

ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ

Відділення "Інженерна інфраструктура та комп'ютерні науки"

Кафедра “Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка”

До захисту допущено
завідувач кафедру
Інна НЕЗДВЕЦЬКА

“ ” 2026 року

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

спеціальність: 141 “ Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка ”

на тему: “ Розробка системи резервного електроживлення на базі
вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об’єкта побутового
типу ”

Виконав: здобувач освіти
IV курсу, групи Е-43стн
спеціальності

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

Олександр ГРИЩУК

Керівник проєкту Богдан АНТИПЧУК

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

					ДП.141.043.022.ПЗ		
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	м. Житомир – 2026 року ВСТУП ВСТУП		
Розробив	Грищук О.Г.						
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.				ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	8	60

На сучасному етапі проблема забезпечення енергетичної автономності приватних домоволодінь в Україні набула критичного значення. Систематичні дестабілізації в роботі централізованих енергомереж у поєднанні з тенденцією до здорожчання традиційних енергоресурсів зумовлюють нагальну потребу у впровадженні високоефективних альтернативних систем живлення.

Вибір вітрогенератора з ротором Савоніуса для енергозабезпечення побутового об'єкта є стратегічно обґрунтованим рішенням, що базується на низці його технічних переваг. Зокрема, завдяки здатності працювати при низьких швидкостях повітряних потоків, така установка ефективно генерує енергію навіть у помірних вітрових умовах, характерних для більшості регіонів України. Окрім цього, вертикально-орієнтована конструкція забезпечує мінімальний рівень аеродинамічного шуму, що є критичним фактором для щільної забудови приватного сектору. Практичність системи також зумовлена її високою надійністю та простотою в експлуатації: нижнє розташування генератора та основних вузлів значно спрощує технічне обслуговування, не потребуючи висотних робіт.

Метою даного дипломного проєкту є розробка комплексної системи резервного електропостачання на базі вертикально-осьового вітрогенератора для забезпечення стабільного живлення критично важливих побутових споживачів. Проєкт передбачає інженерний розрахунок параметрів ротора Савоніуса, вибір оптимальних компонентів силової електроніки та обґрунтування схеми акумулювання енергії для досягнення максимальної автономності об'єкта в умовах нестабільного централізованого енергопостачання.

Об'єктом проектування є комплексна система перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію для забезпечення автономного резервного живлення об'єктів побутового призначення.

Предметом розробки виступають геометричні та конструктивні параметри ротора Савоніуса, принципи побудови силової частини системи, а також вибір та схемотехнічне узгодження компонентів контролю заряду й інвертування енергії у складі єдиного енергокомплексу.

Основні завдання проекту:

- аналітичний огляд: дослідження вітрового потенціалу та порівняльний аналіз існуючих конструкцій вітрогенераторів;
- технічний розрахунок: визначення оптимальних геометричних параметрів ротора Савоніуса для досягнення заданої потужності;
- підбір обладнання: формування специфікації компонентів системи (генератора, контролера, інвертора та АКБ);
- проектування: розробка структурної та принципової електричної схем установки;
- економічне обґрунтування: оцінка фінансової ефективності та термінів окупності проекту.

Наукова новизна та практичне значення проекту полягають у розробці комплексного підходу до проектування енерговузлів на базі вертикально-осьових вітрогенераторів, адаптованих до ефективного функціонування у специфічному аеродинамічному середовищі приватного сектору. Результати роботи мають безпосередню практичну цінність для створення локальних систем енергетичної безпеки, що дозволяють мінімізувати ризики знеструмлення побутових споживачів та сприяють загальному розвантаженню магістральних електричних мереж.

1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СПОЖИВАЧІВ

1.1 Аналіз поточного стану та магістральних напрямів трансформації світового ринку відновлюваної енергетики

Сьогодні світова та українська енергетичні системи проходять через масштабну трансформацію, ключовим вектором якої є відмова від викопних ресурсів на користь відновлюваної енергетики. За оцінками ІЕА, 2025 рік став переломним: завдяки активному впровадженню сонячних та вітрових потужностей частка «зеленої» генерації у світі сягнула 30%. Для України ж розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) перетворився на стратегічний пріоритет, що поєднує кліматичні цілі (згідно з положеннями Національного плану з енергетики та клімату (НПЕК) на період до 2030 року) із завданнями щодо посилення енергетичної незалежності та розбудови децентралізованої мережі.

Сучасний стан вітчизняного ринку ВДЕ (2025–2026 рр.) визначається трьома ключовими векторами: відновленням промислової генерації, стрімкою децентралізацією та розвитком балансуєчих потужностей. Попри воєнні виклики, сектор вітроенергетики у 2025 році поповнився на 320 МВт, що дозволило утримувати частку «зеленої» енергії на рівні 11–17%. Водночас нестабільність централізованого постачання стимулювала приватний сектор до масового переходу на малі вітрові та сонячні установки. Фундаментом для інтеграції цих нерівномірних джерел енергії стало активне

	впровадження	систем	збереження енергії, обсяг яких станом на 2025 рік	ДП 141.043.022.ПЗ			
	перевинців 500	МВт, забезпечуючи необхідну гнучкість усієї енергосистеми.					
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	Порівняльний аналіз ключових сегментів відновлюваної енергетики		
Розробив	Григорук О.Б.				1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СПОЖИВАЧІВ		
Перевір	Антипчук Б.О.				У	10	60
Н. Контр.	Антипчук Б.О.				ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
Затв.	Гнатюк О.Ф.						

для приватних домогосподарств представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз ключових технологій ВДЕ у побутовому сегменті

Технологічна база (Джерело)	Експлуатаційні переваги для домогосподарств	Ключові детермінанти та обмеження
Фотоелектричні системи (СЕС)	Мінімальні витрати на сервіс, відсутність механічного зносу, простота інтеграції	Висока дискретність генерації (залежність від інсоляції та часу доби)
Вітроенергетичні установки (ВЕС)	Стабільність виробітку в осінньо-зимовий період; здатність працювати цілодобово	Акустичне забруднення, необхідність специфічного ландшафту та високих щогл
Біоенергетичні рішення	Прогнозованість та керованість графіку видачі потужності	Потреба у постійній логістиці сировини та складність регламентних робіт

Станом на 2026 рік мала вітроенергетика в Україні трансформується у стратегічно важливе доповнення до сонячної генерації. Її актуальність зумовлена сезонною комплементарністю: пік вітрової активності припадає саме на осінньо-зимовий період, коли інсоляція є критично низькою. З огляду на обмеження традиційних горизонтально-осьових турбін у щільній забудові (акустичне навантаження та вібрації), зростає попит на вертикально-осьові рішення, зокрема ротори Савоніуса, що демонструють стабільну роботу в умовах міської турбулентності. Отже, інтеграція таких систем є логічним та своєчасним рішенням для зміцнення енергетичної автономії приватного сектору в сучасних реаліях української енергосистеми.

1.2 Аналітичний огляд конструктивних типів та експлуатаційних характеристик ВЕУ

Перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертання вала забезпечується вітроприймальними пристроями, головною ознакою класифікації яких є положення осі обертання стосовно напрямку повітряного потоку. У сегменті малої генерації базове розмежування систем проводиться між горизонтально-осьовими (HAWT) та вертикально-осьовими (VAWT) установками.

Найбільш поширеним технічним рішенням у сучасній генерації є горизонтально-осьові вітротурбіни (HAWT) пропелерного типу (див. рисунок 1.1), принцип роботи яких ґрунтується на виникненні аеродинамічної підйомної сили при обтіканні лопатей вітровим потоком. Ключовою перевагою таких установок є висока енергетична ефективність, оскільки їхній коефіцієнт використання енергії вітру C_p може досягати значень 0,4 – 0,5.

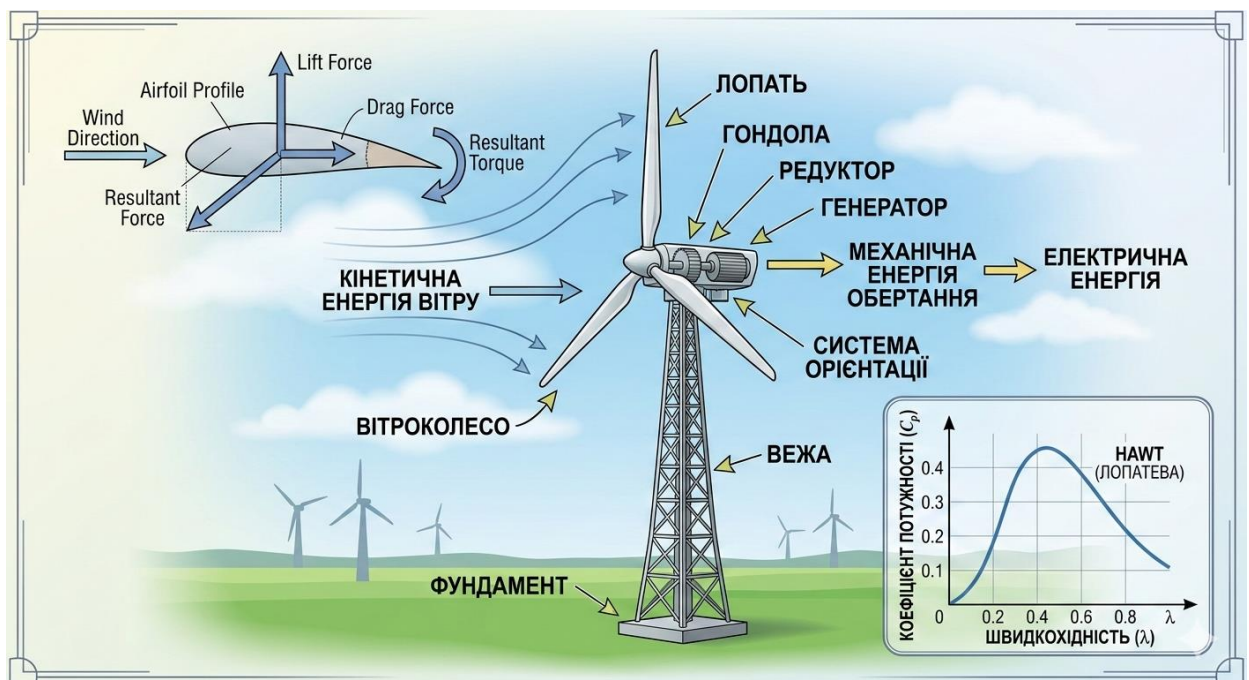


Рисунок 1.1 – Горизонтально-осьова вітротурбіна (HAWT)

Разом з тим, впровадження систем HAWT супроводжується низкою техніко-експлуатаційних викликів. Зокрема, необхідність точного позиціювання ротора відносно вектора вітру вимагає інтеграції допоміжних

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

вузлів – від пасивних флюгерних механізмів до активних систем сервоприводів. Енергетична ефективність таких установок обмежена високим пусковим порогом (у межах 3 – 4 м/с), що критично для регіонів з низькою інтенсивністю вітрів.

Важливим деструктивним фактором є емісія акустичних шумів, зокрема в низькочастотному (інфразвуковому) спектрі, що створює дискомфорт при експлуатації в житлових зонах. Крім того, аеродинаміка лопатевих турбін вкрай чутлива до структури потоку: у приватному секторі, де забудова та ландшафт генерують значну турбулентність, спостерігається різка деградація ККД. Це зумовлює низьку доцільність використання горизонтально-осьових ВЕУ в безпосередній близькості до побутових об'єктів порівняно з вертикально-осьовими аналогами

Вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання (VAWT) демонструють стійку тенденцію до впровадження в сегменті автономного енергозабезпечення побутових споживачів. Популярність цих систем зумовлена їхньою конструктивною універсальністю та здатністю ефективно функціонувати в умовах нестабільного вітрового клімату. За фізичною природою виникнення обертового моменту вертикально-осьові турбіни класифікують на два основні типи: ротори Дар'є та ротори Савоніуса.

Ротори Дар'є належать до класу швидкохідних турбін, робота яких ґрунтується на використанні аеродинамічної підйомної сили. Вони характеризуються високими показниками енергоефективності, проте мають суттєвий недолік – низький пусковий момент, що часто унеможливорює їх самостійний запуск при низьких швидкостях вітру.

Ротори Савоніуса (див. рис. 1.2) належать до класу вертикально-осьових установок, що працюють за принципом диференціального лобового опору. Обертовий момент виникає через різницю сил тиску вітру на ввігнуту (активну) та опуклу (пасивну) поверхні лопатей. Завдяки такій конструкції ротор забезпечує високий пусковий момент, що дозволяє системі розпочинати роботу вже при швидкості вітру від 1,2–1,5 м/с. Це робить

установку ефективною в умовах нестабільної та слабкої аеронавігації, характерної для приватних об'єктів побутового типу.

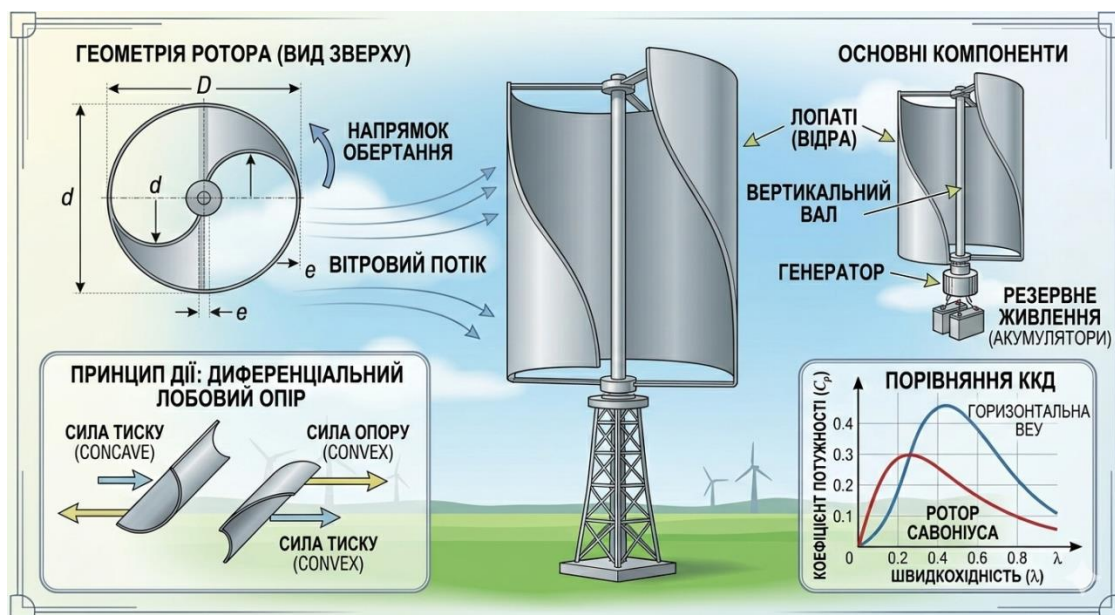


Рисунок 1.2 – Вертикально-осьова вітротурбіна (VAWT) на базі ротора Савоніуса

З точки зору обґрунтування вибору типу ВЕУ для умов приватного домоволодіння, то ефективність системи резервного живлення безпосередньо корелює з локальними аеродинамічними особливостями місцевості. Нижче (див. таблицю 1.2) наведено порівняльну характеристику ключових технічних та експлуатаційних параметрів, що визначають доцільність застосування конкретної топології вітротурбіни.

Таблиця 1.2 – Компаративний аналіз експлуатаційних показників HAWT та ротора Савоніуса

Критерій порівняння	Горизонтально-осьова ВЕУ (лопатева)	Вертикально-осьова ВЕУ (тип Савоніуса)
Адаптивність до вектора вітру	Потребує активної або пасивної системи орієнтації	Всенаправлена; незалежна від напрямку потоку
Стійкість до турбулентних збурень	Суттєва деградація ККД, виникнення резонансних вібрацій	Стабільна генерація у вихрових та нестабільних потоках
Поріг самозапуску (ϑ_{start})	Високий (3.0 – 5.0 м/с)	Низький (1.2 – 2.0 м/с)
Акустична та вібраційна	Висока (інтенсивний)	Мінімальна; можливість

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

емісія	аеродинамічний шум)	інсталяції на конструкціях будівель
Доступність силового обладнання	Складне (розміщення вузлів генерації на висоті щогли)	Висока (генератор та контролери розташовані в основі вала)

Аналіз даних таблиці 1.2 свідчить, що попри нижчий теоретичний ККД, ротор Савоніуса є найбільш раціональним рішенням для приватного об'єкта. Його здатність до самозапуску при слабких вітрах та стабільна робота в умовах турбулентності, спричиненої будівлями, забезпечують більший сумарний виробіток енергії протягом року у порівнянні з лопатевими аналогами.

1.3 Обґрунтування вибору ротора Савоніуса для автономного енергозабезпечення

Експлуатація вітроенергетичних установок у межах приватних домоволодінь супроводжується специфічними аеродинамічними викликами: низькою середньорічною швидкістю вітру та високим рівнем турбулентності, спричиненої забудовою й рослинністю. У таких умовах застосування ротора Савоніуса є найбільш раціональним технічним рішенням. Попри нижчий теоретичний коефіцієнт використання енергії вітру C_p порівняно з лопатевими аналогами, дана установка забезпечує вищу сумарну річну генерацію завдяки збільшеній кількості годин активної роботи при слабких повітряних потоках.

Висока ефективність ротора Савоніуса в умовах децентралізованого енергопостачання зумовлена низькою його унікальних характеристик. Перш за все, установка вирізняється аеродинамічною всенаправленістю: здатність сприймати вітрові потоки з будь-якого напрямку (360°) повністю виключає потребу в системах орієнтації, таких як флюгери або сервоприводи. Це не лише спрощує кінематичну схему, а й суттєво підвищує загальну надійність агрегату. Окрім того, функціонування за принципом диференціального лобового опору забезпечує високу стійкість у турбулентних середовищах,

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

15

дозволяючи зберігати стабільність крутного моменту навіть за умов інтенсивних завихрень та різкої зміни вектора вітру.

Важливою перевагою для регіонів з помірним вітровим кліматом є низький поріг самозапуску: можливість початку генерації при швидкостях вітру від 1,2 – 1,8 м/с робить систему ефективною в періоди слабкої аеронавігації, коли традиційні швидкохідні ВЕУ залишаються статичними. Разом з цим, помірна кутова швидкість обертання гарантує екологічність та безпеку експлуатації, оскільки мінімізує емісію інфразвуку та вібраційне навантаження. Даний фактор дозволяє інтегрувати установку безпосередньо в конструкції будівель (наприклад, виконувати монтаж на даху) без ризику руйнування опорних елементів.

Завершує перелік переваг висока технологічність обслуговування, зумовлена вертикальною орієнтацією вала. Така компоновка дозволяє розмістити генератор та трансмісію в нижній частині установки, що одночасно знижує центр мас, підвищуючи статичну стійкість конструкції, та значно спрощує проведення регламентних сервісних робіт.

1.4. Аналіз регіонального вітропотенціалу та енергетичного профілю автономного споживача

Ефективність функціонування автономної вітроенергетичної установки (ВЕУ) безпосередньо залежить від ступеня кореляції між наявним енергетичним потенціалом повітряних мас та динамікою енергоспоживання об'єкта. Для переважної більшості регіонів України характерним є помірний вітровий клімат континентального типу. Згідно з даними метеорологічних спостережень, середньорічні швидкості вітру на висотах 10 – 20 метрів (типова висота щогл для приватного сектору) стабільно коливаються в межах 3,0 – 6,0 м/с.

Такий низькошвидкісний режим є малоефективним для класичних горизонтально-осьових турбін (HAWT). Пропелерні установки мають

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

високий інерційний поріг запуску (зазвичай від 4 – 5 м/с) та потребують стабільних ламінарних потоків для виходу на номінальну потужність.

Натомість для роторів Савоніуса зазначений діапазон швидкостей є оптимальним робочим вікном. Високий крутний момент та здатність до генерації при слабких потоках (від 1,2 – 1,5 м/с) дозволяють максимально повно конвертувати енергію вітру протягом року. Це забезпечує безперервне підзаряджання акумуляторних батарей (АКБ) навіть у періоди тривалого метеорологічного затишшя, коли інші типи ВЕУ залишаються статичними.

Особливе значення має узгодження генерації з графіком навантаження автономного побутового споживача. Як правило, добовий профіль споживання приватного будинку має виражену нерівномірність із двома основними піками:

- ранковий пік (07:00 – 09:00): інтенсивне використання кухонної техніки та систем водопостачання;
- вечірній пік (18:00 – 22:00): максимальне навантаження через роботу систем освітлення, клімат-контролю та мультимедійних пристроїв.

У контексті побудови гібридних систем або систем резервного живлення, вітрогенератор Савоніуса демонструє суттєві переваги над сонячними панелями (фотомодулями). По-перше, на відміну від сонячної генерації, вітротурбіна забезпечує цілодобовий цикл вироблення енергії, що є критично важливим для покриття нічного базового навантаження та вечірнього піку. По-друге, в осінньо-зимовий період, коли інсоляція мінімальна, середня швидкість вітру в Україні зазвичай зростає, що дозволяє вітрогенератору компенсувати дефіцит енергії в системі. Таким чином, інтеграція ротора Савоніуса дозволяє згладити цикли розряду АКБ та суттєво підвищити загальну автономність енерговузла.

2 СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З РОТОРОМ САВОНІУСА ДЛЯ ПРИВАТНОГО ОБ'ЄКТА ПОБУТОВОГО ТИПУ

2.1 Технічне завдання та вихідні дані для проектування установки

2.1.1 Характеристика об'єкта проектування та аналіз його енергоспоживання

Об'єктом проектування є система енергозабезпечення приватного домоволодіння, розташованого за адресою: м. Житомир, пров. Мальовничий, 12. Згідно з представленим генеральним планом (масштаб 1:200) зображеним на рисунку 2.1, ділянка має розвинену інфраструктуру, що включає:

- капітальний житловий будинок загальною площею 145 м², який є основним споживачем електричної енергії;
- господарську будівлю (гараж) площею 100 м², де доцільно розмістити силову частину системи резервного живлення (інверторне обладнання та блоки акумуляторних батарей);
- допоміжні споруди, зокрема альтанку та зону відпочинку, що потребують чергового освітлення.

