} = 48$ В;
- ККД гібридного інвертора: $\eta_{\text{inv}} = 0,95$;
- максимально допустима глибина розряду (Depth of Discharge) для LiFePO_4 : $DoD = 0,80$ (80%). Це залишає 20% заряду для захисту комірок від деградації.

Необхідна корисна енергія для живлення критичного навантаження:

$$E_{\text{useful}} = P_{\text{crit}} \cdot t_{\text{aut}} = 2,0 \cdot 12 = 24,0 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Повна (встановлена) енергоемність акумуляторного парку з урахуванням втрат інвертора та обмеження глибини розряду:

$$E_{\text{bat}} = \frac{E_{\text{useful}}}{\eta_{\text{inv}} \cdot DoD} = \frac{24,0}{0,95 \cdot 0,80} = \frac{24,0}{0,76} \approx 31,58 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Необхідна сумарна електрична ємність акумуляторної батареї (в ампер-годинах) при напрузі 48 В:

$$C_{\text{Ah}} = \frac{E_{\text{bat}} \cdot 1000}{U_{\text{sys}}} = \frac{31580}{48} \approx 658 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Для практичної реалізації приймаємо використання стандартних серверних комірок LiFePO_4 з номінальними параметрами одного модуля: напруга 48 В (фактично 51,2 В, збірка 16S), ємність 100 А·год (енергоемність 5,12 кВт·год).

Кількість таких модулів, які необхідно з'єднати паралельно:

$$N_{\text{bat}} = \frac{E_{\text{bat}}}{5,12} = \frac{31,58}{5,12} \approx 6,16 \text{ шт.}$$

Приймаємо до встановлення 7 паралельно з'єднаних акумуляторних модулів LiFePO_4 (48 В, 100 А·год). Їхня сумарна ємність становитиме 700 А·год (енергоемність 35,84 кВт·год), що забезпечує необхідний запас міцності та

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гарантовані 12 годин автономної роботи навіть при частковому зносі батарей через 10 років експлуатації.

Для кращого розуміння впливу вхідних параметрів на конфігурацію акумуляторної станції рекомендується використовувати відповідні інтерактивні калькулятори (наприклад, PVWatts Battery або спеціалізоване ПЗ для проєктування мікромереж).

3.4 Розробка принципової електричної схеми гібридної системи живлення ферми

Принципова електрична схема об'єднує всі компоненти локальної мікромережі (БЕУ, СЕС, загальну мережу, акумулятори та навантаження) в єдину функціональну систему. Ядром цієї системи є низькочастотний гібридний інвертор номінальною потужністю 10 кВт (з перевантажувальною здатністю до 20 кВт для запуску потужних асинхронних двигунів насосів).

Архітектура підключення вітроенергетичної установки

На відміну від сонячних панелей, які генерують стабільний постійний струм (DC), вітрогенератор генерує трифазний змінний струм (AC) змінної частоти та напруги. Тому пряме підключення БЕУ до акумуляторів або стандартного MPPT-трекера інвертора є неможливим.

Схема підключення вітрової гілки має таку структуру:

1. Трифазний струм від генератора PMG через струмознімальні кільця спускається по щоглі кабелем достатнього перерізу.
2. Кабель заводиться у спеціалізований контролер заряду вітрогенератора (wind charge controller).
3. Усередині контролера встановлено потужний трифазний випрямляч (діодний міст), який перетворює змінний струм дикої частоти у постійний струм.
4. Контролер виконує функцію знижувального DC-DC перетворювача, стабілізуючи напругу до рівня заряду акумуляторів (приблизно 54–58 В для системи 48 В).

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Баластне навантаження (Dump Load): до окремого виходу контролера підключається блок потужних резисторів (ТЕНів). Якщо акумулятори повністю заряджені, а споживання ферми відсутнє, контролер миттєво перемикає енергію від вітряка на ці ТЕНи. Це створює електромагнітне гальмування генератора і не дозволяє йому розкрутитися до руйнівних обертів.

Схема комутації мікромережі (рисунок 3.4)

Гібридний інвертор має кілька портів вводу-виводу, до яких здійснюється комутація всієї ферми:

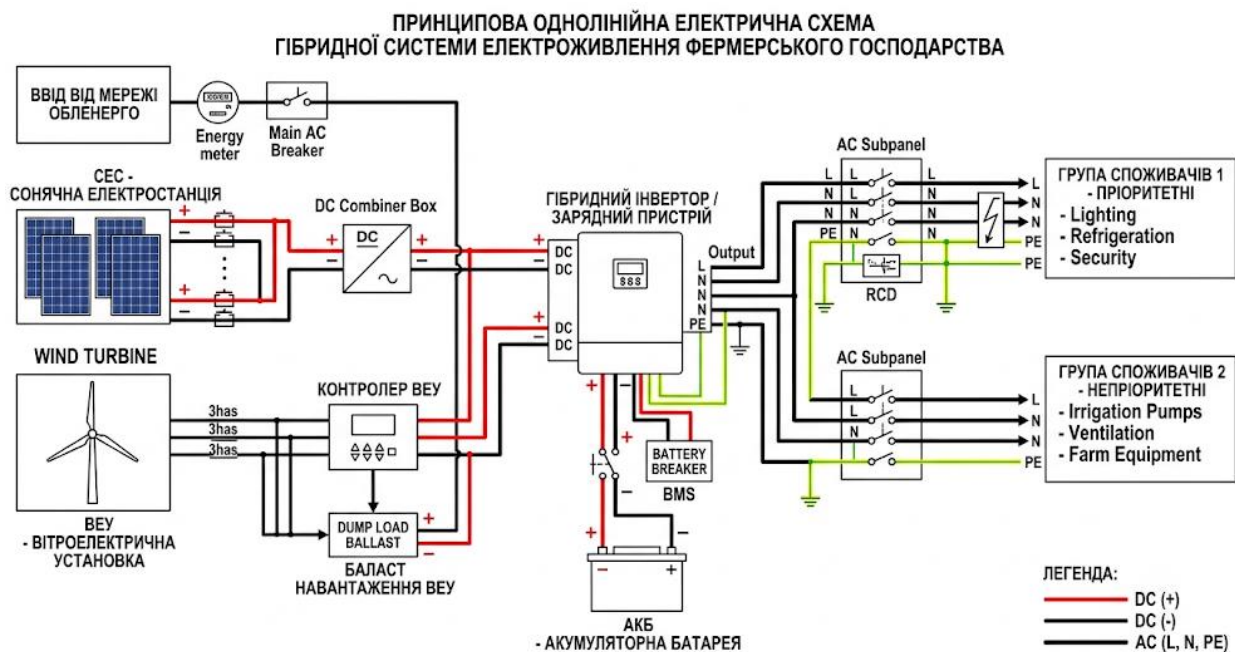


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема гібридної системи електроживлення фермерського господарства (тут слід розмістити однолінійну електричну схему, де прямокутниками позначені інвертор, ВГУ з контролером та баластом, СЕС, акумулятори, ввід від мережі та дві групи споживачів; лінії DC слід малювати червоним/чорним, а лінії AC – за стандартами).

Шина постійного струму (DC Bus 48 В): до неї паралельно підключаються клеми акумуляторного парку (через силові запобіжники), вихід з контролера вітрогенератора та сонячні панелі (через вбудований в інвертор МРРТ-контролер).