Основним завданням проектованої установки є підтримання життєдіяльності об'єкта в умовах нестабільної роботи централізованої

					електромережі або при повній відсутності напруги (режим "Blackout"). Для			
Зм.	Арх.	№ Док.	Підпис	Дата	дату 04.04.2022 рр.			
Розробив	Гришук О.Г.				мінімізації витрат та оптимізації смності накопичувачів, енергоспоживачі	Літ.	Арк.	Аркушів
Переві	Антипчук Б.О.				2 СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО			
					ВІТРОГЕНЕРАТОРА З РОТОРОМ			
Н. Контр.	Антипчук Б.О.				САВОНІУСА ДЛЯ ПРИВАТНОГО			
Затв.	Гнатюк О.Ф.				ОБ'ЄКТА ПОБУТОВОГО ТИПУ			
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн			

навантаження, що живитиметься від вітроелектроустановки (ВЕУ) з ротором Савоніуса, віднесено:

- інженерні системи опалення: автоматика керування газовим котлом та група циркуляційних насосів; безперебійна робота цих пристроїв є критичною для запобігання розморожуванню системи опалення в зимовий період;
- освітлювальні мережі: використання енергоефективних LED-ламп для внутрішнього аварійного освітлення приміщень та периметральної підсвітки території згідно з планом безпеки;
- інформаційно-комунікаційний вузол: живлення Wi-Fi роутерів, систем відеоспостереження та засобів зарядки мобільного зв'язку для підтримання контакту із зовнішнім світом;
- побутова техніка першої необхідності: холодильне обладнання для збереження продуктів харчування.

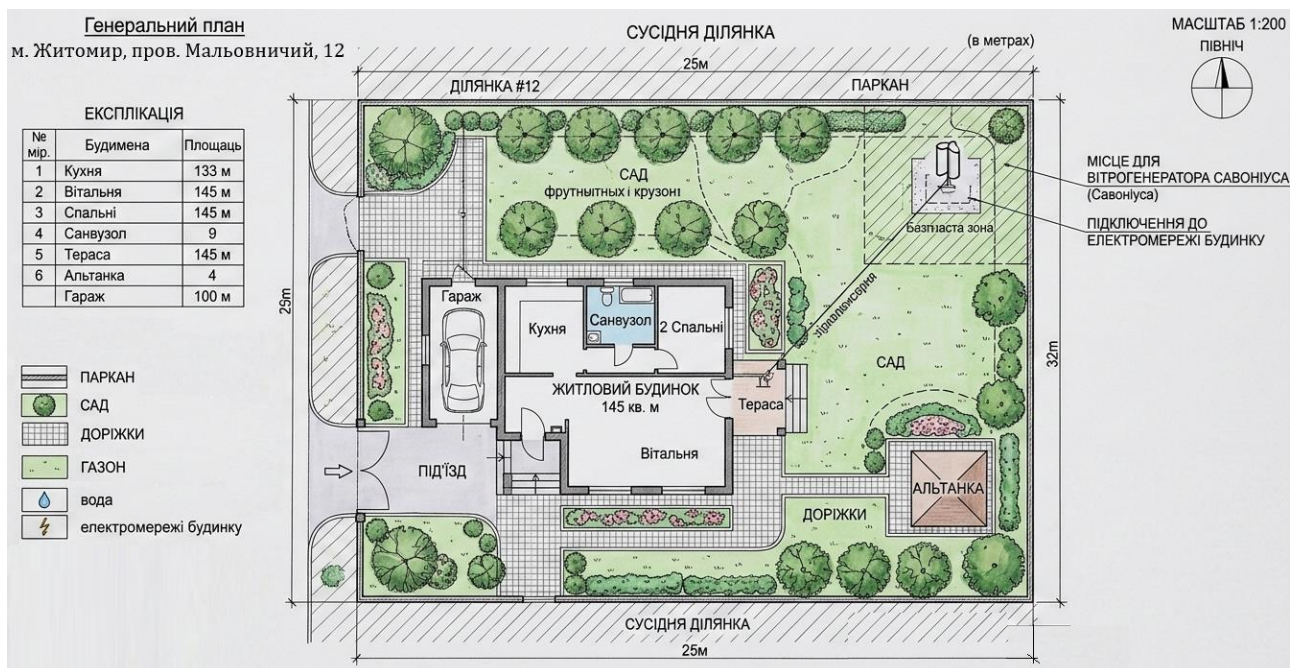


Рисунок 2.1 – Генеральним план приватного домоволодіння

Енергетичні характеристики розроблюваної системи:

- номінальна потужність ($P_{\text{ном}}$): розрахунковий показник становить 0.6 кВт, що забезпечує стабільне функціонування основних вузлів життєзабезпечення в штатному режимі;
- пікова потужність (P_{max}): максимальне навантаження сягає 1.5 кВт. Цей запас передбачений для компенсації пускових струмів (зокрема холодильного обладнання) та живлення другорядних пристроїв у короткочасному режимі;
- добова енергоємність: середнє споживання варіюється в межах 4 – 6 кВт·год (даний параметр є базовим для визначення геометричних параметрів ротора Савоніуса та конфігурації блоку акумуляторів).

2.1.2 Природно-кліматичні умови району розташування

Об'єкт проектування територіально знаходиться у межах Житомирської області, яка належить до зон із помірним вітровим потенціалом. На основі детального аналізу району розташування об'єкта було виділено ключові метеорологічні особливості, що визначають умови експлуатації проектованої системи. Вітровий режим регіону характеризується середньорічною швидкістю повітряних потоків у межах 3.8 – 4.2 м/с (на розрахунковій висоті 10 м). Попри загальну стабільність цих показників, такий рівень швидкостей вимагає застосування енергетичного обладнання з низьким порогом запуску.

Аналіз аеродинамічної експозиції вказує на чітку перевагу західного та північно-західного векторів вітру (див. рисунок 2.2), що є критично важливим для просторового позиціонування установки.

Окрему увагу приділено мікролокаційним особливостям ділянки, які визначаються високою аеродинамічною шорсткістю поверхні. Безпосередня близькість щільної житлової забудови та багаторічних садових насаджень

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

суттєво трансформує структуру повітряного шару, створюючи інтенсивні турбулентні потоки та постійні завихрення.

Наявність таких нестабільних «брудних» потоків та часта зміна напрямку вітру через перешкоди роблять умови на ділянці специфічними, вимагаючи від системи високої адаптивності до турбулентного середовища. Це робить використання класичних горизонтально-осьових ВЕУ малоефективним через їхню високу інерційність. Натомість, такі умови є оптимальними для обраного типу вертикально-осьової установки, яка демонструє низьку чутливість до турбулентності та напрямку повітряних мас.

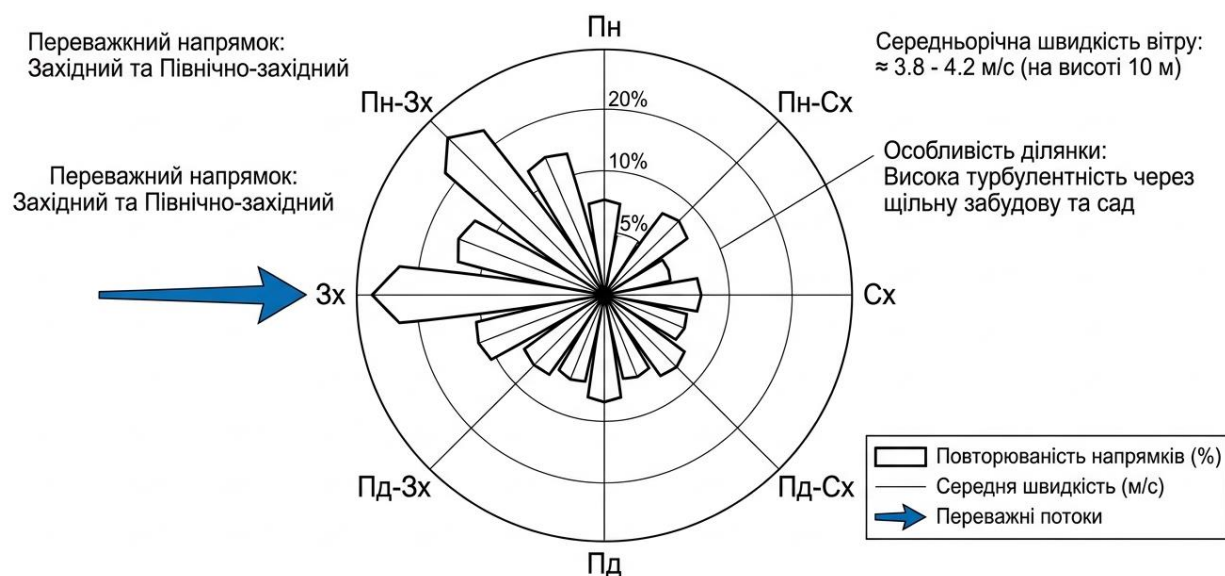


Рисунок 2.2 – Роза вітрів Житомирської області

2.1.3 Вихідні дані згідно з генеральним планом

На основі аналізу ділянки (масштаб 1:200) зображених на рисунку 2.1 визначено наступні проєктні обмеження:

- місце встановлення: північно-східний кут ділянки (зона саду), що є найбільш віддаленим від основної забудови для мінімізації впливу вітрової тіні від будинку;

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

21

- дистанція до точки підключення: близько 15–20 метрів від будинку, що потребує врахування втрат напруги в кабельній лінії;
- безпечна зона: передбачено радіус «безпечної зони» навколо щогли вітрогенератора згідно з планом.

Ключові технічні параметри та вимоги до системи, що розробляється, систематизовано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри та вимоги до вітроенергетичної установки типу Савоніус

ПАРАМЕТР	ВИМОГА
Локація	м. Житомир, відкрита ділянка з садовими насадженнями
Тип установки	ВЕУ з вертикальною віссю обертання (тип Савоніуса)
Номінальна потужність	500 – 800 Вт
Висота щогли	6 – 8 метрів (з урахуванням висоти паркану та дерев)
Режим роботи	Резервний, з паралельним підключенням до мережі
Тип акумуляторів	Герметичні, для встановлення в приміщенні гаража

2.2 Визначення конструктивних характеристик та геометричних параметрів вітроколеса

Визначення габаритів вітроколеса базується на фундаментальній залежності потужності вітрового потоку від площі ометання та швидкості вітру. Базова формула для розрахунку корисної потужності установки P має вигляд:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{ген.}}, \quad (2.1)$$

де:

ρ – щільність повітря (прийнято 1.225 кг/м³);

v – швидкість повітряного потоку, м/с;

A – площа ометання ротора, м²;

C_p – коефіцієнт використання енергії;

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

$\eta_{\text{ген.}}$ – сумарний ККД генератора та системи керування (прийнято 0.85);
вітру (для ротора Савоніуса прийнято реалістичне значення 0.18).

Для визначення необхідної робочої площі A формула трансформується наступним чином

$$A = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{ген.}}} \quad (2.2)$$

За умови, що середньорічна швидкість вітру становить $v = 4$ м/с, розрахункова площа ометання для досягнення номінальної потужності у 600 Вт (згідно з вимогами технічного завдання) має бути наступною:

$$A = \frac{2 \cdot 600}{1,225 \cdot 4^3 \cdot 0,18 \cdot 0,85} = \frac{1200}{11,99} = 100 \text{ м}^2.$$

Такий результат вказує на технічну недоцільність проектування установки під номінальну потужність при мінімальних швидкостях вітру, оскільки габарити ротора (10 x 10 м) будуть надмірними для приватного домоволодіння.

Згідно із загальноприйнятою світовою практикою проектування вітроенергетичних установок (ВЕУ), досягнення номінальних показників потужності зазвичай передбачається в діапазоні швидкостей вітру 10 – 12 м/с. Виходячи з цих стандартів, було проведено перерахунок параметрів системи за виразом 2.2 для контрольної точки 10 м/с, результати якого наведено нижче:

$$A = \frac{2 \cdot 600}{1,225 \cdot 10^3 \cdot 0,18 \cdot 0,85} = \frac{1200}{187,4} = 6,4 \text{ м}^2.$$

Для забезпечення номінальної потужності 600 Вт при збереженні компактності установки, прийнято розрахункову площу ометання 6,4 м².

Для вертикально-осьових установок ключовим параметром є аспектне відношення AR – пропорція висоти ротора H до його діаметра D . Оптимальним для типу Савоніуса є діапазон 1,5 – 2. Для розроблюваної системи обрано $AR = 1.6$, що дозволяє ефективно використовувати швидкість вітру на висоті, зберігаючи стійкість до вібрацій. Площа ометання A для вертикального ротора обчислюється як площа прямокутника в проекції:

$$A = H \cdot D, \quad (2.3)$$

де:

A – площа ометання ротора, м²;

H – висота ротора Савоніуса, м;

D – діаметр ротора Савоніуса, м.

Оскільки висота $H = AR \cdot D$, підставляємо це у формулу площі 2.3, тоді отримаємо, що:

$$A = (AR \cdot D) \cdot D = AR \cdot D^2. \quad (2.4)$$

Тоді за виразом 2.3 та 2.4 діаметр D та висота H ротора будуть дорівнювати значенню:

$$D = \sqrt{\frac{A}{AR}} = \sqrt{\frac{6,4}{1,6}} = \sqrt{4} = 2 \text{ м};$$

$$H = AR \cdot D = 1,6 \cdot 2 = 3,2 \text{ м}.$$

Для реалізації проектної площі ометання пропонується вертикально-

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

осьова конструкція в одно- або двоярусному виконанні. Зупинимо свій вибір на другому варіанті.

Вибір двоярусної конфігурації замість класичного одноярусного ротора обумовлений необхідністю досягнення високої експлуатаційної надійності та стабільності енерговиробництва. Це рішення базується на наступних інженерних чинниках.

По-перше, така конструкція забезпечує стабільність пуску та ліквідацію «мертвих зон». На відміну від одноярусного ротора, де крутний момент суттєво залежить від кута атаки вітру, два яруси із фазовим зсувом у 90° гарантують, що лопаті завжди перебуватимуть у зоні максимального тиску повітря. Це забезпечує впевнений самозапуск установки навіть при слабкому вітрі та рівномірне обертання без пульсацій моменту.

По-друге, реалізується механічна стійкість та ефективне віброгасіння. З огляду на значні габарити установки ($H = 3,2$ м, $D = 2$ м), розподіл вітрового навантаження на два окремі сегменти дозволяє ефективно згладжувати механічні імпульси. Почергове «підхоплення» повітряного потоку ярусами знижує амплітуду коливань, що мінімізує втому підшипникових вузлів та динамічний вплив на щоглу.

По-третє, розділення ротора сприяє підвищенню жорсткості конструкції. Така схема дозволяє інтегрувати проміжну опору або диск жорсткості безпосередньо по центру вала. Це є критично важливим для запобігання деформаціям на вигин та усунення ризику виникнення резонансу під час штормових поривів або при високих обертах.

Нарешті, двоярусна схема дозволяє максимально ефективно використовувати вертикальний градієнт вітру. Установка краще адаптована до змін швидкості потоку на висотах 5 – 8 метрів: поки верхній ярус працює в умовах стабільного ламінарного потоку, нижній ефективно компенсує приземну турбулентність, спричинену інфраструктурою ділянки. Таким чином досягається оптимальний баланс між продуктивністю та довговічністю системи.

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Оскільки розроблювана нами система буде двоярусною, то загальна висота розділяється на два рівні. Між ярусами встановлюється горизонтальна перегородка (диск), яка виконує роль ребра жорсткості та перешкоджає перетіканню повітряних мас. Висота кожного ярусу буде дорівнювати:

$$H_{\text{ярус}_1} = H_{\text{ярус}_2} = \frac{H}{2} = \frac{3,2}{2} = 1,6 \text{ м.} \quad (2.5)$$

Діаметр кожного ярусу залишається незмінним та буде рівним значенню:

$$D = D_{\text{ярус}_1} = D_{\text{ярус}_2} = 2 \text{ м.} \quad (2.6)$$

Проектування ротора Савоніуса потребує деталізації розмірів його функціональних елементів, зокрема напівциліндричних лопатей («ковшів»). Ключовим аспектом є розрахунок діаметра лопаті d з урахуванням коефіцієнта перекриття, який забезпечує перетікання потоку.

Для визначення розміру лопаті використовується залежність від зовнішнього діаметра ротора D :

$$d = \frac{D}{1 + (1 - e)}, \quad (2.7)$$

де:

e – відносне перекриття (приймається в діапазоні 0.15 – 0.2).

Отже, при заданому діаметрі ротора $D = 2$ м, діаметр кожної лопаті становить:

$$d = \frac{2}{1 + (1 - 0,175)} = 1,1 \text{ м.}$$

Тепер визначимо величину перекриття – центральний зазор, через який

повітря перетікає з навітряної лопаті на підвітряну, створюючи додатковий тиск:

$$a = 0,15 \cdot d, \quad (2.8)$$

де:

a – величина центрального зазору (перекриття), м.

Отримаємо:

$$a = 0,15 \cdot 1,1 = 0,165 \text{ м} = 16,5 \text{ см.}$$

Для стабільної роботи та полегшення самозапуску в даній роботі ми відмовимось від дволопатевої схеми на користь трилопатевої. Це усуває проблему нульового моменту («мертвих зон»), характерну для класичного ротора Савоніуса.

У таблиці 2.2 систематизовано підсумкові геометричні характеристики проєктованого вітрогенератора на базі ротора Савоніуса.

Таблиця 2.2 – Геометричні характери проєктованого двоярусного вітрогенератора з ротором Савоніуса

ПАРАМЕТР	ПАРАМЕТР	ПРИМІТКА
Загальна площа (A)	6,4 м ²	Вихідна розрахункова величина
Загальна висота (H)	3,2 м	Сумарна висота двох ярусів
Зовнішній діаметр (D)	2 м	Максимальний розмах лопатей
Висота ярусу (h)	1.6 м	Висота одного ярусу
Зсув ярусів	90°	Кут розвороту верхнього ярусу до нижнього
Тип профілю	Напівциліндр	Класична форма лопаті Савоніуса
Кількість лопатей	Три	-----

З огляду на кубічну залежність потужності від швидкості вітру, середньостатистичні показники Житомирського регіону (4 м/с) забезпечують реальну генерацію двоярусного ротора Савоніуса на рівні 100 – 120 Вт·год.

Обрана двоярусна конфігурація виступає оптимальним інструментом для безперервної акумуляції енергії, досягаючи номінальних 600 Вт лише в періоди проходження інтенсивних повітряних мас. Таким чином, систему доцільно класифікувати не як джерело живлення для високопотужних споживачів у реальному часі, а як установку для стабільного добового поповнення енергозапасу.

2.3 Обґрунтування матеріаловибору та розрахунок маси конструкції

Для конструкції двоярусного ротора Савоніуса ($D = 2$ м, $H = 3,2$ м) на щоглі заввишки 8 м рекомендовано сталь марки Ст3сп. Вибір цього матеріалу забезпечує високу жорсткість системи та мінімізує ризик вібраційних деформацій завдяки значному модулю пружності сталі.

Згідно з конструктивними характеристиками та геометричних параметрами нашого вітрогенератора Савоніуса, його ротор є двоярусним ($H_{\text{ярус}_\text{п}} = 1,6$ м) із трьома лопатями на кожному ярусі. При зовнішньому діаметрі ротора $D = 2$ м та величині перекриття $a = 0,165$ м, розрахунковий діаметр кожної напівциліндричної лопаті становить $d = 1,1$ м.

Розрахуємо довжину дуги розгортки однієї лопаті нашого вітрогенератора:

$$L = \frac{\pi \cdot d}{2}, \quad (2.9)$$

де:

L – довжина дуги розгортки однієї лопаті, м;

d – діаметр кожної напівциліндричної лопаті, м.

Отримаємо, що:

$$L = \frac{3,14 \cdot 1,1}{2} = 1,73 \text{ м.}$$

Далі визначимо сумарну площу поверхні шести лопатей (два яруси):

$$S_{\Sigma} = 6 \cdot L \cdot H_{\text{ярус_п}} , \quad (2.10)$$

де:

S_{Σ} – сумарна площа поверхні шести лопатей вітрогенератора, м²;

$H_{\text{ярус_п}}$ – висота лопаті в кожному ярусі розроблюваного вітрогенератора, м.

Матимемо наступний результат:

$$S_{\Sigma} = 6 \cdot 1,73 \cdot 1,6 = 16,6 \text{ м}^2.$$

Для забезпечення необхідної жорсткості лопатей діаметром 1,1 м обрано листову сталь завтовшки 1,5 мм. З урахуванням густини матеріалу ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$), розрахункова маса лопатей становить:

$$m_{\text{л_заг}} = S_{\Sigma} \cdot \delta \cdot \rho , \quad (2.11)$$

де:

$m_{\text{л_заг}}$ – загальна маса всіх шести лопатей вітрогенератора, кг;

δ – товщина листової сталі, м;

ρ – густина сталі, кг/м³.

В результаті матимемо, що:

$$m_{\text{л_заг}} = 16,6 \cdot 0,0015 \cdot 7850 = 195,5 \text{ кг.}$$

Вузол кріплення лопатей реалізовано за допомогою трьох опорних дисків діаметром 2 м. Площа дисків, за вирахуванням площі перерізу отворів для встановлення вала, складає:

$$S_{\text{Дисків}} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{Диск}}^2}{4}, \quad (2.12)$$

де:

$S_{\text{Дисків}}$ – загальна площа трьох опорних дисків, м²;

$D_{\text{Диск}}^2$ – діаметр одного опорного диску, м.

За виразом 2.12 матимемо:

$$S_{\text{Дисків}} = 3 \cdot \frac{3,14 \cdot 2}{4} = 9,42 \text{ м}^2.$$

З огляду на дію динамічних навантажень, для виготовлення дисків обрано сталевий лист завтовшки 3 мм, що забезпечує необхідний запас міцності. Визначимо загальну масу дисків:

$$m_{\text{Д-заг}} = S_{\text{Дисків}} \cdot \delta \cdot \rho, \quad (2.13)$$

де:

$m_{\text{Д-заг}}$ – загальна маса всіх трьох опорних дисків, кг;

δ – товщина листової сталі, м;

ρ – густина сталі, кг/м³.

Отримаємо, що:

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
						30
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m_{\text{д.заг}} = 9,42 \cdot 0,003 \cdot 7850 = 221,8 \text{ кг.}$$

Роль центрального вала ротора буде виконувати сталеві безшовна труба зовнішнім діаметром 70 мм, товщиною стінки 6 мм та довжиною 3,5 м. Визначимо його вагу. Для цього спочатку розрахуємо площу поперечного перерізу труби, з якої буде виконано вал:

$$S_{\text{Вала}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{Вала}}^2 - (D_{\text{Вала}} - 2 \cdot s)^2), \quad (2.14)$$

де:

$S_{\text{Вала}}$ – площа поперечного перерізу труби вала, м²;

$D_{\text{Вала}}$ – зовнішній діаметр вала, м;

s – товщина стінки труби вала, м.

Матимемо, що:

$$S_{\text{Вала}} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,07^2 - (0,07 - 2 \cdot 0,006)^2) = 0,001206 \text{ м}^2.$$

Тепер обчислимо об'єм металу:

$$V = S_{\text{Вала}} \cdot L_{\text{Вала}}, \quad (2.15)$$

де:

V – об'єм металу з якого виготовлено вал вітрогенератора, м³;

$S_{\text{Вала}}$ – площа поперечного перерізу труби вала, м²;

$L_{\text{Вала}}$ – довжина валу, м.

В результаті матимемо, що:

$$V = 0,001206 \cdot 3,5 = 0,004221 \text{ м}^3.$$

Тоді маса вала буде дорівнювати:

$$m_{\text{Вала}} = V \cdot \rho, \quad (2.16)$$

де:

$m_{\text{Вала}}$ – загальна маса валу вітрогенератора, кг;

V – об’єм металу з якого виготовлено вал вітрогенератора, м³;

ρ – густина сталі, кг/м³.

Отже, результат за виразом 2.16 буде наступним:

$$m_{\text{Вала}} = 0,004221 \cdot 7850 = 33,13 \text{ кг.}$$

З огляду на значний перекидний момент, що діє на ротор вітрогенератора Савоніуса при висоті щогли $H_{\text{Щогли}} = 8$ м, як опорну конструкцію обрано сталеву електрозварну трубу $\varnothing 219 \times 6$ мм (згідно з ГОСТ 10704-91). Погонна маса обраного профілю становить: $q = 31,52$ кг/м.

Визначимо загальну масу щогли нашої вітрогенераторної установки на базі ротора Савоніуса за виразом:

$$m_{\text{Щогли}} = H_{\text{щогли}} \cdot q, \quad (2.17)$$

де:

$m_{\text{Щогли}}$ – загальна маса щогли вітрогенератора, кг;

$H_{\text{щогли}}$ – висота щогли вітрогенератора, м;

q – погонна маса обраного профілю з якого виконано щоглу вітрогенератора, кг/м.

Будемо мати:

$$m_{\text{щогли}} = 8 \cdot 31,52 = 252,2 \text{ кг.}$$

В таблиці 2.3 наведено специфікацію розрахованих масових характеристик проєктованої ВЕУ.

Таблиця 2.3 – Зведена специфікація масових характеристик ВЕУ Савоніуса

ЕЛЕМЕНТ КОНСТРУКЦІЇ	МАТЕРІАЛ / ПАРАМЕТРИ	МАСА
Лопаті (6 шт.)	Листова сталь 1,5 мм	195,5 кг
Опорні диски (3 шт.)	Листова сталь 3,0 мм	221,8 кг
Центральний вал	Сталева труба Ø 70 x 6 мм	33,13 кг

Продовження таблиці 2.3

Опорна щогла	Сталева труба Ø 219 x 6 мм	252,2 кг
Кріплення та підшипники	Сталь	45 кг
Загальна маса установки		744,63 кг

За результатами проведених розрахунків, загальна маса металоконструкції вітрогенератора становить 744,63 кг. Попри значну вагу рухомої частини (ротора) – 447,43 кг, таке інженерне рішення є обґрунтованим з огляду на міцність та аеродинамічну стабільність.

Використання листової сталі завтовшки 1,5 мм для лопатей та 3 мм для дисків забезпечує необхідний запас міцності при значній площі ротора 6,4 м². Це гарантує цілісність установки при штормових поривах вітру до 25 м/с, коли тиск на конструкцію досягає 2,5 – 3 кН, та запобігає деформації елементів під дією відцентрових сил.

Велика маса ротора надає йому властивостей маховика. Завдяки значному моменту інерції установка ефективно згладжує пульсації вітру, стабільно підтримуючи оберти при короткочасних затишшях. Крім того, масивність конструкції забезпечує низьку резонансну частоту, що мінімізує вібрації та запобігає «розкачці» щогли під час роботи.

Водночас значна вага конструкції висуває особливі вимоги до її вузлів та процесу встановлення, зокрема, необхідність витримувати осьове

навантаження у 450 кг та компенсувати перекоси валу під дією вітрового тиску зумовлює використання комбінації радіально-сферичних та упорних підшипників. Висока інерційність системи підвищує поріг старту установки до 3–4 м/с, що вимагає застосування якісних опорних вузлів з мінімальним коефіцієнтом тертя, а з огляду на загальну масу системи у 750 кг, технологія монтажу обов'язково має передбачати використання спецтехніки, як-от крана або лебідки.

2.4 Обґрунтування вибору та технічних характеристик електрогенератора

Вибір силового агрегату для проєктованої ВЕУ обумовлений специфікою ротора Савоніуса: його низькою частотою обертання, високою інерційністю маси (744,63 кг) та необхідністю забезпечення енергонезалежності приватного об'єкта побутового типу в режимі "Blackout".

Найбільш раціональним рішенням для даної системи є застосування низькообертового трифазного синхронного генератора на постійних магнітах (PMG) із прямим приводом. Відмова від механічного редуктора (мультиплікатора) є принциповою: при масі рухомої частини ротора у 447,43 кг використання зубчастих передач призвело б до суттєвих втрат ККД та швидкого зносу вузлів через значні динамічні навантаження. Прямопривідна схема суттєво підвищує надійність установки та забезпечує мінімальний момент страту, що критично важливо для Житомирського регіону з помірними швидкостями вітру.

Електричні параметри генератора підібрані з урахуванням номінальної потужності 600 Вт та необхідності компенсації пікових навантажень до 1,5 кВт (зокрема для запуску холодильного обладнання). Їх наведено нижче, в таблиці 2.4.

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
						34
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Технічні параметри електрогенератора

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ	ОБҐРУНТУВАННЯ
Номинальна потужність	0,8 – 1,0 кВт	Забезпечує запас потужності для стабільної роботи при штормових поривах вітру
Номинальна напруга	48 В (DC)	Мінімізація втрат напруги при передачі енергії кабельною лінією 15–20 м (згідно з генпланом приватного домоволодіння)
Робочий діапазон обертів	60 – 150 об/хв	Відповідає природній частоті обертання тиххідного ротора Савоніуса

Спираючись на наведені параметри, оптимальною моделлю для реалізації вертикально-осьової вітроустановки на базі ротора Савоніуса обрано аксіальний генератор Mars Rock G1000 (див. рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Конструктивна схема та внутрішня будова низькообертового генератора Mars Rock G1000 з посиленням опорним вузлом

Цей агрегат спеціально спроектований для роботи з масивними інерційними роторами. Його безщіткова конструкція на базі неодимових магнітів дозволяє ефективно генерувати енергію на низьких обертах, суттєво

подовжує міжремонтний інтервал та гарантує високу експлуатаційну надійність всієї вітроенергетичної системи.

2.5 Обґрунтування вибору та технічні характеристики MPPT-контролера

На основі розрахункової номінальної потужності нашої вітроустановки (600 Вт) та прогнозованих пікових навантажень (1,5 кВт), до системи керування висуваються підвищені вимоги щодо надійності та функціональності. Основним вузлом розподілу енергії обрано гібридний MPPT-контролер Mars Rock 2000W-48V (див. рисунок 2.4), який спеціалізується на роботі з вертикально-осьовими вітрогенераторами великої інерції.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд MPPT-контролера Mars Rock 2000W-48V

Вибір ключових характеристик контролера та конфігурації електричної мережі ВЕУ базувався на принципах надійності, мінімізації енерговтрат та захисту обладнання в екстремальних умовах:

- потужність та перевантаження: номінальна потужність контролера 2000 Вт забезпечує необхідний експлуатаційний запас для безпечної роботи під час інтенсивних повітряних потоків, коли короткочасна генерація може значно перевищувати розрахункову;
- оптимізація напруги (48 В): вибір системної напруги 48 В обумовлений розташуванням силового блоку в гаражі на відстані 20

м від щогли; це технічне рішення дозволяє у чотири рази знизити витрати в кабельній лінії порівняно з 12- вольтовими системами та оптимізувати витрати на мідні провідники;

- стійкість до високої напруги: вхідний каскад контролера витримує напругу до 150–200 В, що гарантує цілісність електроніки під час штормових поривів, коли швидкість обертання генератора неконтрольовано зростає.

Вибір моделі Mars Rock обумовлений її інтелектуальним алгоритмом роботи. Контролер дозволяє налаштувати індивідуальну криву потужності, адаптуючи відбір енергії до специфічного крутного моменту ротора Савоніуса на низьких швидкостях вітру.

Для захисту масивного ротора вагою 447 кг передбачено систему інтелектуального ШІМ-гальмування. У разі повного заряду акумуляторів або досягнення критичних обертів, контролер плавно підключає зовнішні баластні резистори. Це забезпечує безінерційну зупинку системи без різких механічних ударів, що є критично важливим для довговічності підшипникових вузлів та цілісності щогли.

Основні технічні характеристики та підсумкова специфікація контролера Mars Rock 2000W-48V наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – технічні характеристики та специфікація контролера Mars Rock 2000W-48V

ПАРАМЕТР	ХАРАКТЕРИСТИКА
Тип пристрою	Гібридний MPPT (Вітер + Сонце)
Максимальний струм заряду	40 А
Режим захисту	Автоматичне електромагнітне гальмування (PWM)
Типи сумісних АКБ	LiFePO ₄ , AGM, GEL, Lead-acid
Охолодження	Комбіноване (пасивний радіатор + активний вентилятор)
Комунікації	LCD-дисплей, інтерфейс RS485 для віддаленого моніторингу

2.6 Розрахунок та обґрунтування вибору параметрів акумуляторного модуля

Відповідно до технічного завдання, середньодобовий обсяг енергоспоживання приватного житлового об'єкта становить 4 – 6 кВт·год. Враховуючи циклічний характер вітрової активності в Житомирській області, система накопичення повинна гарантувати автономну роботу критичного навантаження протягом 12 – 18 годин у періоди аварійного відключення електропостачання або блекауту.

Для реалізації розроблюваної в даному дипломному проєкті системи обрано літій-залізо-фосфатну технологію (LiFePO₄). Цей вибір обумовлений високим ресурсом (понад 3000 циклів розряду/заряду), можливістю глибокого розряду (до 90%) без втрати ємності та здатністю стабільно витримувати високі пускові струми, що виникають під час роботи інверторного обладнання.

Для забезпечення енергетичного резерву на рівні 5 кВт·год при системній напрузі 48 В, розрахункова ємність акумуляторного блоку Q_{Ah} становитиме:

$$Q_{Ah} = \frac{E_{\text{спожив.}}}{U_{BEU} \cdot \varepsilon}, \quad (2.18)$$

де:

Q_{Ah} – розрахункова електрична ємність блоку акумуляторних батарей, А·год.;

$E_{\text{спожив.}}$ – необхідний запас енергії (енергоспоживання), Вт·год.;

U_{BEU} – номінальна напруга системи вітрогенераторної установки на базі ротора Савоніуса, В;

ε – коефіцієнт глибини розряду.

Тоді отримаємо, що:

$$Q_{Ah} = \frac{5000}{48 \cdot 0,9} = 115 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

З огляду на сучасні галузеві стандарти та необхідність раціонального використання площі технічного приміщення, для системи накопичення енергії обрано літій-залізо-фосфатний акумуляторний модуль Deye SE-G5.1 Pro (48 В / 100 А·год.). Обрану модель зображено на рисунку 2.5.

Технічні переваги обраного нами рішення полягають в наступному:
висока енергоємність: використання даної моделі забезпечує сумарний запас енергії у 5,12 кВт·год, що повністю покриває потреби об'єкта в автономному живленні критично важливого обладнання;

- система керування та безпеки: вбудована інтелектуальна система BMS (Battery Management System) забезпечує балансування комірок, захист від перевантаження та глибокого розряду, що гарантує тривалий термін експлуатації (понад 6000 циклів);
- стійкість до пікових навантажень: батарея характеризується високою здатністю до струмовіддачі, що є критичним фактором для стабільної компенсації пікових навантажень потужністю до 1,5 кВт;
- енергетична буферизація: наявний запас енергії дозволяє ефективно нівелювати стохастичний характер вітрового навантаження, забезпечуючи стабільну вихідну напругу системи незалежно від миттєвої швидкості вітру.



					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд акумуляторного модуля Deye SE-G5.1 Pro
(48 В / 100 А·год.)

2.7 Розрахунок параметрів лінії передачі електроенергії

Ефективність роботи ВЕУ значною мірою залежить від мінімізації втрат у провідниках на 20-метровій ділянці від генератора до контролера. Розрахунок параметрів лінії базується на забезпеченні пікової потужності системи у 1500 Вт при номінальній напрузі 48 В, що зумовлює максимальну силу струму I на рівні 31,25 А.

Основним критерієм проектування є обмеження падіння напруги значенням до 3% (що становить не більше 1,44 В). Для визначення оптимальної площі перерізу мідного провідника $S_{\text{ЛЕП}}$ використовується питомий опір міді $\rho_{\text{міді}} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, що дозволяє гарантувати енергоефективність системи згідно з генпланом. Отже будемо мати, що:

$$S_{\text{ЛЕП}} = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \rho_{\text{міді}}}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 31,25 \cdot 0,0175}{1,44} = 15,2 \text{ мм}^2. \quad (2.19)$$

Згідно з чинними стандартами (ДСТУ), для монтажу оберемо мідний багатожильний кабель (типу ПВ-3 або КГтп) перерізом 16 мм². Багатожильна структура забезпечує необхідну вібростійкість кабелю в місцях кріплення до щогли.

Прокладання лінії передбачено підземним способом у захисній гофрованій трубі з ПНД (поліетилен низького тиску), що гарантує захист від механічних пошкоджень та впливу зовнішнього середовища.

2.8 Обґрунтування вибору інверторного обладнання та системи АВР

Для забезпечення коректної роботи споживачів, що мають у своєму складі електродвигуни (циркуляційні насоси системи опалення та компресор холодильного обладнання), ключовою вимогою до інвертора є генерація вихідної напруги з чистою синусоїдою. Це гарантує стабільність роботи автоматики газового котла та запобігає перегріву обмоток двигунів.

Згідно з ТЗ, при номінальному навантаженні 0,6 кВт, інвертор повинен витримувати пікові потужності до 1,5 – 2,0 кВт. Окрему увагу приділено пусковим струмам холодильника, що вимагає від пристрою здатності до короткочасного перевантаження до 3,0 кВт. Оптимальним рішенням для даної системи обрано професійний інвертор-зарядний пристрій Victron Energy MultiPlus 48/2000/25 (див. рисунок 2.6).

Основними перевагами даної моделі є:

- інтелектуальне керування енергією: функція PowerAssist дозволяє системі тимчасово компенсувати дефіцит потужності мережі шляхом додавання енергії з акумуляторів LiFePO₄;
- енергоефективність: високий ККД (до 95%) та мінімальні втрати на власні потреби;
- комплексний захист: вбудовані системи захисту від короткого замикання, перевантаження та перегріву забезпечують довговічність силової частини.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд інвертор-зарядного пристрою Victron Energy MultiPlus 48/2000/25

Повний перелік експлуатаційних показників та ключових компонентів інвертор-зарядного пристрою, що формують його остаточну конфігурацію, наведено у зведеній специфікації (див. табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики інвертор-зарядного пристрою Victron Energy MultiPlus 48/2000/25

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ / ХАРАКТЕРИСТИКА
Номінальна вхідна напруга	48 В (DC)
Вихідна потужність (25°C)	2000 ВА / 1600 Вт
Пікова потужність	3500 Вт
Форма вихідного сигналу	Чиста синусоїда (Pure Sine Wave)
Час перемикання АВР	< 20 мс (UPS mode)

Для забезпечення безперебійної життєдіяльності об'єкта в умовах «Blackout» передбачено систему автоматичного введення резерву (АВР). В обраному інверторі Victron MultiPlus реалізовано інтегроване рішення: високошвидкісне реле перемикання з часом спрацювання менше 20 мс. Це дозволяє системі функціонувати в режимі джерела безперебійного живлення (ДБЖ), що виключає перезавантаження інформаційно-комунікаційного вузла (Wi-Fi роутерів, систем відеоспостереження) при зникненні зовнішньої напруги.

Для забезпечення додаткового рівня експлуатаційної безпеки та можливості повної гальванічної розв'язки, система може бути доукомплектована зовнішнім двопозиційним перемикачем типу Tomzn TOQ5-100/4P (63-100 A) (див. рисунок 2.7), що монтується на DIN-рейку в розподільчому щиту технічного приміщення.



*Рисунок 2.7 – Загальний вигляд пристрою АВР типу Tomzn TOQ5-100/4P
(63-100 A)*

**З ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА
РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОЄКТУ**

3.1 Структура капітальних вкладень

Реалізація системи резервного живлення на базі ротора Савоніуса потребує чіткого аналізу капітальних вкладень, що охоплюють усі етапи: від закупівлі сировини до пусконаладжувальних робіт. Особливістю даного проєкту є висока частка витрат на систему накопичення енергії та інтелектуальне інверторне обладнання, що зумовлено вимогою високої надійності в режимі «Blackout».

Загальні витрати на створення установки можна розділити на три основні блоки: силове електротехнічне обладнання, матеріали для виготовлення механічної частини та вартість монтажно-технічних робіт.

У таблиці 3.1 наведено деталізований перелік витрат, сформований на основі специфікацій, наведених у розділі 2.

Таблиця 3.1 – Специфікація витрат на основні компоненти системи

Найменування компонента	Кількість	Орієнтовна ціна за од., грн.	Загальна вартість, грн.
1	2	3	4
Силове обладнання:			
Генератор Mars Rock G1000 (PMG)	1 шт.	18500	18500
Контролер Mars Rock 2000W-48V	1 шт.	9200	9200
АКБ Deye SE-G5.1 Pro (5.12 кВт·год)	1 шт.	54000	54000
Інвертор Victron MultiPlus 48/2000/25	1 шт.	38500	38500
Пристрій АВР Tomzn TOQ5-100/4P	1 шт.	1800	1800

Продовження таблиці 3.1				ДП.141.043.022.ПЗ			
Зм.	Арк.	Найменування компонента	Підпис	Дата	Кількість	Орієнтовна ціна за од., грн.	Загальна вартість, грн.
Розробив	Комп'ютер	1					Літ. 443
Перевір	Античук Б.О.				34	ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ	Аркушів 60
				ТА РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ДП.141.043.022.ПЗ			
Н. Контр.	Античук Б.О.				КАТФК, Гр. Е-43		Аркушів 44
Зам.	Арк.	Гнатюк О.Ф.	Підпис	Дата			

Металоконструкція та матеріали:			
Сталь (лопаті, диски, вал, щогла)	745 кг	45 (грн/кг)	33525
Підшипникові вузли, кріплення	1 компл.	4500	4500
Кабель мідний ПВ-3 16 mm ²	40 м	120	4800
Захисна гофра, щитове обладнання	1 компл.	3500	3500
Разом:			168325

Витрати на реалізацію проєкту також включають зварювальні роботи, антикорозійне покриття (цинкування або фарбування) та монтаж із залученням спецтехніки:

- виготовлення металоконструкції (зварювання, балансування): 25% від вартості металу становить близько 8400 грн.;
- антикорозійне покриття: 3000 грн.;
- фундаментні роботи (бетон, арматура): 6500 грн.;
- монтажні роботи та оренда автокрана: 12000 грн.

Визначимо сумарні капітальні вкладення K_{Σ} за формулою наведеною нижче:

$$K_{\Sigma} = C_{\text{мат.}} + C_{\text{роб.}} + C_{\text{тр.}}, \quad (3.1)$$

де:

$C_{\text{мат.}}$ – вартість обладнання та матеріалів, грн.;

$C_{\text{роб.}}$ – вартість робіт, яка становить 29900 грн.;

$C_{\text{тр.}}$ – транспортні та непередбачувані витрати, приймають 5% від загальної вартості, що становить близько 9900 грн.

Тоді за виразом 3.1 отримаємо, що:

$$K_{\Sigma} = 168325 + 29900 + 9900 = 208125 \text{ грн.}$$

3.2 Аналіз витрат на функціонування та собівартості енергії

Експлуатаційні витрати $C_{\text{експ}}$ для вітроенергетичної установки на базі ротора Савоніуса характеризуються низькими показниками порівняно з паливними генераторами, оскільки первинний енергоресурс (вітер) є безкоштовним. Проте життєвий цикл системи передбачає витрати на технічне обслуговування та амортизаційні відрахування для відновлення основних фондів.

Сумарні річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$C_{\text{річ.}} = C_{\text{обл.}} + C_{\text{аморт.}} + C_{\text{непередбач.}}, \quad (3.2)$$

де:

$C_{\text{обл.}}$ – витрати на технічне обслуговування та регламентні роботи, грн.;

$C_{\text{аморт.}}$ – амортизаційні відрахування, грн.;

$C_{\text{непередбач.}}$ – непередбачувані витрати (резервний фонд), грн.

З огляду на значну масу ротора (447 кг) та висоту щогли, надійність системи залежить від регулярного сервісу механічних вузлів. Програма обслуговування включає:

- змащування опорних вузлів: дворазова ревізія радіально-сферичних підшипників (перед зимовим та літнім сезонами);
- механічний контроль: інспекція зварних швів, болтових з'єднань та натягу щогли після періодів штормових вітрів;
- аеродинамічна гігієна: очищення поверхонь лопатей від пилу, бруду та обледеніння для підтримання стабільного коефіцієнта використання енергії вітру;
- електротехнічний моніторинг: перевірка цілісності контактних груп, діагностика роботи інвертора та балансування комірок АКБ за допомогою інтегрованої системи BMS.

З огляду на все вище зазначене, сумарні річні витрати на технічне обслуговування та регламентні роботи оцінюються у суму рівну близько 2500 грн./рік.

Амортизаційні відрахування розраховуються на основі середнього терміну експлуатації ключових компонентів:

- металоконструкція та генератор: 20 років;
- електронне обладнання (інвертор, контролер): 10 – 12 років;
- накопичувач енергії (LiFePO4): 10 – 15 років (понад 6000 циклів).

Прийнявши середній коефіцієнт амортизації на рівні 7% від загальних капітальних вкладень, маємо:

$$C_{\text{аморт.}} = 0,07 \cdot K_{\Sigma} = 0,07 \cdot 208125 = 14568 \text{ грн./рік.} \quad (3.3)$$

Непередбачувані витрати – це фінансовий «буфер» на випадок подій, які неможливо точно спрогнозувати графіком обслуговування. У кошторисах цей показник зазвичай становить 5 – 10% від суми перших двох компонентів.

Сюди входять:

- дрібний аварійний ремонт: заміна запобіжників, реле або датчиків, що передчасно вийшли з ладу;
- наслідки стихійних явищ: усунення незначних пошкоджень після аномально сильних штормів, які перевищують розрахункові навантаження;
- транспортні витрати: термінова доставка запчастин або виїзд спеціаліста у разі раптової зупинки системи.

Розрахуємо даний тип витрат за виразом:

$$C_{\text{непередбач.}} = 0,07 \cdot (C_{\text{обл.}} + C_{\text{аморт.}}). \quad (3.4)$$

Матимемо, що:

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$C_{\text{непередбач.}} = 0,07 \cdot (2500 + 14568) = 1195 \text{ грн./рік.}$$

Таким чином, у відповідності до виразу 3.2 сумарні річні експлуатаційні витрати становитимуть:

$$C_{\text{річ.}} = 2500 + 14568 + 1195 = 18263 \text{ грн./рік.}$$

Для об'єктивної оцінки ефективності функціонування проведемо порівняльний аналіз витрат розробленої нами ВЕУ та бензинового генератора аналогічної потужності при забезпеченні річного виробітку в обсязі 1050 кВт·год. (див. таблицю 3.2)

Таблиця 3.2 – Порівняння річних операційних витрат

Стаття витрат	ВЕУ Савоніуса (проект)	Бензиновий генератор (2 кВт)
Паливо / Ресурс вітру	0 грн.	26250 грн (при 0,5 л/кВт·год.)
Технічне обслуговування	2500 грн.	4000 грн. (мастило, фільтри, свічки)
Амортизація та ремонт	14568 грн.	5 500 грн. (витрата моторесурсу)
Непередбачувані витрати	1195 грн.	665 грн.
РАЗОМ ЗА РІК	18263 грн.	36415 грн.