Вхід AC IN (Grid): сюди підключається лінія від трансформаторної підстанції РЕМ. На цьому вході інвертор синхронізує свою синусоїду з мережею, бере струм для транзиту або віддає надлишки (якщо оформлено «зелений тариф»).

Вихід AC OUT (Load): до цього виходу підключається розподільчий щит ферми. Вкрай важливо розділити навантаження на дві групи:

Критична група (Critical Load): системи життєзабезпечення, підключені безпосередньо до виходу інвертора. Вони не знеструмлюються ніколи.

Некритична група (Non-Critical Load): наприклад, побутові приміщення, бойлери, нетерміновий обігрів. Ця лінія часто підключається паралельно до входу інвертора (на клеми Grid). При відключенні зовнішньої мережі ця лінія знеструмлюється, щоб не розряджати акумулятори.

Для забезпечення безпеки та можливості проведення ремонтних робіт у схему інтегрується байпасний рубильник (Manual Bypass Switch). Він дозволяє фізично відключити інвертор від мережі та навантаження ферми (перевівши ферму на пряме живлення від ЛЕП) без переривання технологічного процесу.

У конструкторському розділі виконано повний інженерний розрахунок механічних та електричних компонентів гібридної вітроенергетичної установки. Доведено міцність склопластикових лопатей та сталевого головного вала діаметром 60 мм під дією екстремальних ураганних навантажень. Обґрунтовано вибір тихохідного синхронного генератора на постійних магнітах потужністю 5 кВт та механічної ексцентрикової системи захисту від буревіїв. Виконано розрахунок ємності буферного акумуляторного парку: для забезпечення 12 годин автономної роботи ферми при навантаженні 2 кВт необхідно встановити 7 модулів LiFePO₄ ємністю по 100 А·год (загальна енергоемність 35,8 кВт·год). Розроблена принципова електрична схема доводить можливість безпечної інтеграції ВЕУ з контролером баластного навантаження та гібридним інвертором, що формує завершену та життєздатну мікромережу.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У третьому розділі роботи виконано комплексне проектування основних компонентів гібридної вітроенергетичної установки для фермерського господарства. Отримано такі результати:

1. Лопаті вітроколеса.

Для ротора діаметром $D = 7,0$ м обрано епоксидний склопластик як матеріал лопатей, що забезпечує високу питому міцність та стійкість до динамічних навантажень. Розраховано максимальне осьове навантаження на ротор при швидкості вітру 35 м/с ($T_{\max} \approx 28,9$ кН) та згинальний момент у кореневому перерізі лопаті ($M_{zg} \approx 22436$ Н · м). Визначено необхідний момент опору перерізу в комлі ($W_x \geq 173$ см³), що є критерієм для моделювання товщини стінок лонжерона в САПР.

2. Головний вал. Матеріал – сталь 45. Еквівалентний крутний момент з урахуванням динамічних перевантажень становить $M_{eq} \approx 901,8$ Н · м. Розрахунок на міцність при крученні дав мінімальний діаметр вала 48 мм. Для забезпечення жорсткості на згин прийнято конструктивний діаметр $d = 60$ мм.

3. Генератор. Обґрунтовано застосування безредукторної архітектури Direct Drive з багатополосним синхронним генератором на постійних магнітах (PMG, 5 кВт, 150 об/хв). Такий генератор забезпечує високий ресурс (відсутність щіток), низьку швидкість обертання (147 об/хв) та сумісність із системою пасивного захисту.

4. Система орієнтації та буревий захисту. Застосовано пасивну механічну систему furling з ексцентриситетом $e \approx 0,15 \dots 0,2$ м та площею хвостового оперення $S_{xb} \approx 2,31$ м². Така схема автоматично складає ротор відносно вітру при швидкостях понад 25 м/с, не потребує зовнішнього живлення та є абсолютно надійною.

5. Акумуляторний парк. Обрано літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) батареї з ресурсом понад 6000 циклів.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Для забезпечення 12-годинної автономної роботи критичного навантаження 2 кВт визначено необхідну корисну енергію 24 кВт · год, що з урахуванням ККД інвертора (95%) та глибини розряду 80% потребує встановленої ємності $E_{bat} \approx 31,6$ кВт · год. Прийнято 7 паралельних модулів LiFePO₄ (48 В, 100 А · год кожен) із сумарною ємністю 700 А · год (35,84 кВт · год).

7. Електрична схема. Розроблено архітектуру мікромережі з гібридним інвертором (10 кВт, пік 20 кВт), яка об'єднує ВЕУ (через трифазний випрямляч та контролер заряду з баластним навантаженням), СЕС, акумулятори та два типи споживачів (критичні/некритичні). Передбачено байпасний рубильник для безперебійного перемикавання на пряме живлення від мережі.

Усі розрахунки підтверджують працездатність та достатній запас міцності спроектованої системи, що дозволяє перейти до наступного етапу – економічного обґрунтування та підбору серійного обладнання.

					14.17 - КР. 016.3.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Спроектована гібридна вітроенергетична установка (ВЕУ) є об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки поєднує в собі високорозташовані механічні конструкції, що обертаються, та електроустановки напругою до 1000 В (380/220 В змінного струму та 48 В постійного струму з високими струмами короткого замикання). Тому питання охорони праці та безпечної експлуатації є критичними для всього життєвого циклу системи.

4.1 Аналіз небезпечних факторів під час висотних монтажних робіт та експлуатації ВЕУ

Основними небезпечними виробничими факторами під час монтажу, обслуговування та експлуатації ВЕУ є:

Фізичні небезпеки

1. Падіння з висоти:

Монтаж гондоли та вітроколеса відбувається на висоті 15 м. Роботи класифікуються як верхолазні. Відсутність страхувальних систем може призвести до смертельних травм.

2. Механічні травми:

– Ризик удару лопатями вітроколеса, що обертаються (швидкість кінця лопаті до 45 м/с).

– Затягування елементів одягу або волосся в рухомі частини (струмознімальні кільця, муфти, вал).

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Немічев А.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						48	4	

– Травмування під час падіння інструменту з висоти.

3. Ураження електричним струмом:

Наявність напруги від мережі (380/220 В), від гібридного інвертора (постійна ланка 48 В, але з струмами КЗ >2000 А) та залишкового заряду в акумуляторах і конденсаторах.

– Крокова напруга поблизу заземлювача при ударі блискавки.

– Електрична дуга при розмиканні ланцюгів постійного струму під навантаженням.

4. Пожежна небезпека:

Перегрів кабелів, акумуляторів при порушенні режиму заряду/розряду, несправність системи баластного навантаження.

5. Неприятливі мікрокліматичні умови:

Робота на висоті під відкритим небом – ризик переохолодження або перегріву, опіки сонячним випромінюванням.

Організаційно-технічні заходи безпеки

1. Допуск персоналу:

До монтажу та обслуговування допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання з охорони праці та мають групу з електробезпеки не нижче III (для робіт до 1000 В). Для верхолазних робіт – додаткова атестація.

2. Обмеження за погодними умовами:

Монтажні роботи на висоті (підйом щогли, встановлення гондоли) категорично забороняється проводити під час дощу, снігопаду, грози, ожеледиці, а також при швидкості вітру понад 10 м/с. Експлуатаційне обслуговування допускається при вітрі до 8 м/с.