Для об'єктивної оцінки економічної ефективності вітроенергетичної установки (ВЕУ) використовується міжнародний показник LCOE (Levelized Cost of Energy). Він відображає середню розрахункову собівартість одиниці електричної енергії за весь життєвий цикл об'єкта, враховуючи як початкові інвестиції, так і майбутні витрати на експлуатацію.

Розрахунок базується на прогнозованому терміні служби системи у 15 років, що відповідає ресурсу літій-залізо-фосфатних акумуляторів (при 6000 циклах) та механічної частини ротора Савоніуса.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

48

Сукупні витрати складаються з капітальних вкладень K_{Σ} та щорічних експлуатаційних витрат $C_{\text{річ.}}$, помножених на термін експлуатації n :

$$L_{C_{\text{витрати}}} = K_{\Sigma} + (C_{\text{річ.}} \cdot n) = 208125 + (18263 \cdot 15) = 482070 \text{ грн.} \quad (3.5)$$

Виходячи з розрахункової річної генерації в 1050 кВт·год (згідно з вітровим потенціалом Житомирської області та ККД ротора), сумарний обсяг генерації електроенергії E_{max} розробленої нами ВЕУ становитиме:

$$E_{\text{max.}} = E_{\text{рік}} \cdot n, \quad (3.6)$$

де:

$E_{\text{рік}}$ – генерація електроенергії за рік розробленою ВЕУ, кВт·год.;

n – термін експлуатації ВЕУ, роки.

Таким чином, за виразом 3.5 будемо мати, що:

$$E_{\text{max.}} = 1050 \cdot 15 = 15750 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Тепер визначимо середню розрахункову собівартість одиниці електричної енергії L_{COE} за весь життєвий цикл нашого розробленого вітрогенератора на базі ротора Савоніуса за виразом:

$$L_{\text{COE}} = \frac{L_{C_{\text{витрати}}}}{E_{\text{max.}}} = \frac{482070}{15750} = 30,6 \text{ грн./кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.7)$$

Отримане значення 30,6 грн./кВт·год. є ключовим індикатором для порівняння ефективності системи. Попри те, що цей показник вищий за державний тариф (4,32 грн.), це лише підтверджує, що ВЕУ малої потужності

слід розглядати не як комерційний інструмент для продажу енергії, а як засіб забезпечення енергетичної автономії.

Водночас у порівнянні з іншими джерелами резервного живлення собівартість енергії ВЕУ є майже вдвічі нижчою за енергію бензинових генераторів (45 – 55 грн./кВт·год). Це доводить, що використання вітру є економічно вигіднішим рішенням, ніж тривале спалювання палива у двигунах внутрішнього згорання.

3.3 Розрахунок терміну окупності системи

Термін окупності проекту визначається як період, за який чистий дохід (або заощадження) від експлуатації установки повністю покриває початкові інвестиції.

Оскільки основною функцією системи є заміщення паливного генератора під час аварійних відключень мережі (режим "Blackout"), розрахунок проводиться відносно витрат на паливо та обслуговування бензинового аналога.

Для проведення розрахунку економічної ефективності проекту за основу взято загальні капітальні вкладення у розмірі $K_{\Sigma} = 208125$ грн. Економічний ефект формується за рахунок річної вартості заміщеної енергії $\Delta S = 47250$ грн., що відповідає вартості 1050 кВт·год електроенергії, виробленої бензиновим генератором за тарифом 45 грн./кВт·год. При цьому враховуються щорічні реальні витрати на сервісне обслуговування ВЕУ в сумі $C_{\text{обл.}} = 2500$ грн., без урахування амортизації для коректного визначення терміну повернення живих коштів.

Формула для розрахунку терміну окупності наведена нижче:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\Sigma}}{\Delta S - C_{\text{обл.}}} = \frac{208125}{47250 - 2500} = 4,65 \text{ років.} \quad (3.8)$$

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

4.1 Загальні положення та системний аналіз виробничих ризиків

Забезпечення безпечних умов експлуатації вітроенергетичної установки на базі ротора Савоніуса вимагає глибокого аналізу потенційних небезпек, притаманних об'єктам з великою рухомою масою та високим вертикальним розташуванням функціональних вузлів. Основним джерелом механічної загрози є значний інерційний момент ротора, сумарна вага якого у поєднанні з лопатями, опорними дисками та центральним валом складає майже половину тонни. Такий масивний об'єкт, навіть при низьких частотах обертання, накопичує величезну кінетичну енергію, що робить будь-який випадковий контакт із рухомими частинами фатальним. Враховуючи специфіку об'єкта, що розташований у зоні щільної приватної забудови м. Житомира, заходи безпеки розповсюджуються не лише на персонал, що безпосередньо обслуговує систему, а й на цілісність навколишньої інфраструктури та цивільних осіб.

Окремим критичним чинником ризику є висотний характер конструкції, оскільки щогла висотою вісім метрів створює значне важельне плече та перекидний момент під дією вітрового тиску, що вимагає безперервного контролю за цілісністю фундаменту, станом анкерних кріплень та відсутністю втомних деформацій у металі опорної колони.

4.2 Технічні заходи безпеки під час монтажу та висотних робіт

Процес встановлення щогли та інтеграції двоярусного ротора належить до категорії робіт з підвищеною небезпечкою, що зумовлює обов'язкове

					ДП.141.043.022.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Гришук О.Г.				У	50	60
Перевір		Антипчук Б.О.						
Н. Контр.		Антипчук Б.О.						
Затв.		Гнатюк О.Ф.						
						ЖАТФК, Гр. Е-43стн		

використання спеціалізованої підйомної техніки та суворе дотримання технологічної карти монтажу.

Категорично забороняється проведення складальних операцій силами персоналу без застосування сертифікованих лебідок, талів або кранів-маніпуляторів, оскільки спроби ручного маніпулювання такими масами неминуче призводять до порушення рівноваги конструкції та важкого травматизму.

Будь-яке сервісне втручання на висоті, що перевищує півтора метра від рівня поверхні – зокрема регламентне змашування верхніх підшипникових вузлів або інспекція кріплень сталевих лопатей – має супроводжуватися використанням повного комплекту індивідуальних засобів захисту. Працівник зобов'язаний застосовувати професійний запобіжний пояс із надійною двоточною фіксацією до силових елементів щогли, при цьому використання касок та захисних окулярів є обов'язковим.

Робоча зона в радіусі десяти метрів під установкою під час робіт має бути чітко огорожена сигнальною стрічкою для запобігання випадковому травмуванню людей у разі падіння монтажних інструментів чи кріпильних елементів.

4.3 Електробезпека та комплексний захист від атмосферних розрядів

Попри використання у первинному ланцюзі відносно низької напруги постійного струму в сорок вісім вольт, енергосистема ВЕУ становить суттєву електричну небезпеку через екстремально велику ємність акумуляторного блоку та значні струми короткого замикання, які можуть миттєво розплавити провідники.

Захист від ураження струмом та виникнення дугових розрядів реалізується через ретельну багатошарову ізоляцію всіх струмопровідних частин та використання герметичних діелектричних кабельних каналів, що

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

повністю виключають потрапляння вологи чи конденсату в силову шафу. Система заземлення відіграє критичну роль у загальній безпеці об'єкта, виконуючи функцію первинного блискавковідводу для всього домоволодіння.

Оскільки сталева щогла вітрогенератора є домінуючою висотою на ділянці, вона підключається до окремого контуру заземлення з нормованим опором не більше чотирьох Ом. Це гарантує миттєве та безпечне відведення енергії атмосферного розряду в глибинні шари ґрунту, що запобігає не лише ураженню людей, а й електромагнітному руйнуванню чутливої мікропроцесорної автоматики контролера Mars Rock та інвертора Victron.

4.4 Забезпечення пожежної безпеки та норми експлуатації накопичувачів енергії

Розміщення потужного силового обладнання та літій-залізо-фосфатних акумуляторів у закритому приміщенні господарського приміщення вимагає суворого дотримання протипожежних норм та правил облаштування електроустановок. Основна пожежна небезпека в цій зоні пов'язана з можливим термічним розгоном у ланцюгах накопичення енергії при послабленні затискних клем або порушенні режимів заряду.

Технічне приміщення повинно бути обладнане ефективною системою природної або примусової вентиляції для підтримання стабільного теплового балансу, оскільки накопичення тепла від радіаторів інвертора може призвести до критичного підвищення температури електроліту в акумуляторах.

У безпосередній близькості до енергетичного вузла в обов'язковому порядку розміщується вуглекислотний вогнегасник відповідного класу. Використання вогнегасників саме такого типу є пріоритетним, адже вони дозволяють ліквідувати локальне займання безпосередньо під напругою, не

створюючи загрози для життя оператора та не завдаючи незворотної шкоди електронним платам керування через хімічну агресивність гасних речовин.

4.5 Системи аварійного гальмування та регламент безпечного сервісу

Надійність та безпека функціонування масивного ротора Савоніуса в умовах екстремальних метеорологічних викликів гарантується інтегрованою системою багаторівневого гальмування.

У разі отримання штормового попередження, виявлення ознак дисбалансу або появи нехарактерних звуків у підшипниках, оператор зобов'язаний негайно ініціювати примусову зупинку системи через програмний інтерфейс контролера. Блокування обертів шляхом короткого замикання фаз генератора на баластні резистори дозволяє швидко та плавно поглинути кінетичну енергію ротора, переводячи її в теплове розсіювання.

Перед початком будь-яких маніпуляцій, що передбачають безпосередній фізичний доступ до лопатей чи вала, конструкція має бути додатково зафіксована механічним стопорним пальцем у нижній частині щогли. Такий захід безпеки є фундаментальним, оскільки він повністю унеможливорює самовільний запуск чи випадковий проворот п'ятисоткілограмової конструкції під дією раптового пориву вітру, гарантуючи абсолютну безпеку кінцівок та інструментів технічного персоналу під час проведення регламентних робіт.

4.6 Алгоритми надання першої долікарської допомоги при аварійних ситуаціях

Ефективність заходів з охорони праці визначається не лише технічними засобами захисту, а й готовністю персоналу до надання екстреної допомоги у разі виникнення нещасного випадку. Специфіка роботи з вітрогенератором Савоніуса передбачає два основні типи ризиків: механічне травмування та

ураження електричним струмом. У випадку отримання механічних пошкоджень внаслідок контакту з масивним ротором, першочерговим завданням є негайна зупинка кровотечі за допомогою тисних пов'язок або джгутів та надійна іммобілізація уражених кінцівок. З огляду на велику масу конструкції, особливу увагу слід приділяти виявленню ознак здавлювання тканин та забезпеченню спокою потерпілого до прибуття кваліфікованих медичних працівників.

При виникненні ситуації з ураженням електричним струмом, алгоритм дій починається з безпечного відключення джерела напруги. Оскільки система містить потужний акумуляторний блок, який неможливо вимкнути миттєво лише рубильником мережі, рятувальник повинен використовувати діелектричні предмети для від'єднання потерпілого від струмопровідних частин. Після звільнення потерпілого від дії струму необхідно миттєво оцінити стан життєво важливих функцій – дихання та серцебиття. У разі їх відсутності невідкладно розпочинається проведення серцево-легеневої реанімації.

Важливо враховувати, що навіть при задовільному самопочутті після удару струмом, потерпілий підлягає обов'язковій медичній госпіталізації для запобігання відстроченим порушенням серцевого ритму, які є типовими для травм, спричинених дією електричного потенціалу.

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту розроблено та обґрунтовано систему резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного домоволодіння в умовах Житомирської області.

Для специфічної забудови та помірного вітрового потенціалу регіону (3.8 – 4.2 м/с) обрано вертикально-осьову конструкцію, що здатна до самозапуску при низьких швидкостях повітряних потоків і має низьку чутливість до турбулентності. Проєктом визначено оптимальні параметри двоярусного ротора висотою 3.2 м та діаметром 2 м із фазовим зсувом ярусів на 90°, що забезпечує ліквідацію «мертвих зон», рівномірний крутний момент та номінальну потужність 600 Вт.

Конструкторський розрахунок підтвердив, що використання сталі СтЗсп та трилопатевої схеми загальною масою 744.63 кг забезпечує високу механічну стійкість та значну інерційність для згладжування пульсацій вітру.

Електрична частина системи, що базується на низькообертовому генераторі Mars Rock, гібридному контролері та літій-залізо-фосфатному акумуляторі Deye (5.12 кВт·год), гарантує автономну роботу критичних споживачів протягом 12 – 18 годин.

Економічний аналіз підтвердив доцільність проєкту: капітальні вкладення у розмірі 208125 грн. окупаються за 4,65 роки, а собівартість енергії 30,6 грн./кВт·год. є вдвічі нижчою за витрати на бензинову генерацію. Таким чином, розроблений проєкт є надійним, екологічним та економічно вигідним рішенням для забезпечення енергонезалежності приватних об'єктів в умовах енергетичної кризи.

					ДП.141.043.022.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розробив	Гришук О.Г.						
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	55	60
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Циганок О. В., Череп А. В. Альтернативні джерела енергії як засіб ресурсоефективності / О. В. Циганок, А. В. Череп. *Глобальні та національні проблеми економіки* : електронне фахове видання / Миколаївський нац. ун-т ім В. О. Сухомлинського. 2018. Вип. 22. С. 688–691. URL: <http://global-national.in.ua/issue-22-2018/30-vipusk-22-kviten-2018-r/3982-tsiganok-k-o-cherep-a-v-alternativni-dzherela-energiji-yak-zasib-resursoefektivnosti>
2. Типи вітрогенераторів. *Atmosfera.ua*. URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostantsii/tipivitrogeneratoriv/>.
3. Камінський Ю. Вітрогенератори для дому: види, приблизні ціни, виготовлення своїми руками / Ю. Камінський. URL: <https://cutt.ly/4e7twAi>.
4. Куц Т. Горизонтальний або вертикальний вітрогенератор? За і проти / Т. Куц. *Компанія "Концепція Енергозбереження"*. 2016. URL: <https://cutt.ly/Ge7tnGf>.
5. Миронюк Д. Вітер та сонце – разом ефективніше / Д. Миронюк. *Solarlove.org*. 2016. URL: <https://ecotown.com.ua/news/Viter-ta-sontse-razom-efektyvnishe/>.
6. Синєглазов В. М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем / В. М. Синєглазов. *Enerhodzherela.com.ua*. URL: <https://cutt.ly/ne7tUzD>.
7. Гібрид вітрогенератора і сонячних панелей. *BIP*. 2019. URL: <http://vir.uan.ua/hybrid-wind-turbineand-solar-panels/>.
8. Боровик Ю. Т., Єлагін Ю. В. Проблеми та перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні / Ю. Т. Боровик, Ю. В. Єлагін. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2019. № 65. С. 68–75.

					ДП.141.043.022.ПЗ						
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Гришук О.Г.			СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ				Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір		Антипчук Б.О.							у	56	60
									ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
Н. Контр.		Антипчук Б.О.									
Затв.		Гнатюк О.Ф.									

9. Касич А. О., Литвиненко Я. О. Чинники розвитку альтернативної енергетики у сучасних умовах / А. О. Касич, Я. О. Литвиненко. *Економіка і суспільство*. 2017. Випуск 12. С. 93–99.
10. Денисюк В. Ю., Оленіч В. С. Автономні гібридні системи енергопостачання з використанням відновлювальних джерел енергії / В. Ю. Денисюк, В. С. Оленіч. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 29–33.
11. Щур І. З., Климко В. І. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / І. З. Щур, В. І. Климко. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 2. С. 92–100. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2014_2_14
12. Український гідрометеорологічний центр. URL: <https://cutt.ly/xe7yOtD>.
13. Review about the straight-bladed vertical axis wind turbine (SBvawt) and its performance / K. Patel, Y. Sarthi, A. Tirkey, P. K. Sen. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*. 2014. Vol. 1, No. 6. P. 46-51.
14. Климко В. І., Щур І. З. Інтелектуальна система керування електропостачанням окремого об'єкта від мережі та поновлюваних джерел енергії / В. І. Климко, І. З. Щур. *Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених (25-26 жовтня, 2012 р., м. Київ). Київ, 2012. С. 25-26.
15. Основи охорони праці : підруч. для студентів вищ. навч. закладів / за ред. М. П. Гандзюка. Київ : Каравела, 2003. 408 с.
16. Кудря С. О., Будько В. І. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. І. Будько. Київ : КПІ, 2013. – 387 с.
17. Відновлювальні джерела енергії : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі.

Київ : Ін-т відновлювальної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

18. Енергетика України: об'єктивна реальність проти Стратегії 2050. Чому стратегія розвитку ВДЕ від Міненерго виглядає нереалістичною? URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/02/20/697207/>
19. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. Дніпро : НГУ, 2015. 335 с.

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ

Відділення " Інженерна інфраструктура та комп'ютерні науки "
Кафедра "Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка"
галузь знань 14 "Електрична інженерія"
спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"
освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедру
Інна НЕЗДВЕЦЬКА

“ ” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ ЗДОБУВАЧУ ОСВІТИ

Грищуку Олександрю Георгійовичу

- 1.Тема дипломного проєкту “ Розробка системи резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об'єкта побутового типу ” та керівник дипломного проєкту Антипчук Богдан Олександрович, затверджені наказом навчального закладу від 06 листопада 2025 року, №433-н.
2. Строк подання студентом проєкту “ ” _____ 2026 року.
3. Вихідні дані до роботи: генеральний план приватного домоволодіння розташованого за адресою: м. Житомир, пров. Мальовничий, 12 (локація: відкрита ділянка з садовим насадженням); тип установки: ВЕУ з вертикальною віссю обертання (тип Савоніуса); номінальна потужність ВЕУ: 600 – 800 Вт; висота щогли 6 – 8 м; режим роботи: резервний, з паралельним підключенням до мережі.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - Вступ;
 - Стан та перспективи використання вітроенергетики для автономних споживачів;
 - Система резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об'єкта побутового типу;
 - Економічне обґрунтування та розрахунок витрат на реалізацію проєкту;
 - Охорона праці та техніка безпеки;
 - Висновки.

5. Перелік візуального та графічного матеріалу:

- Схема електрична структурна. Система резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об'єкта побутового типу;
- Схема електрична принципова. Система резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об'єкта побутового типу.

6. Консультанти розділів проєкту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
Розділ 1	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
Розділ 2	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
Розділ 3	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
Розділ 4	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
Висновки	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	
ГЧ та технічна документація.	Антипчук Б. О.– викладач спеціальних дисциплін	10 листопада 2025р.	

7. Дата видачі завдання “10” листопада 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Вступ	27.11.2025р.	
2.	Розділ 1	17.12.2024р.	
3.	Розділ 2	27.01.2026р.	
4.	Розділ 3	11.03.2026р.	
5.	Розділ 4	15.04.2026р.	
8.	Висновки	11.05.2026р.	
9.	Графічна частина та технічна документація	14.05.2026р.	

Здобувач освіти: _____ Олександр ГРИЩУК

Керівник проєкту: _____ Богдан АНТИПЧУК

“ Розробка системи резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об’єкта побутового типу ”

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт складається з 60 листів пояснювальної записки, яка включає чотири розділи та графічну частину виконану на 2 листах формату А1 креслярського паперу.

У першому розділі проєкту проаналізовано сучасний стан світової вітроенергетики та проведено порівняльний огляд різних типів конструкцій вітроустановок. Обґрунтовано вибір ротора Савоніуса, як найбільш ефективного рішення для автономного живлення завдяки його роботі при низьких швидкостях вітру. Також оцінено вітропотенціал регіону та визначено енергетичні потреби споживача для подальшого проектування.

У другому розділі виконано повний інженерний розрахунок установки: визначено геометричні параметри вітроколеса, обґрунтовано вибір матеріалів та підібрано комплект обладнання (генератор, МРРТ-контролер, акумулятори інвертор та систему АВР). Розраховано лінію передачі електроенергії, що забезпечує стабільну роботу системи резервного живлення для приватного об’єкта.

Третій розділ присвячено фінансовому аналізу проєкту, де розраховано структуру капітальних інвестицій та собівартість виробленої енергії. На основі порівняння витрат на експлуатацію та вартості мережевої електрики визначено термін окупності вітроенергетичної установки.

У четвертому розділі розроблено заходи безпеки під час монтажу (висотні роботи) та експлуатації системи, зокрема електробезпеки та захисту від блискавок. Окрему увагу приділено алгоритмам пожежної безпеки накопичувачів енергії та регламенту сервісного обслуговування.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СПОЖИВАЧІВ	10
1.1 Аналіз поточного стану та магістральних напрямів трансформації світового ринку відновлюваної енергетики	10
1.2 Аналітичний огляд конструктивних типів та експлуатаційних характеристик ВЕУ	11
1.3 Обґрунтування вибору ротора Савоніуса для автономного енергозабезпечення	15
1.4 Аналіз регіонального вітропотенціалу та енергетичного профілю автономного споживача	16
2 СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З РОТОРОМ САВОНІУСА ДЛЯ ПРИВАТНОГО ОБ'ЄКТА ПОБУТОВОГО ТИПУ	18
2.1 Технічне завдання та вихідні дані для проектування установки	18
2.1.1 Характеристика об'єкта проектування та аналіз його енергоспоживання	18
2.1.2 Природно-кліматичні умови району розташування	20
2.1.3 Вихідні дані згідно з генеральним планом	21
2.2 Визначення конструктивних характеристик та геометричних параметрів вітроколеса	22
2.3 Обґрунтування матеріаловибору та розрахунок маси конструкції	28
2.4 Обґрунтування вибору та технічних характеристик електрогенератора	34
2.5 Обґрунтування вибору та технічні характеристики МРРТ-контролера	35

					ДП.141.043.022.ПЗ				
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Гришук О.Г.			ЗМІСТ				
Перевір		Антипчук Б.О.							
Н. Контр.		Антипчук Б.О.							
Затв.									
					Лім.	Арк.	Аркушів		
					У	6	60		
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн				

2.6 Розрахунок та обґрунтування вибору параметрів акумуляторного модуля	37
2.7 Розрахунок параметрів лінії передачі електроенергії	39
2.8 Обґрунтування вибору інверторного обладнання та системи АВР	40
3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОЄКТУ	43
3.1 Структура капітальних вкладень	43
3.2 Аналіз витрат на функціонування та собівартості енергії	45
3.3 Розрахунок терміну окупності системи	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	50
4.1 Загальні положення та системний аналіз виробничих ризиків	50
4.2 Технічні заходи безпеки під час монтажу та висотних робіт	50
4.3 Електробезпека та комплексний захист від атмосферних розрядів	51
4.4 Забезпечення пожежної безпеки та норми експлуатації накопичувачів енергії	52
4.5 Системи аварійного гальмування та регламент безпечного сервісу	53
4.6 Алгоритми надання першої долікарської допомоги при аварійних ситуаціях	53
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	56
ДОДАТКИ	59

ВСТУП

На сучасному етапі проблема забезпечення енергетичної автономності приватних домоволодінь в Україні набула критичного значення. Систематичні дестабілізації в роботі централізованих енергомереж у поєднанні з тенденцією до здорожчання традиційних енергоресурсів зумовлюють нагальну потребу у впровадженні вискооефективних альтернативних систем живлення.

Вибір вітрогенератора з ротором Савоніуса для енергозабезпечення побутового об'єкта є стратегічно обґрунтованим рішенням, що базується на низці його технічних переваг. Зокрема, завдяки здатності працювати при низьких швидкостях повітряних потоків, така установка ефективно генерує енергію навіть у помірних вітрових умовах, характерних для більшості регіонів України. Окрім цього, вертикально-орієнтована конструкція забезпечує мінімальний рівень аеродинамічного шуму, що є критичним фактором для щільної забудови приватного сектору. Практичність системи також зумовлена її високою надійністю та простотою в експлуатації: нижнє розташування генератора та основних вузлів значно спрощує технічне обслуговування, не потребуючи висотних робіт.

Метою даного дипломного проєкту є розробка комплексної системи резервного електропостачання на базі вертикально-осьового вітрогенератора для забезпечення стабільного живлення критично важливих побутових споживачів. Проєкт передбачає інженерний розрахунок параметрів ротора Савоніуса, вибір оптимальних компонентів силової електроніки та обґрунтування схеми акумулювання енергії для досягнення максимальної автономності об'єкта в умовах нестабільного централізованого енергопостачання.

					ДП.141.043.022.ПЗ						
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	ВСТУП				Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Гришук О.Г.								У	8	60
Перевір	Антипчук Б.О.										
Н. Контр.	Антипчук Б.О.								ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
Затв.	Гнатюк О.Ф.										

Об'єктом проектування є комплексна система перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію для забезпечення автономного резервного живлення об'єктів побутового призначення.

Предметом розробки виступають геометричні та конструктивні параметри ротора Савоніуса, принципи побудови силової частини системи, а також вибір та схемотехнічне узгодження компонентів контролю заряду й інвертування енергії у складі єдиного енергокомплексу.

Основні завдання проекту:

- аналітичний огляд: дослідження вітрового потенціалу та порівняльний аналіз існуючих конструкцій вітрогенераторів;
- технічний розрахунок: визначення оптимальних геометричних параметрів ротора Савоніуса для досягнення заданої потужності;
- підбір обладнання: формування специфікації компонентів системи (генератора, контролера, інвертора та АКБ);
- проектування: розробка структурної та принципової електричної схем установки;
- економічне обґрунтування: оцінка фінансової ефективності та термінів окупності проекту.

Наукова новизна та практичне значення проекту полягають у розробці комплексного підходу до проектування енерговузлів на базі вертикально-осьових вітрогенераторів, адаптованих до ефективного функціонування у специфічному аеродинамічному середовищі приватного сектору. Результати роботи мають безпосередню практичну цінність для створення локальних систем енергетичної безпеки, що дозволяють мінімізувати ризики знеструмлення побутових споживачів та сприяють загальному розвантаженню магістральних електричних мереж.

1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СПОЖИВАЧІВ

1.1 Аналіз поточного стану та магістральних напрямів трансформації світового ринку відновлюваної енергетики

Сьогодні світова та українська енергетичні системи проходять через масштабну трансформацію, ключовим вектором якої є відмова від викопних ресурсів на користь відновлюваної енергетики. За оцінками ІЕА, 2025 рік став переломним: завдяки активному впровадженню сонячних та вітрових потужностей частка «зеленої» генерації у світі сягнула 30%. Для України ж розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) перетворився на стратегічний пріоритет, що поєднує кліматичні цілі (згідно з положеннями Національного плану з енергетики та клімату (НПЕК) на період до 2030 року) із завданнями щодо посилення енергетичної незалежності та розбудови децентралізованої мережі.

Сучасний стан вітчизняного ринку ВДЕ (2025–2026 рр.) визначається трьома ключовими векторами: відновленням промислової генерації, стрімкою децентралізацією та розвитком балансуєчих потужностей. Попри воєнні виклики, сектор вітроенергетики у 2025 році поповнився на 320 МВт, що дозволило утримувати частку «зеленої» енергії на рівні 11–17%. Водночас нестабільність централізованого постачання стимулювала приватний сектор до масового переходу на малі вітрові та сонячні установки. Фундаментом для інтеграції цих нерівномірних джерел енергії стало активне впровадження систем збереження енергії, обсяг яких станом на 2025 рік перевищив 500 МВт, забезпечуючи необхідну гнучкість усієї енергосистеми.

Порівняльний аналіз ключових сегментів відновлюваної енергетики

					ДП.141.043.022.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гришук О.Г.				1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СПОЖИВАЧІВ		
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	10	60
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн		

для приватних домогосподарств представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз ключових технологій ВДЕ у побутовому сегменті

Технологічна база (Джерело)	Експлуатаційні переваги для домогосподарств	Ключові детермінанти та обмеження
Фотоелектричні системи (СЕС)	Мінімальні витрати на сервіс, відсутність механічного зносу, простота інтеграції	Висока дискретність генерації (залежність від інсоляції та часу доби)
Вітроенергетичні установки (ВЕС)	Стабільність виробітку в осінньо-зимовий період; здатність працювати цілодобово	Акустичне забруднення, необхідність специфічного ландшафту та високих щогл
Біоенергетичні рішення	Прогнозованість та керованість графіку видачі потужності	Потреба у постійній логістиці сировини та складність регламентних робіт

Станом на 2026 рік мала вітроенергетика в Україні трансформується у стратегічно важливе доповнення до сонячної генерації. Її актуальність зумовлена сезонною комплементарністю: пік вітрової активності припадає саме на осінньо-зимовий період, коли інсоляція є критично низькою. З огляду на обмеження традиційних горизонтально-осьових турбін у щільній забудові (акустичне навантаження та вібрації), зростає попит на вертикально-осьові рішення, зокрема ротори Савоніуса, що демонструють стабільну роботу в умовах міської турбулентності. Отже, інтеграція таких систем є логічним та своєчасним рішенням для зміцнення енергетичної автономії приватного сектору в сучасних реаліях української енергосистеми.

1.2 Аналітичний огляд конструктивних типів та експлуатаційних характеристик ВЕУ

Перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертання вала забезпечується вітроприймальними пристроями, головною ознакою класифікації яких є положення осі обертання стосовно напрямку повітряного

потоків. У сегменті малої генерації базове розмежування систем проводиться між горизонтально-осьовими (HAWT) та вертикально-осьовими (VAWT) установками.

Найбільш поширеним технічним рішенням у сучасній генерації є горизонтально-осьові вітротурбіни (HAWT) пропелерного типу (див. рисунок 1.1), принцип роботи яких ґрунтується на виникненні аеродинамічної підйомної сили при обтіканні лопатей вітровим потоком. Ключовою перевагою таких установок є висока енергетична ефективність, оскільки їхній коефіцієнт використання енергії вітру C_p може досягати значень 0,4 – 0,5.

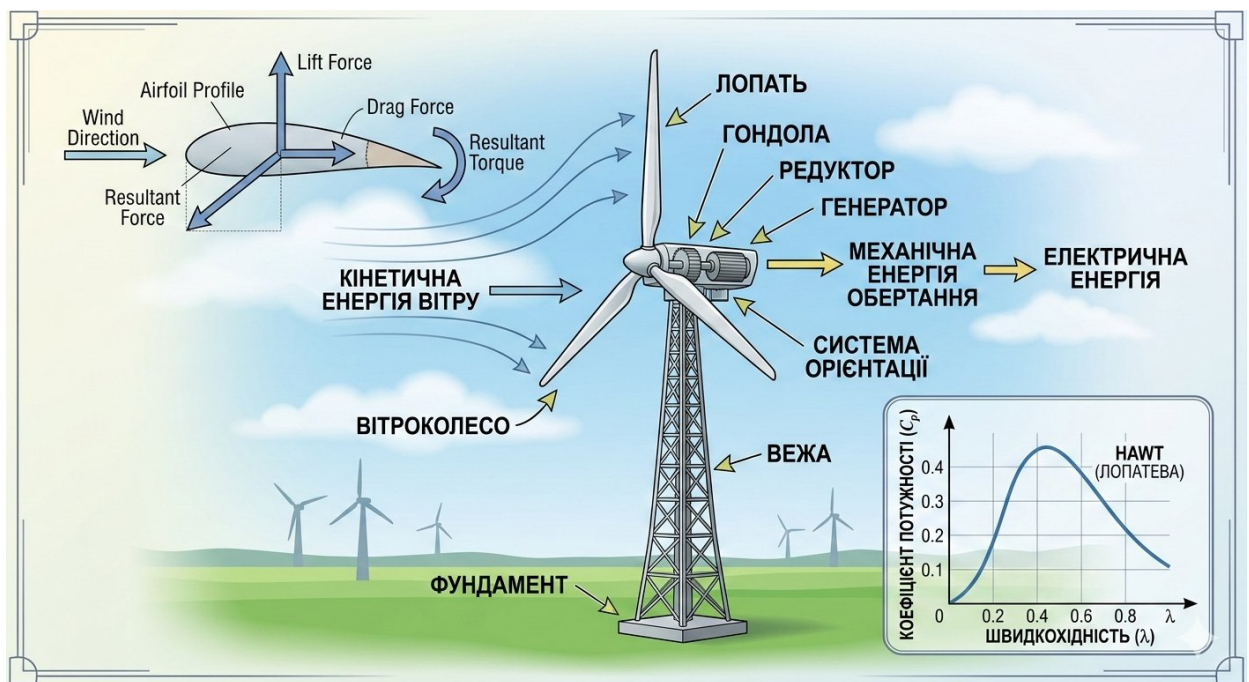


Рисунок 1.1 – Горизонтально-осьова вітротурбіна (HAWT)

Разом з тим, впровадження систем HAWT супроводжується низкою техніко-експлуатаційних викликів. Зокрема, необхідність точного позиціонування ротора відносно вектора вітру вимагає інтеграції допоміжних вузлів – від пасивних флюгерних механізмів до активних систем сервоприводів. Енергетична ефективність таких установок обмежена

високим пусковим порогом (у межах 3 – 4 м/с), що критично для регіонів з низькою інтенсивністю вітрів.

Важливим деструктивним фактором є емісія акустичних шумів, зокрема в низькочастотному (інфразвуковому) спектрі, що створює дискомфорт при експлуатації в житлових зонах. Крім того, аеродинаміка лопатевих турбін вкрай чутлива до структури потоку: у приватному секторі, де забудова та ландшафт генерують значну турбулентність, спостерігається різка деградація ККД. Це зумовлює низьку доцільність використання горизонтально-осьових ВЕУ в безпосередній близькості до побутових об'єктів порівняно з вертикально-осьовими аналогами

Вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання (VAWT) демонструють стійку тенденцію до впровадження в сегменті автономного енергозабезпечення побутових споживачів. Популярність цих систем зумовлена їхньою конструктивною універсальністю та здатністю ефективно функціонувати в умовах нестабільного вітрового клімату. За фізичною природою виникнення обертового моменту вертикально-осьові турбіни класифікують на два основні типи: ротори Дар'є та ротори Савоніуса.

Ротори Дар'є належать до класу швидкохідних турбін, робота яких ґрунтується на використанні аеродинамічної підйомної сили. Вони характеризуються високими показниками енергоефективності, проте мають суттєвий недолік – низький пусковий момент, що часто унеможливорює їх самостійний запуск при низьких швидкостях вітру.

Ротори Савоніуса (див. рис. 1.2) належать до класу вертикально-осьових установок, що працюють за принципом диференціального лобового опору. Обертовий момент виникає через різницю сил тиску вітру на ввігнуту (активну) та опуклу (пасивну) поверхні лопатей. Завдяки такій конструкції ротор забезпечує високий пусковий момент, що дозволяє системі розпочинати роботу вже при швидкості вітру від 1,2–1,5 м/с. Це робить установку ефективною в умовах нестабільної та слабкої аеронавігації, характерної для приватних об'єктів побутового типу.

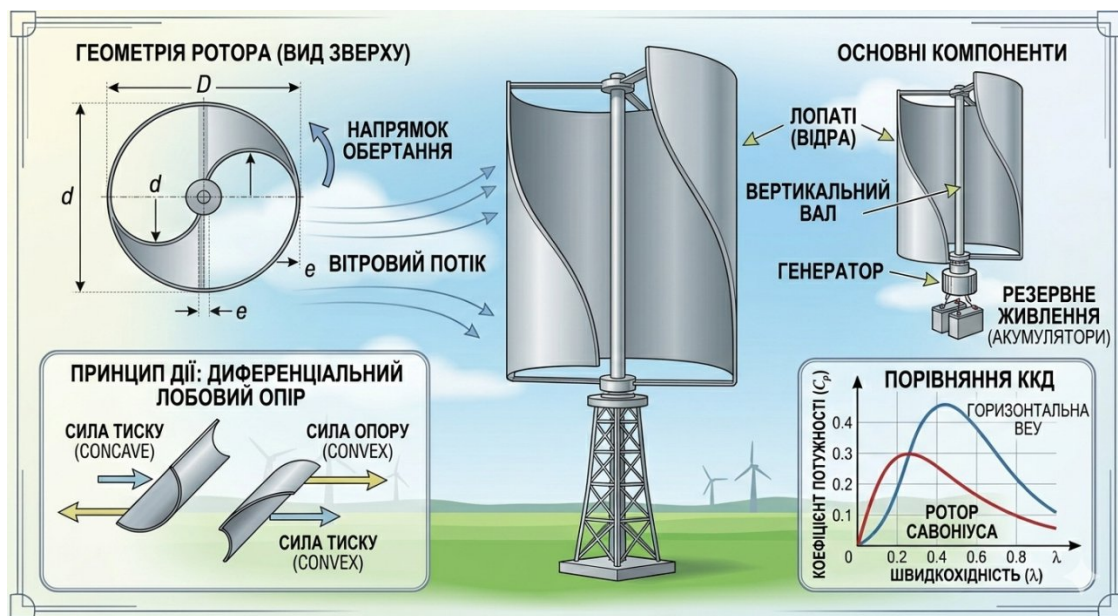


Рисунок 1.2 – Вертикально-осьова вітротурбіна (VAWT) на базі ротора Савоніуса

З точки зору обґрунтування вибору типу ВЕУ для умов приватного домоволодіння, то ефективність системи резервного живлення безпосередньо корелює з локальними аеродинамічними особливостями місцевості. Нижче (див. таблицю 1.2) наведено порівняльну характеристику ключових технічних та експлуатаційних параметрів, що визначають доцільність застосування конкретної топології вітротурбіни.

Таблиця 1.2 – Компаративний аналіз експлуатаційних показників HAWT та ротора Савоніуса

Критерій порівняння	Горизонтально-осьова ВЕУ (лопатева)	Вертикально-осьова ВЕУ (тип Савоніуса)
Адаптивність до вектора вітру	Потребує активної або пасивної системи орієнтації	Всенаправлена; незалежна від напрямку потоку
Стійкість до турбулентних збурень	Суттєва деградація ККД, виникнення резонансних вібрацій	Стабільна генерація у вихрових та нестабільних потоках
Поріг самозапуску (ϑ_{start})	Високий (3.0 – 5.0 м/с)	Низький (1.2 – 2.0 м/с)
Акустична та вібраційна емісія	Висока (інтенсивний аеродинамічний шум)	Мінімальна; можливість інсталяції на конструкціях будівель
Доступність силового обладнання	Складне (розміщення вузлів генерації на висоті щогли)	Висока (генератор та контролери розташовані в основі вала)

Аналіз даних таблиці 1.2 свідчить, що попри нижчий теоретичний ККД, ротор Савоніуса є найбільш раціональним рішенням для приватного об'єкта. Його здатність до самозапуску при слабких вітрах та стабільна робота в умовах турбулентності, спричиненої будівлями, забезпечують більший сумарний виробіток енергії протягом року у порівнянні з лопатевими аналогами.

1.3 Обґрунтування вибору ротора Савоніуса для автономного енергозабезпечення

Експлуатація вітроенергетичних установок у межах приватних домоволодінь супроводжується специфічними аеродинамічними викликами: низькою середньорічною швидкістю вітру та високим рівнем турбулентності, спричиненої забудовою й рослинністю. У таких умовах застосування ротора Савоніуса є найбільш раціональним технічним рішенням. Попри нижчий теоретичний коефіцієнт використання енергії вітру C_p порівняно з лопатевими аналогами, дана установка забезпечує вищу сумарну річну генерацію завдяки збільшеній кількості годин активної роботи при слабких повітряних потоках.

Висока ефективність ротора Савоніуса в умовах децентралізованого енергопостачання зумовлена низькою його унікальних характеристик. Перш за все, установка вирізняється аеродинамічною всенаправленістю: здатність сприймати вітрові потоки з будь-якого напрямку (360°) повністю виключає потребу в системах орієнтації, таких як флюгери або сервоприводи. Це не лише спрощує кінематичну схему, а й суттєво підвищує загальну надійність агрегату. Окрім того, функціонування за принципом диференціального лобового опору забезпечує високу стійкість у турбулентних середовищах, дозволяючи зберігати стабільність крутного моменту навіть за умов інтенсивних завихрень та різкої зміни вектора вітру.

Важливою перевагою для регіонів з помірним вітровим кліматом є низький поріг самозапуску: можливість початку генерації при швидкостях вітру від 1,2 – 1,8 м/с робить систему ефективною в періоди слабкої аеронавігації, коли традиційні швидкохідні ВЕУ залишаються статичними. Разом з цим, помірна кутова швидкість обертання гарантує екологічність та безпеку експлуатації, оскільки мінімізує емісію інфразвуку та вібраційне навантаження. Даний фактор дозволяє інтегрувати установку безпосередньо в конструкції будівель (наприклад, виконувати монтаж на даху) без ризику руйнування опорних елементів.

Завершує перелік переваг висока технологічність обслуговування, зумовлена вертикальною орієнтацією вала. Така компоновка дозволяє розмістити генератор та трансмісію в нижній частині установки, що одночасно знижує центр мас, підвищуючи статичну стійкість конструкції, та значно спрощує проведення регламентних сервісних робіт.

1.4. Аналіз регіонального вітропотенціалу та енергетичного профілю автономного споживача

Ефективність функціонування автономної вітроенергетичної установки (ВЕУ) безпосередньо залежить від ступеня кореляції між наявним енергетичним потенціалом повітряних мас та динамікою енергоспоживання об'єкта. Для переважної більшості регіонів України характерним є помірний вітровий клімат континентального типу. Згідно з даними метеорологічних спостережень, середньорічні швидкості вітру на висотах 10 – 20 метрів (типова висота щогл для приватного сектору) стабільно коливаються в межах 3,0 – 6,0 м/с.

Такий низькошвидкісний режим є малоефективним для класичних горизонтально-осьових турбін (HAWT). Пропелерні установки мають високий інерційний поріг запуску (зазвичай від 4 – 5 м/с) та потребують стабільних ламінарних потоків для виходу на номінальну потужність.

Натомість для роторів Савоніуса зазначений діапазон швидкостей є оптимальним робочим вікном. Високий крутний момент та здатність до генерації при слабких потоках (від 1,2 – 1,5 м/с) дозволяють максимально повно конвертувати енергію вітру протягом року. Це забезпечує безперервне підзаряджання акумуляторних батарей (АКБ) навіть у періоди тривалого метеорологічного затишшя, коли інші типи ВЕУ залишаються статичними.

Особливе значення має узгодження генерації з графіком навантаження автономного побутового споживача. Як правило, добовий профіль споживання приватного будинку має виражену нерівномірність із двома основними піками:

- ранковий пік (07:00 – 09:00): інтенсивне використання кухонної техніки та систем водопостачання;
- вечірній пік (18:00 – 22:00): максимальне навантаження через роботу систем освітлення, клімат-контролю та мультимедійних пристроїв.

У контексті побудови гібридних систем або систем резервного живлення, вітрогенератор Савоніуса демонструє суттєві переваги над сонячними панелями (фотомодулями). По-перше, на відміну від сонячної генерації, вітротурбіна забезпечує цілодобовий цикл вироблення енергії, що є критично важливим для покриття нічного базового навантаження та вечірнього піку. По-друге, в осінньо-зимовий період, коли інсоляція мінімальна, середня швидкість вітру в Україні зазвичай зростає, що дозволяє вітрогенератору компенсувати дефіцит енергії в системі. Таким чином, інтеграція ротора Савоніуса дозволяє згладити цикли розряду АКБ та суттєво підвищити загальну автономність енерговузла.

2 СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З РОТОРОМ САВОНІУСА ДЛЯ ПРИВАТНОГО ОБ'ЄКТА ПОБУТОВОГО ТИПУ

2.1 Технічне завдання та вихідні дані для проектування установки

2.1.1 Характеристика об'єкта проектування та аналіз його енергоспоживання

Об'єктом проектування є система енергозабезпечення приватного домоволодіння, розташованого за адресою: м. Житомир, пров. Мальовничий, 12. Згідно з представленим генеральним планом (масштаб 1:200) зображеним на рисунку 2.1, ділянка має розвинену інфраструктуру, що включає:

- капітальний житловий будинок загальною площею 145 м², який є основним споживачем електричної енергії;
- господарську будівлю (гараж) площею 100 м², де доцільно розмістити силову частину системи резервного живлення (інверторне обладнання та блоки акумуляторних батарей);
- допоміжні споруди, зокрема альтанку та зону відпочинку, що потребують чергового освітлення.

Основним завданням проектованої установки є підтримання життєдіяльності об'єкта в умовах нестабільної роботи централізованої електромережі або при повній відсутності напруги (режим "Blackout"). Для мінімізації витрат та оптимізації ємності накопичувачів, енергоспоживачі об'єкта класифіковано за пріоритетністю. До складу критичного навантаження, що живитиметься від вітроелектроустановки (ВЕУ) з ротором Савоніуса, віднесено:

					ДП.141.043.022.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	2 СИСТЕМА РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З РОТОРОМ САВОНІУСА ДЛЯ ПРИВАТНОГО ОБ'ЄКТА ПОБУТОВОГО ТИПУ		
Розробив	Гришук О.Г.						
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	18	60
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн		

- інженерні системи опалення: автоматика керування газовим котлом та група циркуляційних насосів; безперебійна робота цих пристроїв є критичною для запобігання розморожуванню системи опалення в зимовий період;
- освітлювальні мережі: використання енергоефективних LED-ламп для внутрішнього аварійного освітлення приміщень та периметральної підсвітки території згідно з планом безпеки;
- інформаційно-комунікаційний вузол: живлення Wi-Fi роутерів, систем відеоспостереження та засобів зарядки мобільного зв'язку для підтримання контакту із зовнішнім світом;
- побутова техніка першої необхідності: холодильне обладнання для збереження продуктів харчування.