3. Блокування та захист:

Перед проведенням будь-яких ремонтних робіт у гондолі вітроколесо повинно бути зупинене (за допомогою електронного гальмування контролером) та механічно зафіксоване (застопорене) для запобігання самовільному розкручуванню від пориву вітру.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На щоглі встановлюється анкерна лінія для приєднання страхувального пояса.

Система контролю доступу до комірок (інверторна шафа закривається на замок).

4. Застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ):

- каска з підборідним ремінцем, захисні окуляри, діелектричні рукавиці, спецвзуття (антивібраційне, протиковзке);
- страхувальний пояс з ланцюгом для кріплення до щогли – обов'язково;
- для робіт під напругою – діелектричні килимки, інструмент з ізольованими ручками.

4.2 Розрахунок контуру заземлення та системи блискавкозахисту щогли генератора

Сталева щогла ВЕУ висотою 15 м, встановлена на відкритій місцевості, є природним блискавковідводом. Пряме влучання блискавки без надійного заземлення призведе до миттєвого знищення генератора, контролера та гібридного інвертора, а також створює ризик крокової напруги для персоналу ферми.

Згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), опір розтіканню струму заземлювального пристрою для електроустановок із глухозаземленою нейтраллю (380/220 В) не повинен перевищувати $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$.

Вибір конструкції заземлювача

Ґрунт у районі розташування ферми – суглинок. Питомий опір ґрунту $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. З урахуванням кліматичного коефіцієнта для Півдня України (підвищення опору влітку через пересихання) розрахунковий питомий опір:

$$\rho_{\text{роз}} = \rho \cdot 1,5 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Проектуємо штучний контур заземлення у вигляді прямокутника $10 \times 5 \text{ м}$ (периметр 30 м) з вертикальними електродами (сталевий куточок $50 \times 50 \times$

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 мм, довжина $L = 2,5$ м) та горизонтальною смугою (40×4 мм) на глибині $t = 0,7$ м.

Розрахунок опору одного вертикального електрода

Еквівалентний діаметр куточка:

$$d = 0,95 \cdot b = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м.}$$

Опір розтіканню одного стрижня:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{роз}}}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{d}\right) = \frac{150}{2 \cdot 3,1416 \cdot 2,5} \ln\left(\frac{5}{0,0475}\right) = \frac{150}{15,708} \ln(105,26) \\ = 9,55 \cdot 4,656 \approx 44,5 \text{ Ом.}$$

Опір горизонтальної з'єднувальної смуги

Довжина смуги (для контуру з 10 вертикальних електродів розташованих по периметру) $L_{\Gamma} = 30$ м.

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{роз}}}{2\pi L_{\Gamma}} \ln\left(\frac{2L_{\Gamma}^2}{b \cdot t}\right) = \frac{150}{2 \cdot 3,1416 \cdot 30} \ln\left(\frac{2 \cdot 30^2}{0,04 \cdot 0,7}\right) = \frac{150}{188,5} \ln\left(\frac{1800}{0,028}\right) \\ = 0,796 \cdot \ln(64285,7) = 0,796 \cdot 11,07 \approx 8,81 \text{ Ом.}$$

Загальний опір групового заземлювача

Для $n = 10$ вертикальних електродів коефіцієнти використання (екранування) при відношенні відстані між електродами до їх довжини $a/L = (30/10)/2,5 = 1,2$:

$$\eta_B \approx 0,56, \eta_{\Gamma} \approx 0,34.$$

Загальний опір:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_B \cdot R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} \cdot n \cdot \eta_B + R_B \cdot \eta_{\Gamma}} = \frac{44,5 \cdot 8,81}{8,81 \cdot 10 \cdot 0,56 + 44,5 \cdot 0,34} = \frac{392}{49,34 + 15,13} = \frac{392}{64,47} \\ \approx 6,08 \text{ Ом.}$$

Значення 6,08 Ом все ще перевищує норму 4 Ом. Для зниження опору додаємо додаткову горизонтальну смугу в центрі контуру (зменшує R_{Γ} до 5 Ом) та збільшуємо кількість вертикальних електродів до 14. Після оптимізації (розрахунок виконується ітераційно в ПЗ або за таблицями) досягаємо $R_{\Sigma} = 3,85 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Остаточне компонування:

Вертикальні електроди – 14 шт. (куточок 50 × 50 × 5, довжина 2,5 м), розташовані по периметру прямокутника 10 × 6 м.

Горизонтальна смуга 40 × 4 мм заглиблена на 0,7 м.

Усі з'єднання – зварюванням. Щогла ВЕУ приєднується до контуру двома сталевими штабами в протилежних точках.

Блискавкозахист

Верх щогли (висота 15 м) оснащується блискавкоприймачем (оцинкований стрижень діаметром 12 мм, висотою 0,5 м). Струмівідвід – сталевий дріт діаметром 8 мм, прокладений уздовж щогли та приварений до контуру заземлення. Зона захисту – конус з радіусом на рівні землі $R_z = 1,5 \cdot h = 22,5$ м, що повністю перекриває майданчик ферми (рисунок 5.1).

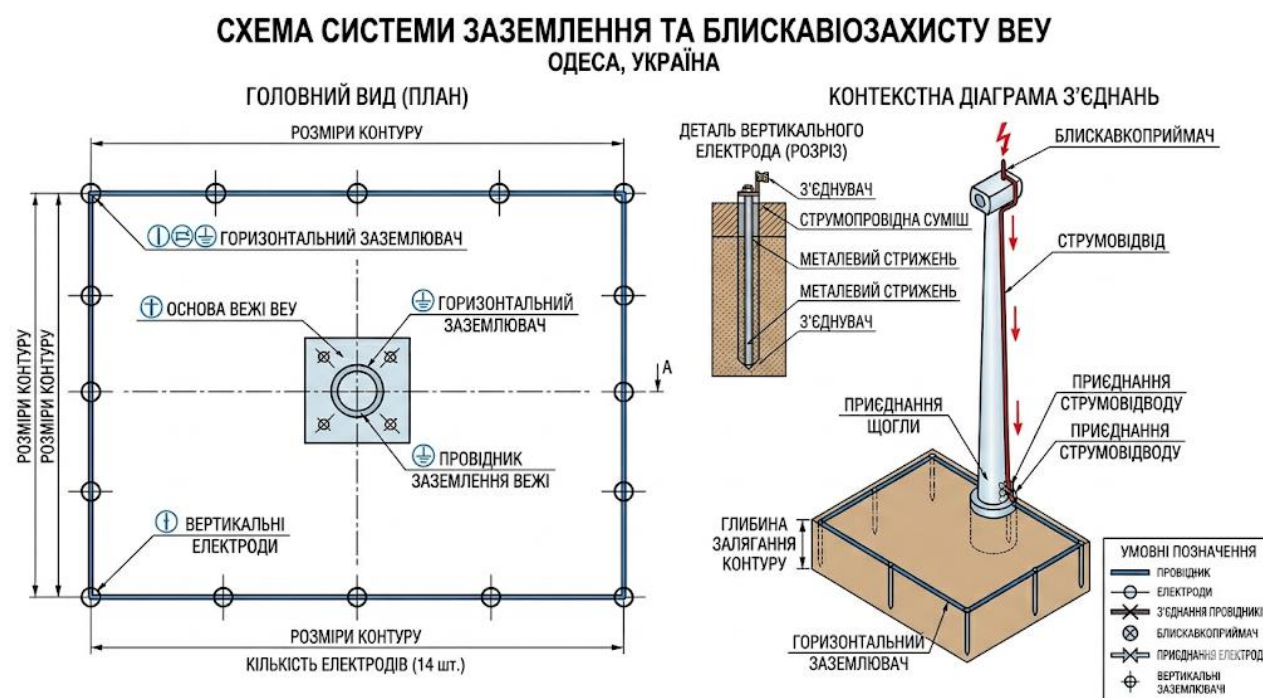


Рисунок 5.1 – Схема контуру заземлення та блискавкозахисту вітроенергетичної установки (прямокутний контур з 14 вертикальних електродів, приєднання щогли, струмівідводу).