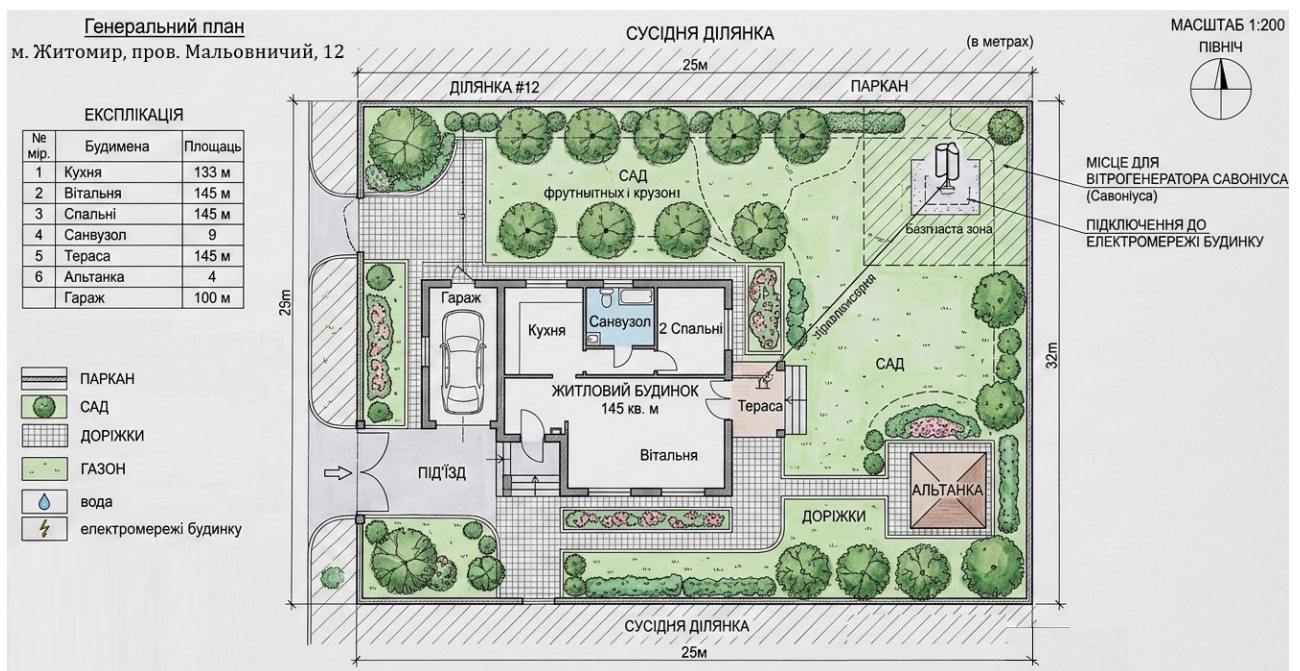


Рисунок 2.1 – Генеральним план приватного домоволодіння

Енергетичні характеристики розроблюваної системи:

- номінальна потужність ($P_{\text{ном}}$): розрахунковий показник становить 0.6 кВт, що забезпечує стабільне функціонування основних вузлів життєзабезпечення в штатному режимі;

- пікова потужність ($P_{\max}$): максимальне навантаження сягає 1.5 кВт. Цей запас передбачений для компенсації пускових струмів (зокрема холодильного обладнання) та живлення другорядних пристроїв у короткочасному режимі;
- добова енергоємність: середнє споживання варіюється в межах 4 – 6 кВт·год (даний параметр є базовим для визначення геометричних параметрів ротора Савоніуса та конфігурації блоку акумуляторів).

2.1.2 Природно-кліматичні умови району розташування

Об'єкт проектування територіально знаходиться у межах Житомирської області, яка належить до зон із помірним вітровим потенціалом. На основі детального аналізу району розташування об'єкта було виділено ключові метеорологічні особливості, що визначають умови експлуатації проектованої системи. Вітровий режим регіону характеризується середньорічною швидкістю повітряних потоків у межах 3.8 – 4.2 м/с (на розрахунковій висоті 10 м). Попри загальну стабільність цих показників, такий рівень швидкостей вимагає застосування енергетичного обладнання з низьким порогом запуску.

Аналіз аеродинамічної експозиції вказує на чітку перевагу західного та північно-західного векторів вітру (див. рисунок 2.2), що є критично важливим для просторового позиціонування установки.

Окрему увагу приділено мікролокаційним особливостям ділянки, які визначаються високою аеродинамічною шорсткістю поверхні. Безпосередня близькість щільної житлової забудови та багаторічних садових насаджень суттєво трансформує структуру повітряного шару, створюючи інтенсивні турбулентні потоки та постійні завихрення.

Наявність таких нестабільних «брудних» потоків та часта зміна напрямку вітру через перешкоди роблять умови на ділянці специфічними, вимагаючи від системи високої адаптивності до турбулентного середовища.

Це робить використання класичних горизонтально-осьових ВЕУ малоефективним через їхню високу інерційність. Натомість, такі умови є оптимальними для обраного типу вертикально-осьової установки, яка демонструє низьку чутливість до турбулентності та напрямку повітряних мас.

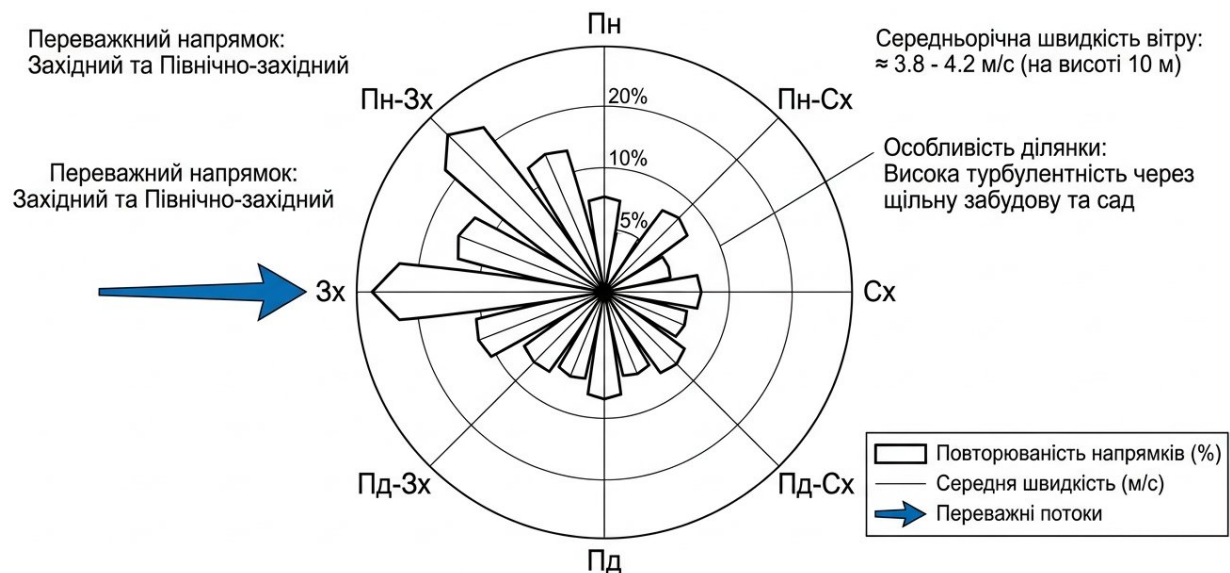


Рисунок 2.2 – Роза вітрів Житомирської області

2.1.3 Вихідні дані згідно з генеральним планом

На основі аналізу ділянки (масштаб 1:200) зображених на рисунку 2.1 визначено наступні проєктні обмеження:

- місце встановлення: північно-східний кут ділянки (зона саду), що є найбільш віддаленим від основної забудови для мінімізації впливу вітрової тіні від будинку;
- дистанція до точки підключення: близько 15–20 метрів від будинку, що потребує врахування втрат напруги в кабельній лінії;
- безпечна зона: передбачено радіус «безпечної зони» навколо щогли вітрогенератора згідно з планом.

Ключові технічні параметри та вимоги до системи, що розробляється, систематизовано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри та вимоги до вітроенергетичної установки типу Савоніус

ПАРАМЕТР	ВИМОГА
Локація	м. Житомир, відкрита ділянка з садовими насадженнями
Тип установки	ВЕУ з вертикальною віссю обертання (тип Савоніуса)
Номінальна потужність	500 – 800 Вт
Висота щогли	6 – 8 метрів (з урахуванням висоти паркану та дерев)
Режим роботи	Резервний, з паралельним підключенням до мережі
Тип акумуляторів	Герметичні, для встановлення в приміщенні гаража

2.2 Визначення конструктивних характеристик та геометричних параметрів вітроколеса

Визначення габаритів вітроколеса базується на фундаментальній залежності потужності вітрового потоку від площі ометання та швидкості вітру. Базова формула для розрахунку корисної потужності установки P має вигляд:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{ген.}} , \quad (2.1)$$

де:

ρ – щільність повітря (прийнято 1.225 кг/м^3);

v – швидкість повітряного потоку, м/с;

A – площа ометання ротора, м^2 ;

C_p – коефіцієнт використання енергії;

$\eta_{\text{ген.}}$ – сумарний ККД генератора та системи керування (прийнято 0.85);
вітру (для ротора Савоніуса прийнято реалістичне значення 0.18).

Для визначення необхідної робочої площі A формула трансформується наступним чином

$$A = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{ген.}}} \quad (2.2)$$

За умови, що середньорічна швидкість вітру становить $v = 4$ м/с, розрахункова площа ометання для досягнення номінальної потужності у 600 Вт (згідно з вимогами технічного завдання) має бути наступною:

$$A = \frac{2 \cdot 600}{1,225 \cdot 4^3 \cdot 0,18 \cdot 0,85} = \frac{1200}{11,99} = 100 \text{ м}^2.$$

Такий результат вказує на технічну недоцільність проектування установки під номінальну потужність при мінімальних швидкостях вітру, оскільки габарити ротора (10 x 10 м) будуть надмірними для приватного домоволодіння.

Згідно із загальноприйнятою світовою практикою проектування вітроенергетичних установок (ВЕУ), досягнення номінальних показників потужності зазвичай передбачається в діапазоні швидкостей вітру 10 – 12 м/с. Виходячи з цих стандартів, було проведено перерахунок параметрів системи за виразом 2.2 для контрольної точки 10 м/с, результати якого наведено нижче:

$$A = \frac{2 \cdot 600}{1,225 \cdot 10^3 \cdot 0,18 \cdot 0,85} = \frac{1200}{187,4} = 6,4 \text{ м}^2.$$

Для забезпечення номінальної потужності 600 Вт при збереженні компактності установки, прийнято розрахункову площу ометання 6,4 м².

Для вертикально-осьових установок ключовим параметром є аспектне відношення AR – пропорція висоти ротора H до його діаметра D .

Оптимальним для типу Савоніуса є діапазон 1,5 – 2. Для розроблюваної системи обрано $AR = 1.6$, що дозволяє ефективно використовувати швидкість вітру на висоті, зберігаючи стійкість до вібрацій. Площа ометання A для вертикального ротора обчислюється як площа прямокутника в проекції:

$$A = H \cdot D, \quad (2.3)$$

де:

A – площа ометання ротора, м^2 ;

H – висота ротора Савоніуса, м ;

D – діаметр ротора Савоніуса, м .

Оскільки висота $H = AR \cdot D$, підставляємо це у формулу площі 2.3, тоді отримаємо, що:

$$A = (AR \cdot D) \cdot D = AR \cdot D^2. \quad (2.4)$$

Тоді за виразом 2.3 та 2.4 діаметр D та висота H ротора будуть дорівнювати значенню:

$$D = \sqrt{\frac{A}{AR}} = \sqrt{\frac{6,4}{1,6}} = \sqrt{4} = 2 \text{ м};$$

$$H = AR \cdot D = 1,6 \cdot 2 = 3,2 \text{ м}.$$

Для реалізації проектної площі ометання пропонується вертикально-осьова конструкція в одно- або двоярусному виконанні. Зупинимо свій вибір на другому варіанті.

Вибір двоярусної конфігурації замість класичного одноярусного ротора обумовлений необхідністю досягнення високої експлуатаційної надійності та

стабільності енерговиробництва. Це рішення базується на наступних інженерних чинниках.

По-перше, така конструкція забезпечує стабільність пуску та ліквідацію «мертвих зон». На відміну від одноярусного ротора, де крутний момент суттєво залежить від кута атаки вітру, два яруси із фазовим зсувом у 90° гарантують, що лопаті завжди перебуватимуть у зоні максимального тиску повітря. Це забезпечує впевнений самозапуск установки навіть при слабкому вітрі та рівномірне обертання без пульсацій моменту.

По-друге, реалізується механічна стійкість та ефективне віброгасіння. З огляду на значні габарити установки ($H = 3,2$ м, $D = 2$ м), розподіл вітрового навантаження на два окремі сегменти дозволяє ефективно згладжувати механічні імпульси. Почергове «підхоплення» повітряного потоку ярусами знижує амплітуду коливань, що мінімізує втому підшипникових вузлів та динамічний вплив на щоглу.

По-третє, розділення ротора сприяє підвищенню жорсткості конструкції. Така схема дозволяє інтегрувати проміжну опору або диск жорсткості безпосередньо по центру вала. Це є критично важливим для запобігання деформаціям на вигин та усунення ризику виникнення резонансу під час штормових поривів або при високих обертах.

Нарешті, двоярусна схема дозволяє максимально ефективно використовувати вертикальний градієнт вітру. Установка краще адаптована до змін швидкості потоку на висотах 5 – 8 метрів: поки верхній ярус працює в умовах стабільного ламінарного потоку, нижній ефективно компенсує приземну турбулентність, спричинену інфраструктурою ділянки. Таким чином досягається оптимальний баланс між продуктивністю та довговічністю системи.

Оскільки розроблювана нами система буде двоярусною, то загальна висота розділяється на два рівні. Між ярусами встановлюється горизонтальна перегородка (диск), яка виконує роль ребра жорсткості та перешкоджає перетіканню повітряних мас. Висота кожного ярусу буде дорівнювати:

$$H_{\text{ярус}_1} = H_{\text{ярус}_2} = \frac{H}{2} = \frac{3,2}{2} = 1,6 \text{ м.} \quad (2.5)$$

Діаметр кожного ярусу залишається незмінним та буде рівним значенню:

$$D = D_{\text{ярус}_1} = D_{\text{ярус}_2} = 2 \text{ м.} \quad (2.6)$$

Проектування ротора Савоніуса потребує деталізації розмірів його функціональних елементів, зокрема напівциліндричних лопатей («ковшів»). Ключовим аспектом є розрахунок діаметра лопаті d з урахуванням коефіцієнта перекриття, який забезпечує перетікання потоку.

Для визначення розміру лопаті використовується залежність від зовнішнього діаметра ротора D :

$$d = \frac{D}{1 + (1 - e)} \quad (2.7)$$

де:

e – відносне перекриття (приймається в діапазоні 0.15 – 0.2).

Отже, при заданому діаметрі ротора $D = 2$ м, діаметр кожної лопаті становить:

$$d = \frac{2}{1 + (1 - 0,175)} = 1,1 \text{ м.}$$

Тепер визначимо величину перекриття – центральний зазор, через який повітря перетікає з навітряної лопаті на підвітряну, створюючи додатковий тиск:

$$a = 0,15 \cdot d, \quad (2.8)$$

де:

a – величина центрального зазору (перекриття), м.

Отримаємо:

$$a = 0,15 \cdot 1,1 = 0,165 \text{ м} = 16,5 \text{ см.}$$

Для стабільної роботи та полегшення самозапуску в даній роботі ми відмовимось від дволопатевої схеми на користь трилопатевої. Це усуває проблему нульового моменту («мертвих зон»), характерну для класичного ротора Савоніуса.

У таблиці 2.2 систематизовано підсумкові геометричні характеристики проєктованого вітрогенератора на базі ротора Савоніуса.

Таблиця 2.2 – Геометричні характери проєктованого двоярусного вітрогенератора з ротором Савоніуса

ПАРАМЕТР	ПАРАМЕТР	ПРИМІТКА
Загальна площа (A)	6,4 м ²	Вихідна розрахункова величина
Загальна висота (H)	3,2 м	Сумарна висота двох ярусів
Зовнішній діаметр (D)	2 м	Максимальний розмах лопатей
Висота ярусу (h)	1.6 м	Висота одного ярусу
Зсув ярусів	90°	Кут розвороту верхнього ярусу до нижнього
Тип профілю	Напівциліндр	Класична форма лопаті Савоніуса
Кількість лопатей	Три	-----

З огляду на кубічну залежність потужності від швидкості вітру, середньостатистичні показники Житомирського регіону (4 м/с) забезпечують реальну генерацію двоярусного ротора Савоніуса на рівні 100 – 120 Вт·год. Обрана двоярусна конфігурація виступає оптимальним інструментом для безперервної акумуляції енергії, досягаючи номінальних 600 Вт лише в періоди проходження інтенсивних повітряних мас. Таким чином, систему доцільно класифікувати не як джерело живлення для високопотужних

споживачів у реальному часі, а як установку для стабільного добового поповнення енергозапасу.

2.3 Обґрунтування матеріаловибору та розрахунок маси конструкції

Для конструкції двоярусного ротора Савоніуса ($D = 2$ м, $H = 3,2$ м) на щоглі заввишки 8 м рекомендовано сталь марки Ст3сп. Вибір цього матеріалу забезпечує високу жорсткість системи та мінімізує ризик вібраційних деформацій завдяки значному модулю пружності сталі.

Згідно з конструктивними характеристиками та геометричних параметрами нашого вітрогенератора Савоніуса, його ротор є двоярусним ($H_{\text{ярус}_\text{п}} = 1,6$ м) із трьома лопатями на кожному ярусі. При зовнішньому діаметрі ротора $D = 2$ м та величині перекриття $a = 0,165$ м, розрахунковий діаметр кожної напівциліндричної лопаті становить $d = 1,1$ м.

Розрахуємо довжину дуги розгортки однієї лопаті нашого вітрогенератора:

$$L = \frac{\pi \cdot d}{2}, \quad (2.9)$$

де:

L – довжина дуги розгортки однієї лопаті, м;

d – діаметр кожної напівциліндричної лопаті, м.

Отримаємо, що:

$$L = \frac{3,14 \cdot 1,1}{2} = 1,73 \text{ м}.$$

Далі визначимо сумарну площу поверхні шести лопатей (два яруси):

$$S_{\Sigma} = 6 \cdot L \cdot H_{\text{ярус}_\text{п}} , \quad (2.10)$$

де:

S_{Σ} – сумарна площа поверхні шести лопатей вітрогенератора, м^2 ;

$H_{\text{ярус}_\text{п}}$ – висота лопаті в кожному ярусі розроблюваного вітрогенератора, м.

Матимемо наступний результат:

$$S_{\Sigma} = 6 \cdot 1,73 \cdot 1,6 = 16,6 \text{ м}^2.$$

Для забезпечення необхідної жорсткості лопатей діаметром 1,1 м обрано листову сталь завтовшки 1,5 мм. З урахуванням густини матеріалу ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$), розрахункова маса лопатей становить:

$$m_{\text{л}_\text{заг}} = S_{\Sigma} \cdot \delta \cdot \rho , \quad (2.11)$$

де:

$m_{\text{л}_\text{заг}}$ – загальна маса всіх шести лопатей вітрогенератора, кг;

δ – товщина листової сталі, м;

ρ – густина сталі, кг/м^3 .

В результаті матимемо, що:

$$m_{\text{л}_\text{заг}} = 16,6 \cdot 0,0015 \cdot 7850 = 195,5 \text{ кг}.$$

Вузол кріплення лопатей реалізовано за допомогою трьох опорних дисків діаметром 2 м. Площа дисків, за вирахуванням площі перерізу отворів для встановлення вала, складає:

$$S_{\text{Дисків}} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{Диск}}^2}{4} , \quad (2.12)$$

де:

$S_{\text{дисків}}$ – загальна площа трьох опорних дисків, м^2 ;

$D_{\text{диск}}^2$ – діаметр одного опорного диску, м.

За виразом 2.12 матимемо:

$$S_{\text{дисків}} = 3 \cdot \frac{3,14 \cdot 2}{4} = 9,42 \text{ м}^2.$$

З огляду на дію динамічних навантажень, для виготовлення дисків обрано сталевий лист завтовшки 3 мм, що забезпечує необхідний запас міцності. Визначимо загальну масу дисків:

$$m_{\text{д.заг}} = S_{\text{дисків}} \cdot \delta \cdot \rho, \quad (2.13)$$

де:

$m_{\text{д.заг}}$ – загальна маса всіх трьох опорних дисків, кг;

δ – товщина листової сталі, м;

ρ – густина сталі, кг/м^3 .

Отримаємо, що:

$$m_{\text{д.заг}} = 9,42 \cdot 0,003 \cdot 7850 = 221,8 \text{ кг.}$$

Роль центрального вала ротора буде виконувати сталеві безшовна труба зовнішнім діаметром 70 мм, товщиною стінки 6 мм та довжиною 3,5 м. Визначимо його вагу. Для цього спочатку розрахуємо площу поперечного перерізу труби, з якої буде виконано вал:

$$S_{\text{Вала}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{Вала}}^2 - (D_{\text{Вала}} - 2 \cdot s)^2), \quad (2.14)$$

де:

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
						30
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$S_{\text{Вала}}$ – площа поперечного перерізу труби вала, м^2 ;

$D_{\text{Вала}}$ – зовнішній діаметр вала, м ;

s – товщина стінки труби вала, м .

Матимемо, що:

$$S_{\text{Вала}} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,07^2 - (0,07 - 2 \cdot 0,006)^2) = 0,001206 \text{ м}^2.$$

Тепер обчислимо об'єм металу:

$$V = S_{\text{Вала}} \cdot L_{\text{Вала}}, \quad (2.15)$$

де:

V – об'єм металу з якого виготовлено вал вітрогенератора, м^3 ;

$S_{\text{Вала}}$ – площа поперечного перерізу труби вала, м^2 ;

$L_{\text{Вала}}$ – довжина валу, м .

В результаті матимемо, що:

$$V = 0,001206 \cdot 3,5 = 0,004221 \text{ м}^3.$$

Тоді маса вала буде дорівнювати:

$$m_{\text{Вала}} = V \cdot \rho, \quad (2.16)$$

де:

$m_{\text{Вала}}$ – загальна маса валу вітрогенератора, кг ;

V – об'єм металу з якого виготовлено вал вітрогенератора, м^3 ;

ρ – густина сталі, кг/м^3 .

Отже, результат за виразом 2.16 буде наступним:

$$m_{\text{Вала}} = 0,004221 \cdot 7850 = 33,13 \text{ кг.}$$

З огляду на значний перекидний момент, що діє на ротор вітрогенератора Савоніуса при висоті щогли $H_{\text{Щогли}} = 8 \text{ м}$, як опорну конструкцію обрано сталеву електрозварну трубу $\varnothing 219 \times 6 \text{ мм}$ (згідно з ГОСТ 10704-91). Погонна маса обраного профілю становить: $q = 31,52 \text{ кг/м}$.

Визначимо загальну масу щогли нашої вітрогенераторної установки на базі ротора Савоніуса за виразом:

$$m_{\text{Щогли}} = H_{\text{Щогли}} \cdot q, \quad (2.17)$$

де:

$m_{\text{Щогли}}$ – загальна маса щогли вітрогенератора, кг;

$H_{\text{Щогли}}$ – висота щогли вітрогенератора, м;

q – погонна маса обраного профілю з якого виконано щоглу вітрогенератора, кг/м.

Будемо мати:

$$m_{\text{Щогли}} = 8 \cdot 31,52 = 252,2 \text{ кг.}$$

В таблиці 2.3 наведено специфікацію розрахованих масових характеристик проєктованої ВЕУ.

Таблиця 2.3 – Зведена специфікація масових характеристик ВЕУ Савоніуса

ЕЛЕМЕНТ КОНСТРУКЦІЇ	МАТЕРІАЛ / ПАРАМЕТРИ	МАСА
Лопаті (6 шт.)	Листова сталь 1,5 мм	195,5 кг
Опорні диски (3 шт.)	Листова сталь 3,0 мм	221,8 кг
Центральний вал	Сталева труба $\varnothing 70 \times 6 \text{ мм}$	33,13 кг

Продовження таблиці 2.3

Опорна щогла	Сталева труба Ø 219 x 6 мм	252,2 кг
Кріплення та підшипники	Сталь	45 кг
Загальна маса установки		744,63 кг

За результатами проведених розрахунків, загальна маса металоконструкції вітрогенератора становить 744,63 кг. Попри значну вагу рухомої частини (ротора) – 447,43 кг, таке інженерне рішення є обґрунтованим з огляду на міцність та аеродинамічну стабільність.

Використання листової сталі завтовшки 1,5 мм для лопатей та 3 мм для дисків забезпечує необхідний запас міцності при значній площі ротора 6,4 м². Це гарантує цілісність установки при штормових поривах вітру до 25 м/с, коли тиск на конструкцію досягає 2,5 – 3 кН, та запобігає деформації елементів під дією відцентрових сил.

Велика маса ротора надає йому властивостей маховика. Завдяки значному моменту інерції установка ефективно згладжує пульсації вітру, стабільно підтримуючи оберти при короткочасних затишшях. Крім того, масивність конструкції забезпечує низьку резонансну частоту, що мінімізує вібрації та запобігає «розкачці» щогли під час роботи.

Водночас значна вага конструкції висуває особливі вимоги до її вузлів та процесу встановлення, зокрема, необхідність витримувати осьове навантаження у 450 кг та компенсувати перекося валу під дією вітрового тиску зумовлює використання комбінації радіально-сферичних та упорних підшипників. Висока інерційність системи підвищує поріг старту установки до 3–4 м/с, що вимагає застосування якісних опорних вузлів з мінімальним коефіцієнтом тертя, а з огляду на загальну масу системи у 750 кг, технологія монтажу обов'язково має передбачати використання спецтехніки, як-от крана або лебідки.

2.4 Обґрунтування вибору та технічних характеристик електрогенератора

Вибір силового агрегату для проєктованої ВЕУ обумовлений специфікою ротора Савоніуса: його низькою частотою обертання, високою інерційністю маси (744,63 кг) та необхідністю забезпечення енергонезалежності приватного об'єкта побутового типу в режимі "Blackout".

Найбільш раціональним рішенням для даної системи є застосування низькообертового трифазного синхронного генератора на постійних магнітах (PMG) із прямим приводом. Відмова від механічного редуктора (мультиплікатора) є принциповою: при масі рухомої частини ротора у 447,43 кг використання зубчастих передач призвело б до суттєвих втрат ККД та швидкого зносу вузлів через значні динамічні навантаження. Прямопривідна схема суттєво підвищує надійність установки та забезпечує мінімальний момент страту, що критично важливо для Житомирського регіону з помірними швидкостями вітру.

Електричні параметри генератора підібрані з урахуванням номінальної потужності 600 Вт та необхідності компенсації пікових навантажень до 1,5 кВт (зокрема для запуску холодильного обладнання). Їх наведено нижче, в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні параметри електрогенератора

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ	ОБґРУНТУВАННЯ
Номінальна потужність	0,8 – 1,0 кВт	Забезпечує запас потужності для стабільної роботи при штормових поривах вітру
Номінальна напруга	48 В (DC)	Мінімізація втрат напруги при передачі енергії кабельною лінією 15–20 м (згідно з генпланом приватного домоволодіння)
Робочий діапазон обертів	60 – 150 об/хв	Відповідає природній частоті обертання тихохідного ротора Савоніуса

Спираючись на наведені параметри, оптимальною моделлю для реалізації вертикально-осьової вітроустановки на базі ротора Савоніуса обрано аксіальний генератор Mars Rock G1000 (див. рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Конструктивна схема та внутрішня будова низькообертового генератора Mars Rock G1000 з посиленням опорним вузлом

Цей агрегат спеціально спроектований для роботи з масивними інерційними роторами. Його безщіткова конструкція на базі неодимових магнітів дозволяє ефективно генерувати енергію на низьких обертах, суттєво подовжує міжремонтний інтервал та гарантує високу експлуатаційну надійність всієї вітроенергетичної системи.

2.5 Обґрунтування вибору та технічні характеристики МРРТ-контролера

На основі розрахункової номінальної потужності нашої вітроустановки (600 Вт) та прогнозованих пікових навантажень (1,5 кВт), до системи керування висуваються підвищені вимоги щодо надійності та функціональності. Основним вузлом розподілу енергії обрано гібридний МРРТ-контролер Mars Rock 2000W-48V (див. рисунок 2.4), який спеціалізується на роботі з вертикально-осьовими вітрогенераторами великої інерції.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

35



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд MPPT-контролера Mars Rock 2000W-48V

Вибір ключових характеристик контролера та конфігурації електричної мережі ВЕУ базувався на принципах надійності, мінімізації енерговтрат та захисту обладнання в екстремальних умовах:

- потужність та перевантаження: номінальна потужність контролера 2000 Вт забезпечує необхідний експлуатаційний запас для безпечної роботи під час інтенсивних повітряних потоків, коли короткочасна генерація може значно перевищувати розрахункову;
- оптимізація напруги (48 В): вибір системної напруги 48 В обумовлений розташуванням силового блоку в гаражі на відстані 20 м від щогли; це технічне рішення дозволяє у чотири рази знизити втрати в кабельній лінії порівняно з 12- вольтовими системами та оптимізувати витрати на мідні провідники;
- стійкість до високої напруги: вхідний каскад контролера витримує напругу до 150–200 В, що гарантує цілісність електроніки під час штормових поривів, коли швидкість обертання генератора неконтрольовано зростає.

Вибір моделі Mars Rock обумовлений її інтелектуальним алгоритмом роботи. Контролер дозволяє налаштувати індивідуальну криву потужності, адаптуючи відбір енергії до специфічного крутного моменту ротора Савоніуса на низьких швидкостях вітру.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

36

Для захисту масивного ротора вагою 447 кг передбачено систему інтелектуального ШІМ-гальмування. У разі повного заряду акумуляторів або досягнення критичних обертів, контролер плавно підключає зовнішні баластні резистори. Це забезпечує безінерційну зупинку системи без різких механічних ударів, що є критично важливим для довговічності підшипникових вузлів та цілісності щогли.

Основні технічні характеристики та підсумкова специфікація контролера Mars Rock 2000W-48V наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – технічні характеристики та специфікація контролера Mars Rock 2000W-48V

ПАРАМЕТР	ХАРАКТЕРИСТИКА
Тип пристрою	Гібридний MPPT (Вітер + Сонце)
Максимальний струм заряду	40 А
Режим захисту	Автоматичне електромагнітне гальмування (PWM)
Типи сумісних АКБ	LiFePO ₄ , AGM, GEL, Lead-acid
Охолодження	Комбіноване (пасивний радіатор + активний вентилятор)
Комунікації	LCD-дисплей, інтерфейс RS485 для віддаленого моніторингу

2.6 Розрахунок та обґрунтування вибору параметрів акумуляторного модуля

Відповідно до технічного завдання, середньодобовий обсяг енергоспоживання приватного житлового об'єкта становить 4 – 6 кВт·год. Враховуючи циклічний характер вітрової активності в Житомирській області, система накопичення повинна гарантувати автономну роботу критичного навантаження протягом 12 – 18 годин у періоди аварійного відключення електропостачання або блекауту.

Для реалізації розроблюваної в даному дипломному проєкті системи обрано літій-залізо-фосфатну технологію (LiFePO₄). Цей вибір обумовлений високим ресурсом (понад 3000 циклів розряду/заряду), можливістю глибокого

розряду (до 90%) без втрати ємності та здатністю стабільно витримувати високі пускові струми, що виникають під час роботи інверторного обладнання.

Для забезпечення енергетичного резерву на рівні 5 кВт·год при системній напрузі 48 В, розрахункова ємність акумуляторного блоку Q_{Ah} становитиме:

$$Q_{Ah} = \frac{E_{\text{спожив.}}}{U_{BEY} \cdot \varepsilon}, \quad (2.18)$$

де:

Q_{Ah} – розрахункова електрична ємність блоку акумуляторних батарей, А·год.;

$E_{\text{спожив.}}$ – необхідний запас енергії (енергоспоживання), Вт·год.;

U_{BEY} – номінальна напруга системи вітрогенераторної установки на базі ротора Савоніуса, В;

ε – коефіцієнт глибини розряду.

Тоді отримаємо, що:

$$Q_{Ah} = \frac{5000}{48 \cdot 0,9} = 115 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

З огляду на сучасні галузеві стандарти та необхідність раціонального використання площі технічного приміщення, для системи накопичення енергії обрано літій-залізо-фосфатний акумуляторний модуль Deye SE-G5.1 Pro (48 В / 100 А·год.). Обрану модель зображено на рисунку 2.5.

Технічні переваги обраного нами рішення полягають в наступному: висока енергоємність: використання даної моделі забезпечує сумарний запас енергії у 5,12 кВт·год, що повністю покриває потреби об'єкта в автономному живленні критично важливого обладнання;

- система керування та безпеки: вбудована інтелектуальна система

BMS (Battery Management System) забезпечує балансування комірок, захист від перевантаження та глибокого розряду, що гарантує тривалий термін експлуатації (понад 6000 циклів);

- стійкість до пікових навантажень: батарея характеризується високою здатністю до струмовіддачі, що є критичним фактором для стабільної компенсації пікових навантажень потужністю до 1,5 кВт;
- енергетична буферизація: наявний запас енергії дозволяє ефективно нівелювати стохастичний характер вітрового навантаження, забезпечуючи стабільну вихідну напругу системи незалежно від миттєвої швидкості вітру.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд акумуляторного модуля Deye SE-G5.1 Pro (48 В / 100 А·год.)

2.7 Розрахунок параметрів лінії передачі електроенергії

Ефективність роботи ВЕУ значною мірою залежить від мінімізації втрат у провідниках на 20-метровій ділянці від генератора до контролера. Розрахунок параметрів лінії базується на забезпеченні пікової потужності системи у 1500 Вт при номінальній напрузі 48 В, що зумовлює максимальну силу струму I на рівні 31,25 А.

Основним критерієм проектування є обмеження падіння напруги значенням до 3% (що становить не більше 1,44 В). Для визначення оптимальної площі перерізу мідного провідника $S_{\text{ЛЕП}}$ використовується

питомий опір міді $\rho_{\text{міді}} = 0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, що дозволяє гарантувати енергоефективність системи згідно з генпланом. Отже будемо мати, що:

$$S_{\text{ЛЕП}} = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \rho_{\text{міді}}}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 31,25 \cdot 0,0175}{1,44} = 15,2 \text{ мм}^2. \quad (2.19)$$

Згідно з чинними стандартами (ДСТУ), для монтажу оберемо мідний багатожильний кабель (типу ПВ-3 або КГтп) перерізом 16 мм^2 . Багатожильна структура забезпечує необхідну вібростійкість кабелю в місцях кріплення до щогли.

Прокладання лінії передбачено підземним способом у захисній гофрованій трубі з ПНД (поліетилен низького тиску), що гарантує захист від механічних пошкоджень та впливу зовнішнього середовища.

2.8 Обґрунтування вибору інверторного обладнання та системи АВР

Для забезпечення коректної роботи споживачів, що мають у своєму складі електродвигуни (циркуляційні насоси системи опалення та компресор холодильного обладнання), ключовою вимогою до інвертора є генерація вихідної напруги з чистою синусоїдою. Це гарантує стабільність роботи автоматики газового котла та запобігає перегріву обмоток двигунів.

Згідно з ТЗ, при номінальному навантаженні $0,6 \text{ кВт}$, інвертор повинен витримувати пікові потужності до $1,5 - 2,0 \text{ кВт}$. Окрему увагу приділено пусковим струмам холодильника, що вимагає від пристрою здатності до короткочасного перевантаження до $3,0 \text{ кВт}$. Оптимальним рішенням для даної системи обрано професійний інвертор-зарядний пристрій Victron Energy MultiPlus 48/2000/25 (див. рисунок 2.6).

Основними перевагами даної моделі є:

- інтелектуальне керування енергією: функція PowerAssist дозволяє системі тимчасово компенсувати дефіцит потужності мережі шляхом додавання енергії з акумуляторів LiFePO₄;
- енергоефективність: високий ККД (до 95%) та мінімальні втрати на власні потреби;
- комплексний захист: вбудовані системи захисту від короткого замикання, перевантаження та перегріву забезпечують довговічність силовій частини.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд інвертор-зарядного пристрою Victron Energy MultiPlus 48/2000/25

Повний перелік експлуатаційних показників та ключових компонентів інвертор-зарядного пристрою, що формують його остаточну конфігурацію, наведено у зведеній специфікації (див. табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики інвертор-зарядного пристрою Victron Energy MultiPlus 48/2000/25

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ / ХАРАКТЕРИСТИКА
Номінальна вхідна напруга	48 В (DC)
Вихідна потужність (25°C)	2000 ВА / 1600 Вт
Пікова потужність	3500 Вт
Форма вихідного сигналу	Чиста синусоїда (Pure Sine Wave)
Час перемикавання АВР	< 20 мс (UPS mode)

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

41

Для забезпечення безперебійної життєдіяльності об'єкта в умовах «Blackout» передбачено систему автоматичного введення резерву (АВР). В обраному інверторі Victron MultiPlus реалізовано інтегроване рішення: високошвидкісне реле перемикання з часом спрацювання менше 20 мс. Це дозволяє системі функціонувати в режимі джерела безперебійного живлення (ДБЖ), що виключає перезавантаження інформаційно-комунікаційного вузла (Wi-Fi роутерів, систем відеоспостереження) при зникненні зовнішньої напруги.

Для забезпечення додаткового рівня експлуатаційної безпеки та можливості повної гальванічної розв'язки, система може бути доукомплектована зовнішнім двопозиційним перемикачем типу Tomzn TOQ5-100/4P (63-100 А) (див. рисунок 2.7), що монтується на DIN-рейку в розподільчому щиту технічного приміщення.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд пристрою АВР типу Tomzn TOQ5-100/4P (63-100 А)

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.141.043.022.ПЗ

Аркуш

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОЄКТУ

3.1 Структура капітальних вкладень

Реалізація системи резервного живлення на базі ротора Савоніуса потребує чіткого аналізу капітальних вкладень, що охоплюють усі етапи: від закупівлі сировини до пусконаладжувальних робіт. Особливістю даного проєкту є висока частка витрат на систему накопичення енергії та інтелектуальне інверторне обладнання, що зумовлено вимогою високої надійності в режимі «Blackout».

Загальні витрати на створення установки можна розділити на три основні блоки: силове електротехнічне обладнання, матеріали для виготовлення механічної частини та вартість монтажно-технічних робіт.

У таблиці 3.1 наведено деталізований перелік витрат, сформований на основі специфікацій, наведених у розділі 2.

Таблиця 3.1 – Специфікація витрат на основні компоненти системи

Найменування компонента	Кількість	Орієнтовна ціна за од., грн.	Загальна вартість, грн.
1	2	3	4
Силове обладнання:			
Генератор Mars Rock G1000 (PMG)	1 шт.	18500	18500
Контролер Mars Rock 2000W-48V	1 шт.	9200	9200
АКБ Deye SE-G5.1 Pro (5.12 кВт·год)	1 шт.	54000	54000
Інвертор Victron MultiPlus 48/2000/25	1 шт.	38500	38500
Пристрій АВР Tomzn TOQ5-100/4P	1 шт.	1800	1800

					<i>ДП.141.043.022.ПЗ</i>		
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гришук О.Г.				3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОЄКТУ		
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
						Літ.	Арк.
						У	43
						Аркушів	
						60	
						ЖАТФК, Гр. Е-43стн	

Продовження таблиця 3.1

Найменування компонента	Кількість	Орієнтовна ціна за од., грн.	Загальна вартість, грн.
1	2	3	4
Металоконструкція та матеріали:			
Сталь (лопаті, диски, вал, щогла)	745 кг	45 (грн/кг)	33525
Підшипникові вузли, кріплення	1 компл.	4500	4500
Кабель мідний ПВ-3 16 mm ²	40 м	120	4800
Захисна гофра, щитове обладнання	1 компл.	3500	3500
Разом:			168325

Витрати на реалізацію проєкту також включають зварювальні роботи, антикорозійне покриття (цинкування або фарбування) та монтаж із залученням спецтехніки:

- виготовлення металоконструкції (зварювання, балансування): 25% від вартості металу становить близько 8400 грн.;
- антикорозійне покриття: 3000 грн.;
- фундаментні роботи (бетон, арматура): 6500 грн.;
- монтажні роботи та оренда автокрана: 12000 грн.

Визначимо сумарні капітальні вкладення K_{Σ} за формулою наведеною нижче:

$$K_{\Sigma} = C_{\text{мат.}} + C_{\text{роб.}} + C_{\text{тр.}}, \quad (3.1)$$

де:

$C_{\text{мат.}}$ – вартість обладнання та матеріалів, грн.;

$C_{\text{роб.}}$ – вартість робіт, яка становить 29900 грн.;

$C_{\text{тр.}}$ – транспортні та непередбачувані витрати, приймають 5% від загальної вартості, що становить близько 9900 грн.

Тоді за виразом 3.1 отримаємо, що:

$$K_{\Sigma} = 168325 + 29900 + 9900 = 208125 \text{ грн.}$$

3.2 Аналіз витрат на функціонування та собівартості енергії

Експлуатаційні витрати $C_{\text{експ}}$ для вітроенергетичної установки на базі ротора Савоніуса характеризуються низькими показниками порівняно з паливними генераторами, оскільки первинний енергоресурс (вітер) є безкоштовним. Проте життєвий цикл системи передбачає витрати на технічне обслуговування та амортизаційні відрахування для відновлення основних фондів.

Сумарні річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$C_{\text{річ.}} = C_{\text{обл.}} + C_{\text{аморт.}} + C_{\text{непередбач.}}, \quad (3.2)$$

де:

$C_{\text{обл.}}$ – витрати на технічне обслуговування та регламентні роботи, грн.;

$C_{\text{аморт.}}$ – амортизаційні відрахування, грн.;

$C_{\text{непередбач.}}$ – непередбачувані витрати (резервний фонд), грн.

З огляду на значну масу ротора (447 кг) та висоту щогли, надійність системи залежить від регулярного сервісу механічних вузлів. Програма обслуговування включає:

- змащування опорних вузлів: дворазова ревзія радіально-сферичних підшипників (перед зимовим та літнім сезонами);
- механічний контроль: інспекція зварних швів, болтових з'єднань та натягу щогли після періодів штормових вітрів;
- аеродинамічна гігієна: очищення поверхонь лопатей від пилу, бруду та обледеніння для підтримання стабільного коефіцієнта використання енергії вітру;

- електротехнічний моніторинг: перевірка цілісності контактних груп, діагностика роботи інвертора та балансування комірок АКБ за допомогою інтегрованої системи BMS.

З огляду на все вище зазначене, сумарні річні витрати на технічне обслуговування та регламентні роботи оцінюються у суму рівну близько 2500 грн./рік.

Амортизаційні відрахування розраховуються на основі середнього терміну експлуатації ключових компонентів:

- металоконструкція та генератор: 20 років;
- електронне обладнання (інвертор, контролер): 10 – 12 років;
- накопичувач енергії (LiFePO4): 10 – 15 років (понад 6000 циклів).

Прийнявши середній коефіцієнт амортизації на рівні 7% від загальних капітальних вкладень, маємо:

$$C_{\text{аморт.}} = 0,07 \cdot K_{\Sigma} = 0,07 \cdot 208125 = 14568 \text{ грн./рік.} \quad (3.3)$$

Непередбачувані витрати – це фінансовий «буфер» на випадок подій, які неможливо точно спрогнозувати графіком обслуговування. У кошторисах цей показник зазвичай становить 5 – 10% від суми перших двох компонентів.

Сюди входять:

- дрібний аварійний ремонт: заміна запобіжників, реле або датчиків, що передчасно вийшли з ладу;
- наслідки стихійних явищ: усунення незначних пошкоджень після аномально сильних штормів, які перевищують розрахункові навантаження;
- транспортні витрати: термінова доставка запчастин або виїзд спеціаліста у разі раптової зупинки системи.

Розрахуємо даний тип витрат за виразом:

$$C_{\text{непередбач.}} = 0,07 \cdot (C_{\text{обл.}} + C_{\text{аморт.}}). \quad (3.4)$$

Матимемо, що:

$$C_{\text{непередбач.}} = 0,07 \cdot (2500 + 14568) = 1195 \text{ грн./рік.}$$

Таким чином, у відповідності до виразу 3.2 сумарні річні експлуатаційні витрати становитимуть:

$$C_{\text{річ.}} = 2500 + 14568 + 1195 = 18263 \text{ грн./рік.}$$

Для об'єктивної оцінки ефективності функціонування проведемо порівняльний аналіз витрат розробленої нами ВЕУ та бензинового генератора аналогічної потужності при забезпеченні річного виробітку в обсязі 1050 кВт·год. (див. таблицю 3.2)

Таблиця 3.2 – Порівняння річних операційних витрат

Стаття витрат	ВЕУ Савоніуса (проект)	Бензиновий генератор (2 кВт)
Паливо / Ресурс вітру	0 грн.	26250 грн (при 0,5 л/кВт·год.)
Технічне обслуговування	2500 грн.	4000 грн. (мастило, фільтри, свічки)
Амортизація та ремонт	14568 грн.	5 500 грн. (витрата моторесурсу)
Непередбачувані витрати	1195 грн.	665 грн.
РАЗОМ ЗА РІК	18263 грн.	36415 грн.