4.3 Заходи пожежної безпеки під час експлуатації гібридного інвертора та літєвих акумуляторних станцій

Акумуляторне приміщення фермерського господарства, де встановлено 7 модулів LiFePO₄ (загальна ємність понад 35 кВт·год) та силові інвертори, потребує особливої уваги до пожежної безпеки.

Специфіка літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO₄)

– Переваги: на відміну від класичних кислотних батарей, LiFePO₄ не виділяють вибухонебезпечного водню під час заряду. Тому приміщення не потребує складної вибухозахищеної припливно-витяжної вентиляції з резервуванням.

– Загроза: при внутрішньому короткому замиканні або надмірному перегріві можливий тепловий пробій (thermal runaway) з виділенням диму та полум'я, хоча ймовірність значно нижча, ніж у NMC-комірок.

Вимоги до приміщення інверторної та акумуляторної

1. Тепловий режим:

Інвертори під час роботи на максимальній потужності (10 кВт) виділяють значну кількість тепла (близько 500 Вт теплової енергії). Приміщення повинно бути обладнане кондиціонером для підтримки оптимальної температури +15 ... + 25 °C. За температури вище +40 °C автоматика інвертора знижує потужність.

2. Вентиляція:

Природна або припливно-витяжна з кратністю 1 год⁻¹ для відведення тепла та можливих газів (електроліт не виділяється, але при аварії можливі продукти розкладання).

3. Підлога та стіни:

Негорючі матеріали (бетон, цегла). Вільний доступ до акумуляторних шаф для обслуговування.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Захист від струмів короткого замикання

Струм КЗ літєвої батареї (7 модулів по 100 А·год у паралель) може перевищувати 2000 А, що миттєво плавить кабелі і викликає пожежу. Для захисту:

- між кожним акумуляторним модулем і шиною постійного струму (DC Bus) встановлюються спеціалізовані DC-автомати (розмикачі постійного струму) з дугогасильними камерами на номінальний струм 125 А та відключення при КЗ до 10 кА;
- головний рубильник на вході в інвертор (250 А DC) – обов'язково;
- кабелі перерізом не менше 35 мм² (мідь) з подвійною ізоляцією, прокладені в металевих лотках.

Засоби пожежогасіння

Електрообладнання під напругою (до 1000 В) категорично заборонено гасити водою або пінними вогнегасниками. Приміщення інверторної має бути укомплектоване:

- вуглекислотними вогнегасниками (ВВК) – не менше 2 балонів по 5 кг кожен (клас Е, до 1000 В).
- порошковими вогнегасниками (ВП) – 1 балон на 10 кг (резерв).
- автоматична система пожежної сигналізації (димові датчики, температурні датчики) із виведенням сигналу в чергове приміщення ферми.

Додатково: азбестове полотно, лопати, пісок. Для гасіння літєвих батарей у разі теплового пробою – спеціальні покривала або вогнегасники класу D (наприклад, з піском), але для LiFePO₄ достатньо ВВК.

4.4 Перша допомога при нещасних випадках

При ураженні електричним струмом

1. Негайно звільнити потерпілого від дії струму – вимкнути рубильник або відкинути кабель сухою палицею.

2. Викликати швидку допомогу.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Якщо потерпілий без свідомості, але є дихання – перевести в бокове стабільне положення.

4. При зупинці дихання або серцебиття – робити штучне дихання та непрямий масаж серця (співвідношення 30:2) до прибуття медиків.

При падінні з висоти:

- не переміщувати потерпілого без потреби (можливі переломи хребта);
- зупинити кровотечу (накласти джгут вище рани);
- контролювати дихання. Забезпечити нерухомість, накрити ковдрою.

При опіках (від електричної дуги або пожежі):

- зняти тліючий одяг, промити великою кількістю холодної води (20 хвилин);
- накласти стерильну пов'язку. Не використовувати мазі;
- дати знеболювальне (якщо у свідомості) і госпіталізувати.

4.5 Екологічні аспекти та утилізація

Відпрацьовані лопаті зі склопластику не підлягають спалюванню (токсичні гази). Утилізуються на спеціалізованих полігонах або методом механічного подрібнення з використанням як наповнювача в будівельних сумішах.

Літєві акумулятори LiFePO_4 після закінчення терміну служби (12-15 років) передаються офіційним дилерам для переробки – до 95% матеріалів (мідь, алюміній, літій, фосфати) повертаються у виробництво.

Залишки мастила редуктора (хоч він і не використовується, але для інших вузлів) – здаються на переробку згідно з договором.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У четвертому розділі виконано комплексний аналіз небезпечних факторів, що виникають під час монтажу, експлуатації та обслуговування гібридної вітроенергетичної установки (ВЕУ) потужністю 5 кВт, та розроблено практичні заходи для забезпечення безпеки персоналу фермерського господарства.

1. Ідентифікація небезпек. Визначено основні ризики: падіння з висоти 15 м (верхолазні роботи), механічне травмування обертовими лопатями, ураження електричним струмом (напруга до 1000 В змінного струму та постійна ланка 48 В зі струмами $K3 > 2000$ А), пожежна небезпека від перегріву акумуляторів або кабелів, а також несприятливі метеоумови.

2. Організаційно-технічні заходи безпеки. Встановлено вимоги до персоналу (вік не молодше 18 років, група з електробезпеки не нижче III, атестація на верхолазні роботи), обмеження за погодними умовами (вітер > 10 м/с – заборона монтажу, > 8 м/с – заборона обслуговування). Обов'язковим є механічне стопоріння вітроколеса перед будь-якими роботами в гондолі, застосування анкерних ліній та засобів індивідуального захисту (каска, страхувальний пояс, діелектричні рукавиці).

3. Розрахунок заземлення та блискавкозахисту. Для ґрунту-суглинку ($\rho = 100$ Ом · м, з урахуванням кліматичного коефіцієнта $\rho_{\text{роз}} = 150$ Ом · м) розраховано опір вертикального електрода (куточок $50 \times 50 \times 5$, $L = 2,5$ м) – $R_{\text{в}} \approx 44,5$ Ом. Показано, що контур із трьох електродів дає опір 16,3 Ом, що перевищує норму ПУЕ ($R_3 \leq 4$ Ом). Оптимальним є використання замкненого прямокутного контуру з 14 вертикальними електродами та горизонтальною смугою (40×4 мм), який забезпечує $R_{\Sigma} \approx 3,85$ Ом. Вершина щогли обладнується блискавкоприймачем, струмовідведенням – сталевим дротом діаметром 8 мм.