Для об'єктивної оцінки економічної ефективності вітроенергетичної установки (ВЕУ) використовується міжнародний показник LCOE (Levelized Cost of Energy). Він відображає середню розрахункову собівартість одиниці електричної енергії за весь життєвий цикл об'єкта, враховуючи як початкові інвестиції, так і майбутні витрати на експлуатацію.

Розрахунок базується на прогнозованому терміні служби системи у 15 років, що відповідає ресурсу літій-залізо-фосфатних акумуляторів (при 6000 циклах) та механічної частини ротора Савоніуса.

Сукупні витрати складаються з капітальних вкладень K_{Σ} та щорічних експлуатаційних витрат $C_{\text{річ.}}$, помножених на термін експлуатації n :

$$L_{C_{\text{витрати}}} = K_{\Sigma} + (C_{\text{річ.}} \cdot n) = 208125 + (18263 \cdot 15) = 482070 \text{ грн.} \quad (3.5)$$

Виходячи з розрахункової річної генерації в 1050 кВт·год (згідно з вітровим потенціалом Житомирської області та ККД ротора), сумарний обсяг генерації електроенергії E_{max} розробленої нами ВЕУ становитиме:

$$E_{\text{max.}} = E_{\text{рік}} \cdot n, \quad (3.6)$$

де:

$E_{\text{рік}}$ – генерація електроенергії за рік розробленою ВЕУ, кВт·год.;

n – термін експлуатації ВЕУ, роки.

Таким чином, за виразом 3.5 будемо мати, що:

$$E_{\text{max.}} = 1050 \cdot 15 = 15750 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Тепер визначимо середню розрахункову собівартість одиниці електричної енергії L_{COE} за весь життєвий цикл нашого розробленого вітрогенератора на базі ротора Савоніуса за виразом:

$$L_{\text{COE}} = \frac{L_{C_{\text{витрати}}}}{E_{\text{max.}}} = \frac{482070}{15750} = 30,6 \text{ грн./кВт} \cdot \text{год.} \quad (3.7)$$

Отримане значення 30,6 грн./кВт·год. є ключовим індикатором для порівняння ефективності системи. Попри те, що цей показник вищий за

державний тариф (4,32 грн.), це лише підтверджує, що ВЕУ малої потужності слід розглядати не як комерційний інструмент для продажу енергії, а як засіб забезпечення енергетичної автономії.

Водночас у порівнянні з іншими джерелами резервного живлення собівартість енергії ВЕУ є майже вдвічі нижчою за енергію бензинових генераторів (45 – 55 грн./кВт·год). Це доводить, що використання вітру є економічно вигіднішим рішенням, ніж тривале спалювання палива у двигунах внутрішнього згоряння.

3.3 Розрахунок терміну окупності системи

Термін окупності проекту визначається як період, за який чистий дохід (або заощадження) від експлуатації установки повністю покриває початкові інвестиції.

Оскільки основною функцією системи є заміщення паливного генератора під час аварійних відключень мережі (режим "Blackout"), розрахунок проводиться відносно витрат на паливо та обслуговування бензинового аналога.

Для проведення розрахунку економічної ефективності проекту за основу взято загальні капітальні вкладення у розмірі $K_{\Sigma} = 208125$ грн. Економічний ефект формується за рахунок річної вартості заміщеної енергії $\Delta S = 47250$ грн., що відповідає вартості 1050 кВт·год електроенергії, виробленої бензиновим генератором за тарифом 45 грн./кВт·год. При цьому враховуються щорічні реальні витрати на сервісне обслуговування ВЕУ в сумі $C_{\text{обл.}} = 2500$ грн., без урахування амортизації для коректного визначення терміну повернення живих коштів.

Формула для розрахунку терміну окупності наведена нижче:

$$T_{ок} = \frac{K_{\Sigma}}{\Delta S - C_{обл.}} = \frac{208125}{47250 - 2500} = 4,65 \text{ років.} \quad (3.8)$$

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

4.1 Загальні положення та системний аналіз виробничих ризиків

Забезпечення безпечних умов експлуатації вітроенергетичної установки на базі ротора Савоніуса вимагає глибокого аналізу потенційних небезпек, притаманних об'єктам з великою рухомою масою та високим вертикальним розташуванням функціональних вузлів. Основним джерелом механічної загрози є значний інерційний момент ротора, сумарна вага якого у поєднанні з лопатями, опорними дисками та центральним валом складає майже половину тонни. Такий масивний об'єкт, навіть при низьких частотах обертання, накопичує величезну кінетичну енергію, що робить будь-який випадковий контакт із рухомими частинами фатальним. Враховуючи специфіку об'єкта, що розташований у зоні щільної приватної забудови м. Житомира, заходи безпеки розповсюджуються не лише на персонал, що безпосередньо обслуговує систему, а й на цілісність навколишньої інфраструктури та цивільних осіб.

Окремим критичним чинником ризику є висотний характер конструкції, оскільки щогла висотою вісім метрів створює значне важельне плече та перекидний момент під дією вітрового тиску, що вимагає безперервного контролю за цілісністю фундаменту, станом анкерних кріплень та відсутністю втомних деформацій у металі опорної колони.

4.2 Технічні заходи безпеки під час монтажу та висотних робіт

Процес встановлення щогли та інтеграції двоярусного ротора належить до категорії робіт з підвищеною небезпечністю, що зумовлює обов'язкове					ДП 141.043.022 ПЗ		
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гришук О.Г.				4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ		
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	50	60
					ЖАТФК, Гр. Е-43стн		

використання спеціалізованої підйомної техніки та суворе дотримання технологічної карти монтажу.

Категорично забороняється проведення складальних операцій силами персоналу без застосування сертифікованих лебідок, талів або кранів-маніпуляторів, оскільки спроби ручного маніпулювання такими масами неминуче призводять до порушення рівноваги конструкції та важкого травматизму.

Будь-яке сервісне втручання на висоті, що перевищує півтора метра від рівня поверхні – зокрема регламентне змашування верхніх підшипникових вузлів або інспекція кріплень сталевих лопатей – має супроводжуватися використанням повного комплекту індивідуальних засобів захисту. Працівник зобов'язаний застосовувати професійний запобіжний пояс із надійною двоточною фіксацією до силових елементів щогли, при цьому використання касок та захисних окулярів є обов'язковим.

Робоча зона в радіусі десяти метрів під установкою під час робіт має бути чітко огорожена сигнальною стрічкою для запобігання випадковому травмуванню людей у разі падіння монтажних інструментів чи кріпильних елементів.

4.3 Електробезпека та комплексний захист від атмосферних розрядів

Попри використання у первинному ланцюзі відносно низької напруги постійного струму в сорок вісім вольт, енергосистема ВЕУ становить суттєву електричну небезпеку через екстремально велику ємність акумуляторного блоку та значні струми короткого замикання, які можуть миттєво розплавити провідники.

Захист від ураження струмом та виникнення дугових розрядів реалізується через ретельну багатошарову ізоляцію всіх струмопровідних частин та використання герметичних діелектричних кабельних каналів, що

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

повністю виключають потрапляння вологи чи конденсату в силову шафу. Система заземлення відіграє критичну роль у загальній безпеці об'єкта, виконуючи функцію первинного блискавковідводу для всього домоволодіння.

Оскільки сталева щогла вітрогенератора є домінуючою висотою на ділянці, вона підключається до окремого контуру заземлення з нормованим опором не більше чотирьох Ом. Це гарантує миттєве та безпечне відведення енергії атмосферного розряду в глибинні шари ґрунту, що запобігає не лише ураженню людей, а й електромагнітному руйнуванню чутливої мікропроцесорної автоматики контролера Mars Rock та інвертора Victron.

4.4 Забезпечення пожежної безпеки та норми експлуатації накопичувачів енергії

Розміщення потужного силового обладнання та літій-залізо-фосфатних акумуляторів у закритому приміщенні господарського приміщення вимагає суворого дотримання протипожежних норм та правил облаштування електроустановок. Основна пожежна небезпека в цій зоні пов'язана з можливим термічним розгоном у ланцюгах накопичення енергії при послабленні затискних клем або порушенні режимів заряду.

Технічне приміщення повинно бути обладнане ефективною системою природної або примусової вентиляції для підтримання стабільного теплового балансу, оскільки накопичення тепла від радіаторів інвертора може призвести до критичного підвищення температури електроліту в акумуляторах.

У безпосередній близькості до енергетичного вузла в обов'язковому порядку розміщується вуглекислотний вогнегасник відповідного класу. Використання вогнегасників саме такого типу є пріоритетним, адже вони дозволяють ліквідувати локальне займання безпосередньо під напругою, не

створюючи загрози для життя оператора та не завдаючи незворотної шкоди електронним платам керування через хімічну агресивність гасних речовин.

4.5 Системи аварійного гальмування та регламент безпечного сервісу

Надійність та безпека функціонування масивного ротора Савоніуса в умовах екстремальних метеорологічних викликів гарантується інтегрованою системою багаторівневого гальмування.

У разі отримання штормового попередження, виявлення ознак дисбалансу або появи нехарактерних звуків у підшипниках, оператор зобов'язаний негайно ініціювати примусову зупинку системи через програмний інтерфейс контролера. Блокування обертів шляхом короткого замикання фаз генератора на баластні резистори дозволяє швидко та плавно поглинути кінетичну енергію ротора, переводячи її в теплове розсіювання.

Перед початком будь-яких маніпуляцій, що передбачають безпосередній фізичний доступ до лопатей чи вала, конструкція має бути додатково зафіксована механічним стопорним пальцем у нижній частині щогли. Такий захід безпеки є фундаментальним, оскільки він повністю унеможливорює самовільний запуск чи випадковий проворот п'ятисоткілограмової конструкції під дією раптового пориву вітру, гарантуючи абсолютну безпеку кінцівок та інструментів технічного персоналу під час проведення регламентних робіт.

4.6 Алгоритми надання першої долікарської допомоги при аварійних ситуаціях

Ефективність заходів з охорони праці визначається не лише технічними засобами захисту, а й готовністю персоналу до надання екстреної допомоги у разі виникнення нещасного випадку. Специфіка роботи з вітрогенератором Савоніуса передбачає два основні типи ризиків: механічне травмування та ураження електричним струмом. У випадку отримання механічних

					ДП.141.043.022.ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

пошкоджень внаслідок контакту з масивним ротором, першочерговим завданням є негайна зупинка кровотечі за допомогою тисних пов'язок або джгутів та надійна іммобілізація уражених кінцівок. З огляду на велику масу конструкції, особливу увагу слід приділяти виявленню ознак здавлювання тканин та забезпеченню спокою потерпілого до прибуття кваліфікованих медичних працівників.

При виникненні ситуації з ураженням електричним струмом, алгоритм дій починається з безпечного відключення джерела напруги. Оскільки система містить потужний акумуляторний блок, який неможливо вимкнути миттєво лише рубильником мережі, рятувальник повинен використовувати діелектричні предмети для від'єднання потерпілого від струмопровідних частин. Після звільнення потерпілого від дії струму необхідно миттєво оцінити стан життєво важливих функцій – дихання та серцебиття. У разі їх відсутності невідкладно розпочинається проведення серцево-легеневої реанімації.

Важливо враховувати, що навіть при задовільному самопочутті після удару струмом, потерпілий підлягає обов'язковій медичній госпіталізації для запобігання відстроченим порушенням серцевого ритму, які є типовими для травм, спричинених дією електричного потенціалу.

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту розроблено та обґрунтовано систему резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного домоволодіння в умовах Житомирської області.

Для специфічної забудови та помірного вітрового потенціалу регіону (3.8 – 4.2 м/с) обрано вертикально-осьову конструкцію, що здатна до самозапуску при низьких швидкостях повітряних потоків і має низьку чутливість до турбулентності. Проєктом визначено оптимальні параметри двоярусного ротора висотою 3.2 м та діаметром 2 м із фазовим зсувом ярусів на 90°, що забезпечує ліквідацію «мертвих зон», рівномірний крутний момент та номінальну потужність 600 Вт.

Конструкторський розрахунок підтвердив, що використання сталі СтЗсп та трилопатевої схеми загальною масою 744.63 кг забезпечує високу механічну стійкість та значну інерційність для згладжування пульсацій вітру.

Електрична частина системи, що базується на низькообертовому генераторі Mars Rock, гібридному контролері та літій-залізо-фосфатному акумуляторі Deye (5.12 кВт·год), гарантує автономну роботу критичних споживачів протягом 12 – 18 годин.

Економічний аналіз підтвердив доцільність проєкту: капітальні вкладення у розмірі 208125 грн. окупаються за 4,65 роки, а собівартість енергії 30,6 грн./кВт·год. є вдвічі нижчою за витрати на бензинову генерацію. Таким чином, розроблений проєкт є надійним, екологічним та економічно вигідним рішенням для забезпечення енергонезалежності приватних об'єктів в умовах енергетичної кризи.

					ДП.141.043.022.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гришук О.Г.				ВИСНОВКИ		
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.						
						Літ.	Арк.
						у	55
						Аркушів	
						60	
						ЖАТФК, Гр. Е-43стн	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

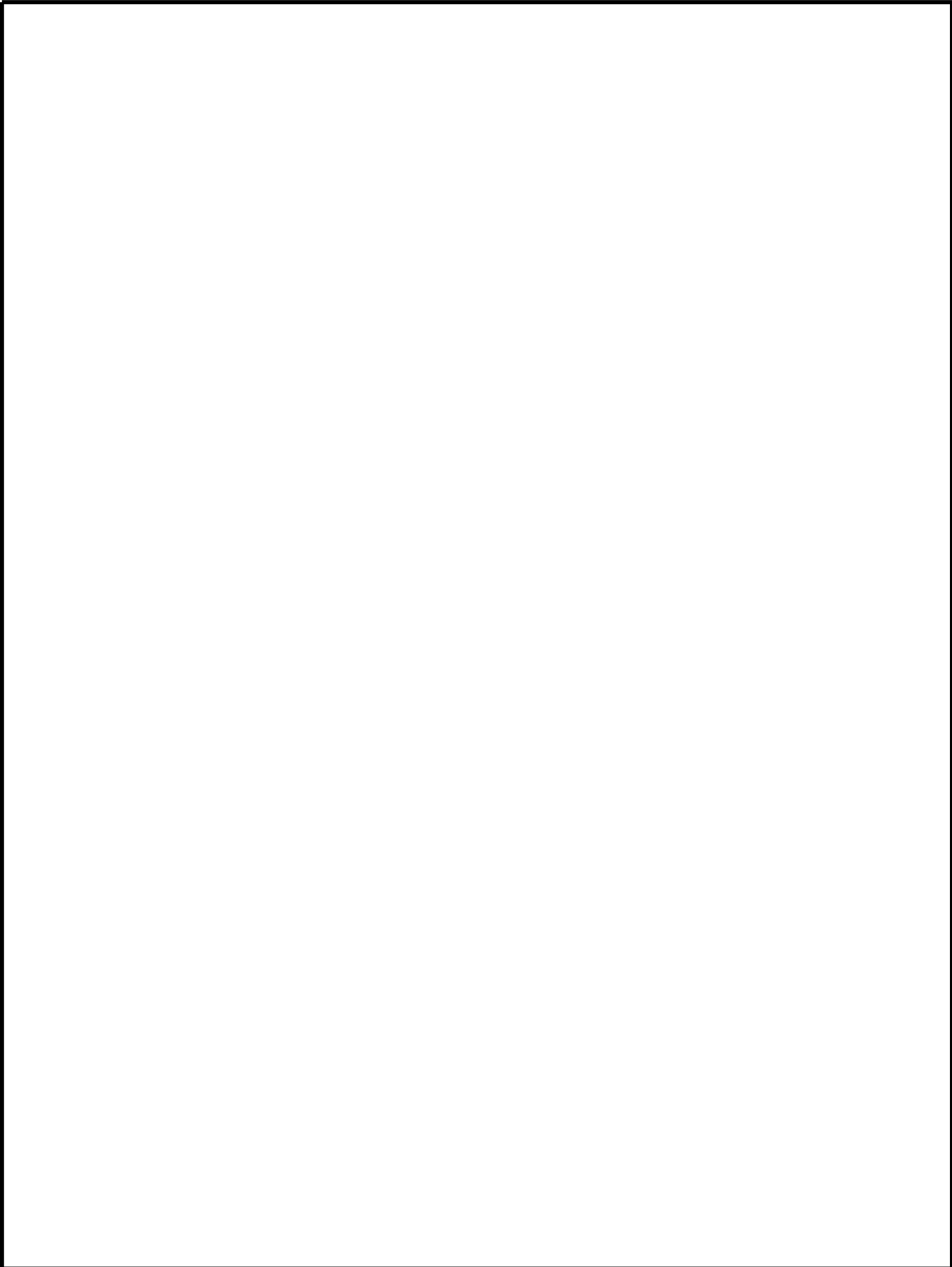
1. Циганок О. В., Череп А. В. Альтернативні джерела енергії як засіб ресурсоефективності / О. В. Циганок, А. В. Череп. *Глобальні та національні проблеми економіки* : електронне фахове видання / Миколаївський нац. ун-т ім В. О. Сухомлинського. 2018. Вип. 22. С. 688–691. URL: <http://global-national.in.ua/issue-22-2018/30-vipusk-22-kviten-2018-r/3982-tsiganok-k-o-cherep-a-v-alternativni-dzherela-energiji-yak-zasib-resursoefektivnosti>
2. Типи вітрогенераторів. *Atmosfera.ua*. URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostantsii/tipivitrogeneratoriv/>.
3. Камінський Ю. Вітрогенератори для дому: види, приблизні ціни, виготовлення своїми руками / Ю. Камінський. URL: <https://cutt.ly/4e7twAi>.
4. Куц Т. Горизонтальний або вертикальний вітрогенератор? За і проти / Т. Куц. *Компанія "Концепція Енергозбереження"*. 2016. URL: <https://cutt.ly/Ge7tnGf>.
5. Миронюк Д. Вітер та сонце – разом ефективніше / Д. Миронюк. *Solarlove.org*. 2016. URL: <https://ecotown.com.ua/news/Viter-ta-sontse-razom-efektyvnishe/>.
6. Синєглазов В. М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем / В. М. Синєглазов. *Enerhodzherela.com.ua*. URL: <https://cutt.ly/ne7tUzD>.
7. Гібрид вітрогенератора і сонячних панелей. *BIP*. 2019. URL: <http://vir.uan.ua/hybrid-wind-turbineand-solar-panels/>.
8. Боровик Ю. Т., Єлагін Ю. В. Проблеми та перспективи розвитку

		альтернативної енергетики в Україні / Ю. Т. Боровик, Ю. В. Єлагін.			ДП 141.043.032.ПЗ		
		Вісник економіки транспорту і промисловості. 2019. № 65. С. 68–75.					
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ		
Розробив	Гришук О.Г.						
Перевір	Антипчук Б.О.						
Н. Контр.	Антипчук Б.О.						
Затв.	Гнатюк О.Ф.				ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
					Літ.	Арк.	Аркушів
					У	56	60

9. Касич А. О., Литвиненко Я. О. Чинники розвитку альтернативної енергетики у сучасних умовах / А. О. Касич, Я. О. Литвиненко. *Економіка і суспільство*. 2017. Випуск 12. С. 93–99.
10. Денисюк В. Ю., Оленіч В. С. Автономні гібридні системи енергопостачання з використанням відновлювальних джерел енергії / В. Ю. Денисюк, В. С. Оленіч. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 29–33.
11. Щур І. З., Климко В. І. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / І. З. Щур, В. І. Климко. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 2. С. 92–100. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2014_2_14
12. Український гідрометеорологічний центр. URL: <https://cutt.ly/xe7yOtD>.
13. Review about the straight-bladed vertical axis wind turbine (SBvawt) and its performance / K. Patel, Y. Sarthi, A. Tirkey, P. K. Sen. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*. 2014. Vol. 1, No. 6. P. 46-51.
14. Климко В. І., Щур І. З. Інтелектуальна система керування електропостачанням окремого об'єкта від мережі та поновлюваних джерел енергії / В. І. Климко, І. З. Щур. *Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених (25-26 жовтня, 2012 р., м. Київ). Київ, 2012. С. 25-26.
15. Основи охорони праці : підруч. для студентів вищ. навч. закладів / за ред. М. П. Гандзюка. Київ : Каравела, 2003. 408 с.
16. Кудря С. О., Будько В. І. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. І. Будько. Київ : КПІ, 2013. – 387 с.

17. Відрновлювальні джерела енергії : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі.
Київ : Ін-т відрновлювальної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
18. Енергетика України: об'єктивна реальність проти Стратегії 2050. Чому
стратегія розвитку ВДЕ від Міненерго виглядає нереалістичною? URL:
<https://www.epravda.com.ua/columns/2023/02/20/697207/>
19. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, Н.
Нойбергер, Д. Ципленков. Дніпро : НГУ, 2015. 335 с.

Познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
	<i>НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЕЛЕМЕНТИ</i>		
VD1, VD4	LN4234	2	діод
VD2, VD3	світлодіод Led 5 mm	2	зелений
VD5, VD6	світлодіод Led 5 mm	2	червоний
VD7- VD12	1N4007	6	силовий діод
VD13	BZX55	1	стабілітрон
VD14	1N4148	1	діод
VD15	1N4007	1	силовий діод
VT1	IRP540	1	польовий транзистор
VT2, VT3	IRL2505	2	польовий транзистор
VT3	BC547	1	біполярний транзистор
VT4	BD139	1	біполярний транзистор
VT5	TIP41	1	біполярний транзистор
	<i>РЕЗИСТОРИ</i>		
R1, R2	3,3 кОм	2	
R3, R4, R10	10 кОм	3	
R5, R6	3,3 кОм	2	
R7, R12, R24, R25	1 кОм	4	
R8, R9	560 Ом	2	
R11	100 кОм	1	
R13, R14	47 кОм	2	
R15 - R18	1 МОм	4	
R17, R21, R22	100 Ом	3	
R18, R19, R20	200 Ом	3	
R23	510 Ом	1	
	<i>КОНДЕНСАТОРИ</i>		
C1, C2	10 мкФ	2	
C3 ... C6	4700 мкФ	4	



					ДП.141.043.022.ПЗ			
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	Перелік елементів. Схема електрична принципова. Система резервного електроживлення на базі вітрогенератора з ротором Савоніуса для приватного об'єкта побутового типу. (ДОДАТОК А)	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Гришук О.Г.					У	59	60
Перевір	Антипчук Б.О.					ЖАТФК, Гр. Е-43стн		
Н. Контр.	Антипчук Б.О.							
Затв.	Гнатюк О.Ф.							

[illegible]