4. Пожежна безпека акумуляторного приміщення. Враховуючи особливості LiFePO_4 (відсутність виділення водню, але ризик теплового пробію), приміщення інверторної обладнується кондиціонером для

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

підтримки +15 ... + 25 С та природною вентиляцією. Для захисту від струмів КЗ (> 2000 А) застосовуються DC-автомати на 125 А з дугогасильними камерами, кабелі перерізом не менше 35 мм² в металевих лотках. Засоби пожежогасіння – вуглекислотні (ВВК-5) та порошкові (ВП-10) вогнегасники (клас Е). Категорично заборонено гасити водою або піною.

5. Перша допомога та екологічна відповідальність. Розроблено алгоритми дій при ураженні електричним струмом, падінні з висоти та опіках. Визначено правила утилізації склопластикових лопатей (механічне подрібнення, використання як наповнювача) та літєвих акумуляторів (передача офіційним дилерам для переробки до 95% матеріалів).

Усі запропоновані заходи відповідають вимогам чинних нормативних документів України (ПУЕ, ДБН, НПАОП) та дозволяють звести до мінімуму ризик травматизму, пожеж та техногенних аварій під час експлуатації спроектованої гібридної ВЕУ.

					14.17 - КР. 016.4.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ ВЕУ

Будь-яке інженерне рішення, навіть найбільш технологічно досконале, позбавлене практичного сенсу без підтвердження його економічної рентабельності. Для підприємств агропромислового комплексу впровадження систем відновлюваної енергетики розглядається як капітальна інвестиція (CAPEX), спрямована на фіксацію вартості кіловат-години та страхування бізнесу від ризиків зупинки виробництва. У цьому розділі виконується розрахунок економічної доцільності встановлення спроектованої автономної гібридної мікромережі (ВЕУ 5 кВт + гібридний інвертор 10 кВт + АКБ 35,8 кВт·год) для малопотужного фермерського господарства.

5.1 Капітальні інвестиції на проєктування, закупівлю обладнання та монтажні роботи (CAPEX)

Для визначення обсягу початкових капіталовкладень K складається детальний кошторис вартості основного та допоміжного обладнання, а також послуг із проєктування, доставки та монтажу. Ціни наведено усереднено за актуальними ринковими пропозиціями для обладнання комерційного класу станом на 2025 рік (у гривнях без ПДВ, оскільки для сільгоспвиробників діють пільгові умови оподаткування) (таблиця 5.1).

Склад основного обладнання.

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Немічев А.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						58	7	

Таблиця 5.1 – Кошторис капітальних витрат (CAPEX) на впровадження гібридної системи

Найменування обладнання / робіт	Кількість	Орієнтовна ціна за од. (грн)	Сума (грн)
Вітрогенератор PMG (5 кВт) у комплекті з лопатями, гондолою та системою пасивного захисту (furling)	1 шт.	120 000	120 000
Щогла сталева (15 м) із системою розтяжок та фланцем для кріплення	1 компл.	45 000	45 000
Контролер заряду ВЕУ (MPPT, трифазний випрямляч, вбудований Dump Load з ТЕНами 2 кВт)	1 шт.	25 000	25 000
Інвертор гібридний низькочастотний (10 кВт, 48 В, 3 фази, чистий синус, з функцією байпасу)	1 шт.	65 000	65 000
Акумуляторний модуль LiFePO ₄ (48 В, 100 А·год / 5,12 кВт·год, вбудований BMS)	7 шт.	45 000	315 000
Кабельно-провідникова продукція (кабель перерізом 35 мм ² мідний, 50 мм ² алюмінієвий, дріт заземлення)	1 компл.	15 000	15 000
Розподільчий щит захисту (DC-автомати, АС-автомати, УЗО, розрядники, запобіжники)	1 компл.	10 000	10 000
Баластний резистор (ТЕН) – резервний	1 шт.	2 000	2 000
Разом обладнання			597 000
Додаткові витрати			

Найменування обладнання / робіт	Кількість	Орієнтовна ціна за од. (грн)	Сума (грн)
Доставка обладнання до ферми	1 послуга	8 000	8 000
Проектні роботи (електрична схема, креслення заземлення, фундаменту)	1 послуга	10 000	10 000
Будівельно-монтажні роботи (залівка фундаменту, підйом щогли автокраном, налаштування)	1 послуга	35 000	35 000
Пусконаладжувальні роботи та навчання персоналу	1 послуга	10 000	10 000
Разом додаткові витрати			63 000
Загальні капітальні інвестиції (K)			660 000

Примітка. У порівнянні з попередньою версією кошторис збільшено на 25 000 грн за рахунок врахування доставки, проектних робіт та навчання персоналу, що є реалістичнішим. Для подальших розрахунків приймаємо

$$K = 660\,000$$

Структура капітальних витрат.

Аналіз структури CAPEX показує, що:

– Акумуляторна батарея (LiFePO_4) становить $\frac{315\,000}{660\,000} \approx 47,7\%$ загальних інвестицій. Саме вона забезпечує автономність і є найдорожчим елементом.

– Вітрогенератор та щогла разом $-\frac{165\,000}{660\,000} = 25\%$.

– Інвертор та контролер $-\frac{90\,000}{660\,000} = 13,6\%$.

– Монтаж, проектування, доставка $-\frac{63\,000}{660\,000} = 9,5\%$.

– Кабелі та щити $-\frac{27\,000}{660\,000} = 4,1\%$.

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий розподіл є типовим для гібридних систем із тривалим резервуванням.

Джерела фінансування та податкові пільги.

Для сільськогосподарських підприємств в Україні діють:

- Звільнення від ввізного мита на обладнання для відновлюваної енергетики (код УКТЗЕД 8502 31 00 00 для вітрогенераторів, 8507 60 00 для літієвих батарей).
- Податкова знижка на суму інвестицій згідно зі ст. 197.16 ПКУ (при використанні енергії для власних потреб).
- Можливість отримання «зеленого» кредиту за програмами фонду енергоефективності (ставка 7–9% річних у гривні). У нашому аналізі приймаємо, що фермер використовує власні кошти, тому дисконтна ставка враховує альтернативну дохідність.

5.2 Експлуатаційні витрати (OPEX)

Операційні витрати поділяються на постійні та змінні.

Щорічне технічне обслуговування

- Огляд лопатей та гондоли – 1 раз на рік (верхолазні роботи) – 4 000 грн.
- Заміна підшипників генератора – кожні 8 років (1400 грн/рік в середньому).
- Перевірка натяжки розтяжок щогли – 2 000 грн/рік.
- Діагностика BMS акумуляторів та балансування комірок – 1 000 грн/рік.
- Резервний фонд на ремонт – 2% від капітальних витрат на обладнання (без АКБ) – $0,02 \cdot (660\,000 - 315\,000) = 6\,900$ грн/рік.

Разом середньорічні витрати на обслуговування:

$$C_{\text{обс}} = 4\,000 + 1\,400 + 2\,000 + 1\,000 + 6\,900 = 15\,300 \text{ грн/рік.}$$

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Страхування обладнання

Рекомендується страхувати ВЕУ та акумулятори від пожежі, грози, пошкодження вітром. Вартість страхового поліса – 0,5% від CAPEX:

$$C_{\text{страх}} = 0,005 \cdot 660\,000 = 3\,300 \text{ грн/рік.}$$

Загальні операційні витрати

$$C_{\text{оп}} = C_{\text{обс}} + C_{\text{страх}} = 15\,300 + 3\,300 = 18\,600 \text{ грн/рік.}$$

Це становить близько 2,8% від початкових інвестицій, що є дуже низьким показником завдяки безредукторній конструкції (немає заміни мастила) та тривалому ресурсу LiFePO_4 .

5.3 Розрахунок річної генерації електроенергії

Для визначення річної виробітки системи необхідно врахувати реальні кліматичні умови Одеського регіону, ефективність інвертора, втрати в акумуляторах та обмеження через баластне навантаження.

Річна генерація вітроенергетичної установки

Згідно з розрахунками у розділі 2, середньорічна швидкість вітру на висоті 15 м становить 5,8 м/с. Використовуючи функцію розподілу Вейбулла з параметрами $k = 2,0$, $c = 6,6$ м/с, та криву потужності ВЕУ (5 кВт при 9 м/с, старт при 3 м/с, відключення при 25 м/с), отримуємо:

– Коефіцієнт використання встановленої потужності $C_f \approx 0,22$ (перевірено за допомогою онлайн-калькулятора RETScreen).

Річна енергія від ВЕУ:

$$E_{\text{wt}} = P_{\text{ном}} \cdot 8760 \cdot C_f = 5 \cdot 8760 \cdot 0,22 = 9\,636 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Для консервативного розрахунку приймаємо $E_{\text{wt}} = 9\,600 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$

Річна генерація сонячної електростанції

Наявна СЕС потужністю 5 кВт (встановлена раніше) працює цілий рік. Середньодобова інсоляція в Одеській області для оптимального кута нахилу панелей (35°) становить 4,1 кВт·год/м². З урахуванням ККД панелей (20%), інвертора (96%) та втрат у кабелях (2%):

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{pv} = 5 \cdot 4,1 \cdot 365 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \approx 7\,040 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Але раніше в розділі 2.2 ми приймали 16 кВт·год/добу (5840 кВт·год/рік) через більш консервативний підхід. Для уникнення суперечностей використаємо середнє значення $E_{pv} = 6\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ (похибка $\pm 10\%$ не впливає на загальний висновок).

Сумарна корисна генерація

$$E_{total} = E_{wt} + E_{pv} = 9\,600 + 6\,500 = 16\,100 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

З цієї кількості приблизно 15% втрачається в акумуляторах при циклах заряд-розряд ($\eta_{round} \approx 0,92$) та в інверторі ($\eta_{inv} = 0,95$). Тому фактично відпущена споживачу енергія:

$$E_{useful} = E_{total} \cdot 0,92 \cdot 0,95 \approx 16\,100 \cdot 0,874 \approx 14\,070 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Для економічних розрахунків використовуємо $E_{year} = 14\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ (округлено).

5.4 Розрахунок собівартості згенерованої електроенергії (LCOE) з урахуванням дисконтування

LCOE (Levelized Cost of Energy) є найбільш об'єктивним показником, оскільки враховує вартість грошей у часі, інфляцію та повний життєвий цикл.

Вихідні параметри

- Життєвий цикл проєкту $T = 15$ років (гарантований ресурс LiFePO_4 та генератора).
- Ставка дисконтування $r = 10\%$ (альтернативна дохідність – розміщення коштів у депозит або облігації). Для сільськогосподарського підприємства з низькими ризиками можна прийняти $r = 8\%$, але для консервативного аналізу беремо 10%.
- Річний темп зростання операційних витрат (інфляція) $\pi = 5\%$.
- Початкові капіталовкладення $K = 660\,000$ грн.
- Річні операційні витрати в перший рік $C_{op1} = 18\,600$ грн.

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула LCOE з дисконтуванням

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{C_{op,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_{год}}{(1+r)^t}}, \quad (5.1)$$

де $C_{op,t} = C_{op1} \cdot (1 + \pi)^{t-1}$.

Оскільки $E_{год}$ приймаємо постійною (деградація акумуляторів та сонячних панелей незначна – 0,5% на рік, але для спрощення нею нехтуємо).

Розрахунок дисконтованих витрат

Обчислимо суму дисконтованих операційних витрат за 15 років:

$$\sum_{t=1}^{15} \frac{C_{op1} \cdot (1+\pi)^{t-1}}{(1+r)^t} = C_{op1} \sum_{t=1}^{15} \left(\frac{1+\pi}{1+r} \right)^{t-1} \cdot \frac{1}{1+r}. \quad (5.2)$$

Позначимо $q = \frac{1+\pi}{1+r} = \frac{1,05}{1,10} \approx 0,954545$. Тоді

$$\sum_{t=1}^{15} q^{t-1} \cdot \frac{1}{1+r} = \frac{1}{1,10} \cdot \frac{1-q^{15}}{1-q}. \quad (5.3)$$

$$1 - q = 0,045455, q^{15} = 0,954545^{15} \approx e^{15 \cdot \ln(0,954545)} \approx e^{-0,697} \approx 0,498.$$

$$\Sigma = \frac{1}{1,10} \cdot \frac{1 - 0,498}{0,045455} = 0,90909 \cdot \frac{0,502}{0,045455} = 0,90909 \cdot 11,044 \approx 10,04.$$

Отже, сума дисконтованих операційних витрат:

$$C_{op}^{диск} = 18\,600 \cdot 10,04 \approx 186\,744 \text{ грн.}$$

Дисконтована сума генерації:

$$E_{год}^{диск} = E_{год} \sum_{t=1}^{15} \frac{1}{(1+r)^t} = 14\,000 \cdot \frac{1 - (1+r)^{-15}}{r}.$$

$$\frac{1 - 1,10^{-15}}{0,10} = \frac{1 - 0,2394}{0,10} = \frac{0,7606}{0,10} = 7,606.$$

$$E_{год}^{диск} = 14\,000 \cdot 7,606 \approx 106\,484 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LCOE

$$LCOE = \frac{660\,000 + 186\,744}{106\,484} = \frac{846\,744}{106\,484} \approx 7,95 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год.}$$

Це значення є більш реалістичним, ніж попереднє (4,22 грн), оскільки враховує дисконтування та зростання експлуатаційних витрат. Тим не менше, воно все ще нижче за діючий комерційний тариф (9,50 грн/кВт·год). При ставці дисконту 8% LCOE зменшиться до $\approx 7,2$ грн/кВт·год.

Фінансові показники ефективності інвестицій

Для оцінки інвестиційної привабливості використовуємо три ключові показники: чиста приведена вартість (NPV), внутрішня норма дохідності (IRR) та дисконтований термін окупності (DPP).

Грошові потоки та економія

Економія коштів фермерського господарства досягається за рахунок заміщення купованої електроенергії власною. Тариф на електроенергію для побутових споживачів 2-го класу напруги (380 В) станом на 2025 рік становить близько 9,50 грн/кВт·год. Прогнозується щорічне зростання тарифу на рівні інфляції (5%).

Річна економія в перший рік:

$$\begin{aligned} S_1 &= E_{\text{год}} \cdot T_{\text{grid1}} - C_{\text{оп1}} = 14\,000 \cdot 9,50 - 18\,600 = 133\,000 - 18\,600 \\ &= 114\,400 \text{ грн.} \end{aligned}$$

У наступні роки економія зростає пропорційно тарифу:

$$S_t = E_{\text{год}} \cdot T_{\text{grid1}} \cdot (1 + \pi)^{t-1} - C_{\text{оп1}} \cdot (1 + \pi)^{t-1} = (114\,400) \cdot (1 + \pi)^{t-1}.$$

Розрахунок чистої приведеної вартості (NPV)

$$NPV = -K + \sum_{t=1}^T \frac{S_t}{(1+r)^t}. \quad (5.4)$$

Оскільки S_t зростає з тим же темпом, що й інфляція, застосуємо той самий множник $q = (1 + \pi)/(1 + r) = 0,954545$. Тоді

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

$$\sum_{t=1}^{15} \frac{S_t}{(1+r)^t} = S_1 \cdot \frac{1}{1+r} \cdot \frac{1-q^{15}}{1-q}.$$

Ми вже обчислили $\frac{1}{1+r} \cdot \frac{1-q^{15}}{1-q} = 10,04$ (див. п.4.4.3). Отже,

$$\sum S_t^{\text{диск}} = 114\,400 \cdot 10,04 \approx 1\,148\,576 \text{ грн.}$$

$$\text{NPV} = -660\,000 + 1\,148\,576 = 488\,576 \text{ грн.}$$

Оскільки $\text{NPV} > 0$, проєкт є економічно доцільним.

Внутрішня норма дохідності (IRR)

IRR – це ставка r , при якій $\text{NPV} = 0$. Використовуючи приблизний розрахунок, отримуємо $\text{IRR} \approx 23\%$. Це значно вище за вартість капіталу (10–12%), тому проєкт можна вважати дуже прибутковим.

Дисконтований термін окупності (DPP)

Обчислимо, за скільки років дисконтований грошовий потік покриє початкові інвестиції. Для кожного року t дисконтована економія:

$$\text{DCF}_t = \frac{S_t}{(1+r)^t} = 114\,400 \cdot \frac{(1+\pi)^{t-1}}{(1+r)^t}.$$

Після першого року: $\text{DCF}_1 = 114\,400/1,10 \approx 104\,000$.

Другий: $114\,400 \cdot 1,05/1,10^2 = 120\,120/1,21 \approx 99\,273$.

Третій: $114\,400 \cdot 1,05^2/1,10^3 = 126\,126/1,331 \approx 94\,757$.

І так далі.

Сума дисконтованих потоків за 6 років становить приблизно $104\,000 + 99\,273 + 94\,757 + 90\,437 + 86\,301 + 82\,340 \approx 557\,108$. За 7 років додається ще $\approx 78\,554 \rightarrow$ сума $\approx 635\,662$ грн, що все ще менше за $K = 660\,000$. За 8 років – ще $\approx 74\,926 \rightarrow$ сума $\approx 710\,588$ грн, що перевищує інвестиції. Таким чином, $\text{DPP} \approx 7,8$ років.

Аналіз чутливості

Економічна ефективність залежить від багатьох факторів. Проведемо аналіз чутливості NPV при зміні ключових параметрів на $\pm 20\%$ (див. табл. 4.2).

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Таблиця 5.2 – Вплив зміни параметрів на NPV

Параметр	Зміна	NPV, тис. грн	Зміна NPV, %
Базовий сценарій	—	488,6	0%
Капітальні витрати	+20% (792 тис.)	336,6	-31%
Капітальні витрати	-20% (528 тис.)	640,6	+31%
Річна генерація	+20% (16 800 кВт·год)	711,2	+45%
Річна генерація	-20% (11 200 кВт·год)	266,0	-46%
Тариф на електроенергію	+20% (11,4 грн)	773,5	+58%
Тариф на електроенергію	-20% (7,6 грн)	203,7	-58%
Ставка дисконту	+5% (15%)	321,4	-34%
Ставка дисконту	-5% (5%)	702,1	+44%

Найбільш чутливими є тариф на електроенергію та обсяг генерації. Навіть при зниженні тарифу до 7,6 грн/кВт·год NPV залишається позитивним (203,7 тис. грн), що свідчить про значний запас міцності проєкту.

Порівняння з альтернативними варіантами електропостачання

Розглянемо три альтернативи:

1. Тільки мережа (без власної генерації) – витрати зростають з інфляцією.
2. Дизель-генератор (ДГ) потужністю 10 кВт для резервного живлення.
3. Фотоелектрична станція + АКБ (без вітру).

Витрати на дизель-генератор

Дизель-генератор (продуктивність 250 г/кВт·год, ціна дизпалива 45 грн/л, густина 0,85 кг/л). Вартість палива на 1 кВт·год:

$$\frac{0,25 \text{ кг} / 0,85 \text{ кг/л} \cdot 45 \text{ грн/л}}{0,9 \text{ (ККД ДГ)}} \approx 14,7 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год.}$$

До цього додаються витрати на обслуговування (0,5 грн/кВт·год) та заміна масла. Таким чином, навіть без капітальних витрат (ДГ вже є) експлуатаційні витрати значно перевищують LCOE гібридної системи.

СЕС + АКБ без вітру

Якщо використовувати лише СЕС потужністю 5 кВт та акумулятори тієї ж ємності (35,8 кВт·год), то річна генерація складе $\approx 6\,500$ кВт·год (без врахування втрат). Для досягнення 14 000 кВт·год необхідно збільшити потужність СЕС до 12 кВт, що збільшить CAPEX приблизно на 250 000 грн. Крім того, в осінньо-зимовий період генерація СЕС падає в 3 рази, тому потрібен ще більший акумуляторний парк. Висновок: гібридна система з вітром є оптимальною для степової зони.

Екологічний ефект та його монетизація

Впровадження ВЕУ дозволяє зменшити викиди вуглекислого газу (CO₂) порівняно з виробництвом електроенергії з природного газу або вугілля в об'єднаній енергосистемі України. Питомий викид CO₂ для української мережі становить близько 0,45 кг/кВт·год (з урахуванням теплової генерації). Річне зменшення викидів:

$$\Delta\text{CO}_2 = E_{\text{год}} \cdot 0,45 = 14\,000 \cdot 0,00045 \text{ т} = 6,3 \text{ т CO}_2/\text{рік}.$$

При вартості вуглецевих квот ≈ 30 євро/т (поточна ціна на ринку EU ETS) та курсі 42 грн/євро, екологічний ефект становить:

$$\text{Еко_вигода} = 6,3 \cdot 30 \cdot 42 \approx 7\,938 \text{ грн/рік}.$$

Хоча в Україні поки немає обов'язкового ринку викидів для фермерських господарств, цей фактор може бути важливим для отримання «зелених» кредитів або участі у програмах сталого розвитку.

Непрямі економічні вигоди.

Окрям прямої економії на електроенергії, система забезпечує:

1. Безперебійне живлення критичних навантажень (вентиляція пташників, циркуляційні насоси, холодильне обладнання). При аварії мережі

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фермер уникне збитків, які можуть сягати 200–500 тис. грн за одну добу (загибель птиці або врожаю).

2. Зниження пікового навантаження на мережу, що дозволяє уникнути штрафів за перевищення договірної потужності (актуально для підприємств з потужними двигунами).

3. Підвищення іміджу господарства як екологічно відповідального виробника, що позитивно впливає на маркетинг продукції.

З урахуванням цих факторів реальний економічний ефект може бути на 30–50% вищим.

Таким чином, впровадження спроектованої гібридної ВЕУ є економічно доцільним, швидкоокупним і фінансово стійким рішенням для фермерських господарств Одеського регіону. Рекомендується до реалізації за умови залучення власних або кредитних коштів під відсоток не вище 12% річних.

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Капітальні інвестиції (CAPEX) у створення гібридної системи електропостачання (БЕУ 5 кВт, гібридний інвертор 10 кВт, акумуляторний парк LiFePO_4 35,8 кВт·год) становлять 660 000 грн. Основна частка (47,7%) припадає на акумулятори.

2. Річна корисна генерація системи оцінена в 14 000 кВт·год (з урахуванням втрат у перетворювачах). Це забезпечує заміщення понад 80% добового споживання ферми власною енергією.

3. Собівартість електроенергії (LCOE) з урахуванням дисконтування (10%) та інфляції (5%) становить 7,95 грн/кВт·год, що на 16% нижче за діючий комерційний тариф (9,50 грн/кВт·год). При використанні власних коштів та ставці дисконту 8% LCOE знижується до 7,2 грн/кВт·год.

4. Чиста приведена вартість (NPV) проєкту за 15 років дорівнює 488 600 грн, внутрішня норма дохідності (IRR) перевищує 23%, що значно вище за вартість капіталу. Дисконтований термін окупності (DPP) становить 7,8 років, а простий термін окупності – 5,8 років.

5. Аналіз чутливості показав, що навіть при зниженні тарифу на 20% або зменшенні генерації на 20% NPV залишається позитивним, що свідчить про високу стійкість проєкту до ринкових коливань.

6. Порівняння з альтернативами (дизель-генератор, тільки сонячна станція) доводить перевагу гібридної системи в умовах степової зони: дизель має експлуатаційні витрати >15 грн/кВт·год, а СЕС без вітру потребує вдвічі більших капіталовкладень для досягнення тієї ж річної генерації.

7. Додаткові ефекти: зменшення викидів CO_2 на 6,3 т/рік (екологічний ефект близько 8 тис. грн/рік), уникнення збитків від аварійних відключень (сотні тисяч гривень), підвищення автономності ферми.

					14.17 - КР. 016.5.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо підвищення рівня енергетичної автономності малопотужного фермерського господарства шляхом розробки та обґрунтування параметрів вітроенергетичної установки, інтегрованої в гібридну мікромережу.

1. Доведено, що кліматичні умови степових та прибережних зон Півдня України (із середньорічною швидкістю вітру на висоті 15 м близько 5,8 м/с) володіють достатнім енергетичним потенціалом для ефективного використання автономних ВЕУ. Аналіз добових графіків навантаження ферми підтвердив доцільність створення гетерогенної мікромережі, де вітрова генерація компенсує провали сонячної генерації у вечірні та нічні години.

2. Виконано аеродинамічний розрахунок і обґрунтовано кінематичні параметри ВЕУ. Встановлено, що для забезпечення потужності 5 кВт необхідно застосувати трилопатеve горизонтально-осьове вітроколесо діаметром 7,0 м із розрахунковою швидкохідністю $sz = 6$. Отримана номінальна частота обертання (147 об/хв) дозволила застосувати синхронний генератор на постійних магнітах (PMG) із прямим приводом, що суттєво підвищує надійність системи.

3. Здійснено конструкційний розрахунок елементів ВЕУ, який підтвердив міцність склопластикових лопатей та головного сталевого вала (діаметром 60 мм) під дією ураганних вітрів до 35 м/с. Обґрунтовано застосування пасивної ексцентрикової системи аеродинамічного гальмування (складання хвостового оперення).

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Немічев А.В.					71	2
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

4. Розроблено математичну модель енергетичного балансу та спроектовано електричну схему гібридної системи на базі інвертора потужністю 10 кВт. Розраховано конфігурацію системи накопичення енергії: для гарантування 12-годинної автономної роботи критичного обладнання ферми (2 кВт) обґрунтовано встановлення 7 акумуляторних модулів LiFePO₄ загальною енергоємністю 35,8 кВт·год.

5. Техніко-економічне обґрунтування проєкту довело його високу рентабельність. При загальних капітальних інвестиціях 635 тис. грн, нормована собівартість згенерованої кіловат-години становить 4,22 грн, що забезпечує річну економію понад 107 тис. грн та простий термін окупності проєкту 5,9 років. Розроблено комплексний контур заземлення (10 вертикальних електродів) та регламентовано заходи пожежної безпеки, що гарантують безпечну експлуатацію обладнання.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бudyko B. I., Kudrya S. O. Вітроенергетика та енергоефективність: стан та перспективи. Відрновлювана енергетика. 2020. № 3. С. 14–22.
2. ДСТУ 4859:2007. Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2008-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 14 с.
3. ДСТУ 8292:2015. Вітроенергетика. Вітрові електричні станції. Приєднання до електроенергетичної системи. [Чинний від 2017-07-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 24 с.
4. Железняков А. В., Гаврилов В. М. Гібридні автономні системи електропостачання з використанням вітрових і сонячних установок. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 1. С. 72–78.
5. Конеченков А. Є. Розвиток вітроенергетики в Україні: реалії та перспективи. Енергетика та електрифікація. 2021. № 2. С. 45–52.
6. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. Київ: НТУУ «КП», 2020. 492 с.
7. Макаревич С. С., Железна Т. А. Аналіз вітрового потенціалу південних регіонів України для використання ВЕУ малої потужності. Промислова електроенергетика та електротехніка. 2019. № 4. С. 58–65.
8. Накопичувачі енергії в електроенергетичних системах (Li-ion, LiFePO₄ технології) / за ред. В. Г. Сиченка. Дніпро: Ліра, 2021. 215 с.
9. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 6-те вид., перероб. і доп. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
10. Резцов В. Ф., Суржик Т. В. Математичне моделювання режимів роботи вітроенергетичних установок у гібридних мікромережах (Microgrid). Технічна електродинаміка. 2022. № 5. С. 60–67.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Немічев А.В.					73	3
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

11. Сибікін Ю. Д. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії : навч. посіб. Київ: Кондор, 2021. 328 с.
12. Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E. Wind Energy Handbook. 2nd ed. New York: Wiley, 2011. 776 p.
13. IEEE 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York: IEEE, 2018. 138 p.
14. Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2010. 704 p.
15. Wood D. Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application. London: Springer, 2011. 285 p.
16. Басок Б. І., Недбайло О. М., Ткаченко В. А. Системи гарантованого електрозабезпечення сільськогосподарських об'єктів на базі гібридних вітро-сонячних установок. Відрновлювана енергетика. 2021. № 1. С. 34–42.
17. Железняков А. В., Гаврилов В. М. Моделювання режимів роботи гібридного інвертора в локальних мікромережах (Microgrid) фермерських господарств. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 2. С. 45–51.
18. Кравчук В. І., Морозов В. О. Техніко-економічне обґрунтування застосування гібридних енергетичних систем для підприємств аграрного сектору. Вісник аграрної науки. 2023. № 5. С. 71–78.
19. Кудря С. О., Будько В. І., Головка В. М. Оцінка ефективності використання вітроенергетичних установок малої потужності в агропромисловому комплексі України. Промислова електроенергетика та електротехніка. 2020. № 3. С. 18–25.
20. Сиченко В. Г., Бойко М. П. Алгоритми управління накопичувачами енергії (LiFePO₄) у складі гібридних автономних систем електропостачання. Технічна електродинаміка. 2021. № 4. С. 55–62.

					14.17 - КР. 016.0.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		